



BUTLLETÍ  
de l'ACIA

Estiu 1995, número 4

Trobada de joves investigadors. IIIA 7/8 setembre 1995

INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL DISTRIBUÏDA

XARXES NEURONALS

ROBÒTICA I VISIÓ I

ROBÒTICA I VISIÓ II

APRENENTATGE I ADQUISICIÓ DE CONEIXEMENTS

SISTEMES BASATS EN CONEIXEMENTS

ASPECTES FORMALS

**Director**Carles Sierra [sierra@iiia.csic.es](mailto:sierra@iiia.csic.es)**Seccions d'opinió**

Ton Sales [sales@lsi.upc.es](mailto:sales@lsi.upc.es)  
 Llorenç Valverde [dmilvg0@ps.uib.es](mailto:dmilvg0@ps.uib.es)  
 Miquel Barceló [blo@lsi.upc.es](mailto:blo@lsi.upc.es)

**Corresponsals**

Jaume Tió  
 Universitat de Lleida  
[jtio@etseal.upc.es](mailto:jtio@etseal.upc.es)  
 Josep Lluís de la Rosa Esteva  
 Universitat de Girona  
[pepluis@ei.udg.es](mailto:pepluis@ei.udg.es)  
 Ramon Sangüesa  
 Universitat Politècnica de Catalunya  
[sanguesa@lsi.upc.es](mailto:sanguesa@lsi.upc.es)  
 Ulises Cortés  
 Universitat Politècnica de Catalunya  
[ia@lsi.upc.es](mailto:ia@lsi.upc.es)  
 Miquel Belmonte  
 Universitat jaume I  
[belmonte@vents.uji.es](mailto:belmonte@vents.uji.es)

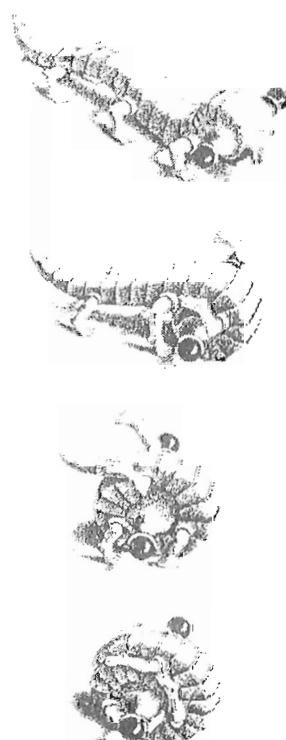
**Secretariat del comitè de redacció**

Maria de Mar Cuñado  
 IIIA-CSIC, Campus de la UAB, 08193  
 Bellaterra, [mar@iiia.csic.es](mailto:mar@iiia.csic.es)

**Adreça i telèfon de contacte**

ACIA  
 Institut d'Investigació en Intel·ligència  
 Artificial  
 Campus de la UAB, 08193 Bellaterra  
 tf: 93 5809570

Dipòsit Legal GI 1348/94



En aquest número especial us presentem les actes de les comunicacions de la Trobada de Joves Investigadors (TJI'95) organitzat per l'ACIA, i celebrades a l'IIIA (CSIC) els dies 7 i 8 de setembre. Hem organitzat les comunicacions en cinc grups temàtics, tot i que alguna comunicació presenta una feina interdisciplinari sempre difícil d'ubicar. Hem d'agrair la tasca dels revisors que han fet comentaris a les comunicacions i que són els següents:

Beatriz López	URV
Carme Torras	CSIC
Enric Plaza	CSIC
Fernando Orejas	UPC
Jordi Vitrià	UAB
Josep Lluís de la Rosa	UdG
Miquel Belmonte	UJI
Ramon López de Mànjaras	CSIC
Ton Sales	UPC

La qualitat de les comunicacions i la quantitat d'elles fa pensar que la recerca en temes d'Intel·ligència Artificial es troba en un bon moment a Catalunya. Molts dels articles venen signats per estudiants de doctorat que tenen el seu tema de treball ja ben definit, la qual cosa fa preveure un increment considerable dels doctors en aquesta àrea en els propers anys.

Finalment, voldria agrair la inestimable ajuda que la Gemma Sales ha proporcionat en la maquetació d'aquestes actes; sense ella alguns dels membres del comitè organitzador ben segur hauríem vist minvar el nostre període de vacances.

**Carles Sierra, Juliol 1995**



PRESIDENT: Enric Plaza i Cervera, [enric@iiia.csic.es](mailto:enric@iiia.csic.es)

VICE-PRESIDENT: Ramon Sangüesa i Solé, [sanguesa@lsi.upc.es](mailto:sanguesa@lsi.upc.es)

SECRETARI: Jordi Vitrià i Marca, [jordi@upisun1.uab.es](mailto:jordi@upisun1.uab.es)

TRESORER: Miquel Sánchez i Marrè, [sanchez@lsi.upc.es](mailto:sanchez@lsi.upc.es)

VOCALS: Felip Manyà i Serres, [felip@fermat.eup.udl.es](mailto:felip@fermat.eup.udl.es);

Josep Maria Sopena, [pep@farmacia.ub.es](mailto:pep@farmacia.ub.es)

DIRECTOR DEL BUTLLETÍ: Carles Sierra Garcia, [sierra@iiia.csic.es](mailto:sierra@iiia.csic.es)

BUTLLETÍ de l'ACIA

# ARTICLES I SESSIONS

## Horari de les sessions



	DIA 7/9	DIA 8/9
10:00		
	INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL DISTRIBUÏDA	
11:20	DESCANS	11:20
11:40		11:40
	ROBÒTICA I VISIÓ I	
13:00	DINAR	13:00
15:00	APRENENTATGE I ADQUISICIÓ DE CONEIXEMENTS	15:00
16:20	DESCANS	16:10
16:40		16:00
	ASPECTES FORMALS	ASSEMBLEA GENERAL DE L'ACIA
17:40		18:00

# ARTICLES I SESSIONS

## INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL DISTRIBUÏDA

Intel·ligència Col·lectiva, <i>Jordi Delgado Pin</i> .....	7
Learning to solve Complex Tasks for Reactive Systems, <i>Mario Martin</i> .....	11
Modelització de creences dinàmiques, <i>Antonio Moreno</i> .....	15
Alogaritmo genètic amb control de les operadores per a problemes de FLOW-SHOP, <i>J. Bautista, R. Pastor</i> .....	23

## XARXES NEURONALS

Interferència Catastròfica en xarxes neuronals: Solucions i relació amb altres problemes del conexióisme, <i>Vicente Ruiz de Angulo</i> .....	29
Aproximació de funcions i regularització amb xarxes neuronals, <i>Hugo Zaragoza Ballester</i> .....	31
Posicionamiento visual de robots mediante xarxes neuronals i descriptors globals de la imatge, <i>Gordon Wells</i> .....	37

## ROBOTICA I VISIÓ I

2D Object Recognition in Polynomial Time by Approximate Geometric Matching, <i>M. Carmen Molina Gámez</i> .....	43
Facial Features Segmentation by Rubber Snakes, <i>Petia Radeva i Enric Martí</i> .....	49
Percepció de textures, <i>Maria Vanrell</i> .....	55
Sistemes Actius de Visió, <i>F. X. Roca</i> .....	61

## ROBÒTICA I VISIÓ II

Interpretació de dibuixos lineals mitjançant tècniques d'isomorfisme entre grafs, <i>Josep Lladós</i> .....	69
Non-Cartesian Networks for Middle-Level Vision, <i>J. R. Serra, J. Brian Subirana</i> .....	75
Detección de interferencia estática y dinámica entre poliedros no convexos para la planificación de movimientos, <i>Pablo Jiménez Schlegl</i> .....	81
Disseny i implementació d'un hexàpod, <i>Aleix Martínez</i> .....	85

## APRENDATGE I ADQUISICIÓ DE CONEIXEMENTS

Inducció a partir d'exemples utilitzant el concepte d'antiuniificació, <i>Eva Armengol</i> .....	93
Configuració de problemes de planificació en NOOS, <i>Josep Lluís Arcos</i> .....	99
Experiències en el camp de la Generació de Regles, <i>David Riaño Ramos</i> .....	105
Consensus based validation in knowledge based systems, <i>Vicenç Torra i Raventós</i> .....	109

## SISTEMES BASATS EN CONEIXEMENTS

Classification based on rules: an application to Astronomy, <i>Karina Gibert, Manuel Hernández Pajares</i> .....	115
Milord II: Resum de recerca i perspectives futures, <i>Josep Puyol i Gruart</i> .....	121
Una arquitectura de sistemes experts per a la identificació en Biologia: Desenvolupament i aplicació, <i>Marta Domingo i Gou</i> .....	125
Representación y generación de planes con incertidumbre, <i>Enrique Paniagua Arís</i> .....	131

## ASPECTES FORMALS

Theorem Proving with Transitive Relations from a Practical Point of View, <i>W. Marco Schorlemmer</i> .....	139
GraSp: Un apropament visual a la captura de requeriments, <i>Jordi Puigsegur i Figueras</i> .....	145
Técnicas basadas en optimización para la solución de problemas de satisfacción de restricciones, <i>Javier Larrosa</i> .....	151

# INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL DISTRIBUÏDA

Jordi Delgado Pin

Mario Martín

Antonio Moreno

J. Bautista, R. Pastor

# Intel·ligència artificial distribuïda

## Intel·ligència col·lectiva

Jordi Delgado Pin

Departament LSI (FIB, UPC)  
Pau Gargallo 5 08028 Barcelona  
delgado@Complex.upc.es

### 1. Línia de Recerca i Presa de Posició

El problema que caracteritza a la Intel·ligència Artificial Distribuïda (DAI) es la resolució de problemes de manera *cooperativa* mitjançant la interacció de diversos agents *intel·ligents* (Wooldridge M.J., Jennings N.R. 1994). Una manera d'intentar resoldre'l és posar l'èmfasi en sistemes d'agents sofisticats que poden ser descomposats en subunitats quasi-independents on la interacció és mínima, reduint així el cost inherent a aquesta, encara que augmentant els recursos dedicats a la coordinació i control d'aquestes interaccions, sovint en forma d'un agent principal encarregat d'aquestes tasques (Castillo L., Quintanilla G. 1991). **Hi ha, però, una alternativa: explotar precisament aquestes interaccions, reduint la sofisticació dels agents.** Aquesta alternativa es coneix amb el nom de Càlcul Emergent (Forrest S. 1991): en un sistema d'elements (agents) *senzills* amb interaccions *locals* i de caràcter fortemet *no-lineal* s'observen epifenòmens a escala macroscòpica (on l'escala microscòpica vindria definida per l'escala característica dels agents individuals) que podem interpretar com un *càlcul*. Com a exemple de recerca realitzada segons aquest enfoc de la DAI tenim el treball de Huberman i el seu equip, el *Dynamics of Computation Group* del Xerox Palo Alto Research Center (veieu com a exemple representatiu Huberman B.A. (ed.) 1988).

En la natura podem trobar exemples prou eloquents de sistemes que operen segons els principis d'aquesta manera d'enfocar la DAI; casos paradigmàtics són els *insectes socials*. L'habilitat amb la que aquests insectes resolen problemes de distribució de recursos, cerca d'aliment, tria de fonts d'aliment, vigilància del niu, etc. fa que l'estudi dels insectes socials com a sistemes complexos cooperatius estigui més que justificat per a la DAI (com podem veure en treballs recents, p. ex. Deneubourg J.L. et al. 1991 i Bonabeau et al. (eds.) 1995). Malgrat tot, continuar aquesta línia de treball implica apartar-se, si més no metodològicament, de les eines característiques de la IA, havent d'utilitzar teories provinents tant de la física (mecànica estadística i transicions de fase, Binney J.J. et al. 1992) com de les Ciències de la Complexitat (Nicolis G. et al. 1977, Cowan G.A. et al. (eds.) 1994).

Podriem dir que la recerca dels insectes socials veient-los des del punt de vista dels sistemes complexos cooperatius neix amb la *Cibernètica*, p. ex. ja en la dècada dels anys '50 es parla d'*Homeostasi Social* (veure Wilson E.O. 1971, cap. 16 per a una antiga revisió). Malgrat tot, no és fins als anys '70, a partir dels treballs sobre *auto-organització* i estructures dissipatives del grup de I. Prigogine (Nicolis G. et al. 1977) i sobre *Sinergètica* de H. Haken (Haken H. 1977), que trobem els primers estudis d'aspectes particulars de la dinàmica col·lectiva dels insectes socials basats en tècniques de sistemes complexos, p. ex. quals pertanyen essencialment a l'escola de Brussel·les (veure Nicolis G. et al. 1977 per a un resum d'aquests treballs).

A partir d'aleshores els treballs en aquesta línia han estat nombrosos, tant en Biologia (per a una revisió recent, veure Hölldobler B. et al. 1990) com en el nou camp de recerca de la Vida Artificial, però potser

# Intel·ligència artificial distribuïda

els que considero més rellevants siguin els del grup de Deneubourg (Deneubourg et al. 1983, Deneubourg et al. 1986) on s'observa la importància del soroll en el comportament col·lectiu, i els de Mark M. Millonas (Millonas M.M. 1994) on confirma analíticament les observacions anteriors proposant un mecanisme concret mitjançant el qual el soroll organitza i estructura els col·lectius: **les Transicions Induïdes per Soroll**.

## 2. Resultats

Els processos que poden arribar a organitzar un col·lectiu són diversos, n'hi ha que depenen exclusivament de la natura animal dels individus que componen el col·lectiu, com els processos de diferenciació genètica, i n'hi ha que depenen de fenòmens dinàmics d'autoorganització (Hölldobler et al. 1990). D'aquests darrers, que evidentment són els de més interès per a la DAI, existeix un de particular interès, ja que està involucrat en processos on es requereix algun tipus de capacitat col·lectiva de càlcul (p. ex: divisió del treball (Robinson 1992) o l'exclusió mutua (Hatcher et al., 1992)): **la sincronització temporal en l'activitat dels formigüers**. Un model formal de l'esmentada sincronització es va proposar no fa massa, basat en dades experimentals recollides en colònies de formigues *Leptothorax* (Miramontes et al. 1993), anomenat **Xarxa Neuronal Fluida** (XNF). L'estudi d'aquest model ens ha permès donar certa plausibilitat biològica a la hipòtesi de la *Frontera del Caos* i verificar les propostes de Millonas. Concretament, els resultats que hem assolit fins ara són:

- \* Trobar que la sincronització s'assoleix per a una densitat crítica (densitat trobada també experimentalment en les colònies de *Leptothorax*). El fenomen és reminiscent del que s'anomena transicions en *la frontera del caos* (Solé i Miramontes 1995 i Solé i Delgado (en premsa)).
- \* Hem trobat també que la sincronització es produeix per a una densitat on observem un fenomen de *transició induïda per soroll*. Aquest mecanisme d'organització de col·lectius ha estat proposat i analitzat en el cas dels *stigmergic processes*<sup>1</sup> per Millonas (Millonas M.M. 1994) i sugerit pel mateix Millonas com a mecanisme més general. El nostre resultat confirma el seu suggeriment en el cas dels processos de sincronització. L'evidència numèrica ha estat ja publicada (Delgado i Solé 1995) i el treball analític és el que ens ocupa actualment. Si poguèssim confirmar-ho, estariem presentant un marc teòric més sólid on ubicar els fenòmens de *transició a la frontera del caos*.

Un'altra part del nostre treball està relacionada amb les capacitats de càlcul dels col·lectius d'agents senzills fortament interactuants. Basant-nos també en les XNF, hem trobat que, combinant els mecanismes *stigmergics* i de sincronització podem fer una porta lògica NOR *col·lectiva*. Es clar que aleshores, amb circuits de XNF, podríem implementar una maquina de Turing universal. Aquest treball encara no està publicat.

<sup>1</sup> Deixo sense traduir l'expressió *stigmergic process*. Significa que és el treball ja fet, més que la comunicació directa entre agents, el que fa que el treball continui (Hölldobler i Wilson 1990). Es refereix normalment al tipus de comunicació en insectes socials mitjançant feromones depositades en l'entorn.

# Intel·ligència artificial distribuïda

## Bibliografia

- BINNEY J.J., DOWRICK N.J., FISHER A.J., NEWMAN N.E.J. 1992, *The Theory of Critical Phenomena*, Oxford Univ. Press, Oxford.
- BONABEAU E., THERAULAZ G. (EDS.) 1995, *Intelligence Collective*, Hermès (Paris).
- CASTILLO L., QUINTANILLA G. 1991, *Initial Concepts in Distributed Artificial Intelligence*, Proceedings de TEC-COMP 91 Computación no Convencional: Hacia los Sistemas Inteligentes, Abril 1991, Ciutat de Mèxic.
- COWAN G.A., PINES D., MELTZER D. (EDS.) 1994, *Complexity: Metaphors, Models and Reality*, Addison-Wesley.
- CRUTCHFIELD J.P. 1994, *The Calculi of Emergence: Computation, Dynamics and Induction*, Physica D (75) p. 11.
- DELGADO J., SOLÉ R.V. 1995, *Evidence of a Noise Induced Transition in Fluid Neural Networks*, Research Report LSI-95-10-R (submitted to Physica D).
- DENEBOURG J.L., GOSS S., FRANKS N., SENDOVA-FRANKS A., DETRAIN C., CHRÉTIEN L. 1991, *The Dynamics of Collective Sorting: Robot-Like Ants and Ant-Like Robots en From Animals To Animats*, Meyer J.A. & Wilson S.W. (eds.) p. 356, MIT Press.
- DENEBOURG J.L., PASTEELS J.M., VERHAEGHE J.C. 1983, *Probabilistic Behaviour in Ants: A Strategy of Errors?*, J. Theor. Biol. (105), p. 259
- DENEBOURG J.L., ARON S., GOSS S., PASTEELS J.M., DUERINCK G. 1986, *Random Behaviour, Amplification Processes and Number of Participants: How They Contribute to the Foraging Properties of Ants*, Physica D (22) p. 176.
- FORREST S. 1991, *Emergent Computation en Emergent Computation*, Forrest S. (ed.) p. 1, MIT/North-Holland 1991.
- HAKEN H. 1977, *Synergetics*, Springer-Verlag .
- HATCHER M.J., TOFTS C., FRANKS N.R. 1992, *Mutual Exclusion as a Mechanism for Information Exchange Within Ant Nests*, Naturwissenschaften (79), p. 32.
- HÖLLOBLER B., WILSON E.O. 1990, *The Ants*, Cambridge: Belknap.
- HORSTHESMKE W., LEFEVER R. 1984, *Noise Induced Transitions*, Springer-Verlag.
- HUBERMAN B.A. (ED.) 1988, *The Ecology of Computation*, North-Holland.
- MILLONAS M.M. 1994, *Swarms, Phase Transitions and Collective Intelligence, en Artificial Life III*, Langton C.G. (ed.), p. 417, Addison-Wesley
- MIRAMONTES O., SOLÉ R.V., GOODWIN B.C. 1993, *Collective Behaviour of Random Activated Mobile Cellular Automata*, Physica D (63) p. 145.
- NICOLIS G., PRIGOGINE I. 1977, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*, John Wiley & Sons.
- ROBINSON G.E. 1992, *Regulation of Division of Labor in Insect Societies*, Ann. Rev. Entomol. (37) p. 637
- SOLÉ R.V., DELGADO J. (EN PREMSA), *Phase Transitions in Fluid Neural Networks*, Proceedings de 25 Years of Non-Equilibrium Statistical Mechanics, Juny 1994, Sitges (Barcelona), Springer- Verlag.
- SOLÉ R.V., MIRAMONTES O. 1995, *Information at the Edge of Chaos in Fluid Neural Networks*, Physica D (80) p. 171
- WILSON E.O. 1971, *The Insect Societies*, Cambridge: Harvard Univ.Press.
- WOOLDRIDGE M.J., JENNINGS N.R. 1994, *Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey*, Proceedings de l'ECAI-Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (Wooldridge M.J. & Jennings N.R. eds.), Amsterdam 1994.

# Intel·ligència artificial distribuïda

## Sistemes reactius aprenent a resoldre tasques complexes

Mario Martin Dept. Llenguatges i Sistemes Informàtics  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Pau Gargallo 5, 08028, Barcelona (Catalunya), SPAIN  
[mmartin@lsi.upc.es](mailto:mmartin@lsi.upc.es)

### 1 Introducció

Un tema important en la recerca en sistemes reactius és la capacitat de l'aprenentatge de tasques complexes. Hi han hagut força mecanismes proposats per fer aprendre als sistemes reactius, per exemple [4] [5] (per un resum veure [2] ). Aquests mecanismes consisteixen en obtenir, habitualment per mitjà d'un procés d'assaig i error dirigit per un senyal de reforç, una correspondència entre el conjunt de possibles percepcions i el conjunt d'accions del sistema, que descriuen un comportament adequat.

Desafortunadament, aquests mètodes no són adients per aprendre a resoldre tasques complexes. Intuïtivament, podem considerar com a complexa una tasca la solució de la qual està formada per una llarga cadena d'accions. Resoldre aquest tipus de tasques directament mitjançant l'assaig i error no és factible, ja que el nombre de possibles cadenes d'accions a considerar creix exponencialment amb la longitud de la cadena solució.

La nostra proposta és que aquesta limitació pot ser superada aprenent a resoldre previament tasques més simples, però alhora més generals, útils per resoldre el problema inicial. Aquesta aproximació implica un procés d'aprenentatge *constructivista* o de *desenvolupament* en el qual el sistema va evolucionant superant diferents estadis. En cada estadi, que es caracteritza pel conjunt d'accions que el sistema coneix, aprèn nous comportaments que poden utilitzar-se com noves accions complexes que li seran útils per resoldre tasques més complexes en estadis superiors de desenvolupament.

Aquest treball exposa aquesta proposta a través d'un nou algorisme d'aprenentatge per reforç. El nou algorisme és necessari degut a la inadequació dels altres algorismes d'aprenentatge per reforç en l'aprenentatge de comportaments *generals*.

### 2 Aprenentatge de tasques complexes

En aquesta secció es discuteixen les característiques desitjables d'un bon mecanisme d'aprenentatge per resoldre tasques complexes.

Quan s'intenta desenvolupar un mecanisme per aprendre a resoldre tasques complexes per reforç, hem d'entendre les dificultats amb què ens trobem. La complexitat d'una tasca ve principalment determinada pel nombre d'accions que componen la solució (nombre d'accions executades fins que un reforç positiu o negatiu és obtingut) i pel nombre d'estats perceptuals que el sistema ha de tractar.

Sense cap coneixement inicial, el sistema reactiu únicament té el procediment d'assaig i error per intentar resoldre un problema. És conegut que *és molt difícil aprendre per*

# Intel·ligència artificial distribuïda

assaig i error com resoldre tasques que impliquen una llarga seqüència d'accions. Llavors, la complexitat d'una tasca ve determinada per l'adequació de les accions que el sistema pot prendre per resoldre-la: la possessió d'un conjunt d'accions generals adequat permetria resoldre el problema en poques passes. El sistema, proveït inicialment amb un conjunt d'accions primitives pot trobar algunes tasques massa difícils d'aprendre amb aquestes accions. En la nostra aproximació, el sistema resol aquest impasse aprenent a resoldre accions més generals que el permetran millorar les seves habilitats. Per tal d'aprendre aquestes noves accions el sistema haurà d'aprendre-les a través de la resolució de tasques generals intermèdies. Els comportaments apresos per resoldre aquestes tasques són inclosos en el conjunt inicial d'accions com noves accions disponibles. Les tasques intermèdies que el sistema ha d'aprendre, per tal de resoldre una tasca complexa, seran plantejades oportunament per un procés professor.

D'altra banda, se sap des del debat Ginsberg-Chapman [1] que, per resoldre tasques complexes amb sistemes reactius, és necessari realitzar una *generalització* de les possibles situacions. En tasques complexes, el nombre de situacions diferents és massa gran per considerar una resposta per cadascun d'ells. Chapman [1] ha mostrat que una percepció del món limitada mitjançant sensors "deictics" pot ser indicada per la resolució de tasques complexes amb sistemes reactius degut a l'adequat procés de generalització que produeixen. Aquesta percepció limitada implica que la informació de l'entorn que té el sistema és sempre parcial, incompleta i ambígua. La majoria dels mecanismes d'aprenentatge, per exemple Q-Learning [5], suposa que el sistema té una informació completa del seu entorn. Quan aquests mètodes han d'enfrontar-se amb informacions incompltes o ambigüitats, el problema de la confusió perceptual (perceptual aliasing) [6] apareix, impedint el procés d'aprenentatge. Llavors, una característica important que el nostre algorisme d'aprenentatge ha de mostrar és l'habilitat d'aprendre amb percepcions limitades del món.

Finalment, el reforç s'obté al resoldre un problema concret, però una característica important que el nostre mètode d'aprenentatge ha de mostrar és l'habilitat d'aprendre *comportaments generals* (no solucions particulars). Problemes amb el mateix objectiu general haurien de ser resolts amb el mateix comportament après. Aquesta característica normalment no es compleix en els mecanismes d'aprenentatge per reforç.

## 3 Un nou mecanisme d'aprenentatge

En aquesta secció, exposarem el mecanisme d'aprenentatge desenvolupat d'acord amb els requeriments explicats a la secció anterior. Aquest mecanisme ha de poder aprendre comportaments generals i enfrontar-se amb informació incompleta. Per tal de construir una jerarquia de comportaments, també ha de mostrar una alta *fiabilitat* en els comportaments apresos.

El procés d'aprenentatge construeix una taula indexada. Les entrades de la taula consisteixen en els possibles estats sensorials del sistema (situacions). La sortida consisteix en informació estadística per calcular la "probabilitat" d'obtenir, per cada acció executable en una situació donada, un reforç positiu. Aquesta informació estadística consisteix en el nombre d'èxits i errors ocorreguts depenent de l'execució o no de cada acció en aquella situació.

La probabilitat d'obtenir un reforç positiu quan s'executa una acció  $a$ , donada la

# Intel·ligència artificial distribuïda

situació actual  $s$ , s'estima de la manera següent<sup>1</sup>:

$$P(s, a) = \frac{S\_S(s, a)}{S\_A(s, a) + F\_A(s, a)} - \frac{S\_NA(s, a)}{S\_NA(s, a) + F\_NA(s, a)}$$

$S\_A(s, a)$  és el nombre d'èxits quan l'acció  $a$  ha estat executada en la situació  $s$ ,  $S\_NA(s, a)$  és el nombre d'èxits obtinguts quan l'acció no ha estat executada,  $F\_A(s, a)$  és el nombre d'errors obtinguts quan l'acció ha estat executada i  $F\_NA(s, a)$  és el nombre d'errors quan l'acció no ha estat executada.

Amb aquestes consideracions, l'algorisme per l'aprenentatge de comportaments consistirà en l'execució de la millor acció (definida com aquella amb més alta probabilitat de conduir a un reforç positiu) per cada situació amb què el sistema es troba fins que hi ha un èxit o un error. Quan aquest procés s'ha acabat, l'aprenentatge consisteix en actualitzar i ponderar els estadístics involucrats en l'elecció d'accions (veure detalls a [3]). L'aprenentatge acaba quan el sistema no aprèn res en un nombre predeterminat de problemes presentats. En aquest cas, el coneixement de com resoldre la tasca es guarda en una taula que serà utilitzada per incrementar el conjunt d'accions del sistema per resoldre tasques més complexes.

L'algorisme d'aprenentatge proposat presenta diferències respecte altres mètodes ben coneguts d'aprenentatge per reforç, especialment amb la família TD [4] [5], principalment en l'aprenentatge de comportaments fiables i generals sota confusió perceptual (veure detalls [3]).

D'acord amb la secció 2, la possibilitat d'aprendre a resoldre tasques complexes està subordinada al conjunt d'accions de què disposa el sistema. Per tal d'aconseguir les habilitats necessàries per enfocar-se a tasques complexes, un mestre ha de guiar el procés d'aprenentatge donant una seqüència de tasques generals a aprendre.

Per cada tasca, el mestre ha de conèixer: l'estat objectiu (quan un reforç positiu ha de donar-se), quan ha hagut un error (i.e. el nombre màxim d'accions a prendre per resoldre el problema i els estats perillosos) i, finalment, el conjunt d'accions útils per resoldre la tasca del conjunt total d'accions possibles així com el subconjunt de sensors.

A partir d'aquests elements, una jerarquia de comportaments es construeix fins que el sistema pot resoldre la tasca complexa inicial desitjada. Un exemple d'aquesta construcció s'exposa en la següent secció.

## 4 Experiments

S'ha realitzat un conjunt d'experiments per tal de provar el funcionament del mecanisme d'aprenentatge. L'entorn seleccionat és el "món dels blocs", que compleix les condicions de complexitat requerides: es poden presentar incrementalment tasques complexes, el sistema perceptual dóna informacions incompltes o ambígues, el conjunt inicial d'accions és massa simple per resoldre tasques complexes, etc. Aquest entorn ha estat prèviament utilitzat per en Chapman [1] i Whitehead i Ballard [6] per mostrar els inconvenients dels sistemes reactius en dominis complexos.

<sup>1</sup>Aquesta mesura ha estat comparada amb altres i presenta un comportament millor. En particular, aquesta mesura utilitza informació sobre el nombre d'èxits quan l'acció no ha estat activada, donant una estimació més similar a una correlació que a una probabilitat condicional.

# Intel·ligència artificial distribuïda

El sistema ha estat dissenyat per aquest entorn amb un conjunt de sensors i un conjunt d'accions molt simples. El sistema sensorial està compost de: visió foveal, visió perifèrica, memòria visual, sensors propioceptius i sensors tàctils. El conjunt inicial d'accions es compon d'accions molt primitives sobre el focus visual i una mà mecànica (veure detalls a [3] ).

La tasca complexa que el sistema ha de resoldre consisteix en col·locar un bloc d'un color donat en una posició on hi ha una marca visual. Inicialment el sistema únicament té el conjunt d'accions i sensors mencionat. Llavors, una solució del problema consistirà en una molt llarga seqüència d'accions, que com hem vist a la secció 2 és el principal problema que impedeix l'aprenentatge a partir d'un procediment d'assaig i error.

Per tal de resoldre el problema amb el nostre mètode, suposarem que un professor proveeix un conjunt de subtasques generals per aprendre, que permetrà resoldre el problema inicial. En el nostre cas, el mestre proposa aprendre les tasques generals següents: buscar un bloc, moure la mà al focus visual i, finalment, agafar un bloc. El procés d'aprenentatge per cadascuna d'aquestes tasques, genera un comportament que pot considerar-se com una nova acció general. Aquestes noves accions incrementen el repertori d'accions del sistema i poden utilitzar-se per resoldre tasques més complexes.

Els resultats experimentals (veure detalls a [3] ) són força bons per la tasca proposada i indiquen que tasques complexes com el "fruitcake problem" [1] poden resoldre's d'aquesta manera.

14

## 5 Conclusions

Aquesta recerca ens ha conduït a mostrar que és possible, per sistemes reactius, aprendre a resoldre tasques complexes. La tasca proposada en el món dels blocs, considerant el conjunt inicial d'accions del que disposa el sistema, no és actualment solvable per cap altre mètode d'aprenentatge per reforç directe. L'èxit de la nostra proposta és degut a la utilització d'un mecanisme d'aprenentatge robust a la informació ambígua, que pot millorar les habilitats del sistema aprenent nous comportaments per resoldre tasques generals.

## References

1. D. Chapman. Penguins can make cake. *AI Magazine*, 10:45-50, winter 1989.
2. L.P. Kaelbling. *Learning in Embedded Systems*. MIT Press, 1993.
3. M. Martin. Learning to solve complex tasks by reinforcement: A new algorithm. Technical report, Universitat Politècnica de Catalunya, 1995.
4. R.S. Sutton. Learning to predict by the methods of temporal differences. *Machine Learning*, 3(1):9-44, 1988.
5. C. Watkins. *Learning from delayed rewards*. PhD thesis, Cambridge Univ., 1989.
6. S.D. Whitehead and D.H. Ballard. Learning to perceive and act by trial and error. *Machine Learning*, 7:45-83, 1991.

# Intel·ligència artificial distribuïda

Modelització de creences dinàmiques \*

Antonio Moreno

Departament de Llenguatges i Sistemes Informàtics  
Universitat Politècnica de Catalunya

Pau Gargallo, 5

08028-Barcelona

E-mail: amoreno@lsi.upc.es

## 1 Objectiu de la tesi

Un dels temes principals d'investigació dintre de la Intel·ligència Artificial és la construcció d'*agents racionals* (un repàs de diferents aproximacions es pot trobar a [WOOL95]). L'arquitectura d'un d'aquests agents inclourà normalment una base de coneixements que emmagatzema dades relevantes, i mòduls capaços de realitzar cert tipus d'inferències sobre aquestes dades, d'interactuar amb l'entorn de l'agent, de generar i avaluar diferents plans, etc. Si l'agent ha de mostrar un comportament racional, aquest (probablement) haurà de venir guiat per (entre d'altres coses) les seves *creences* ([DENN87]). Aquestes creences es podrien usar e.g. per decidir entre diferents alternatives d'actuació que tingüés l'agent en un moment donat.

La construcció de sistemes de creences en la IA està molt lligada a una preocupació secular en Filosofia, com és la modelització del procés d'*investigació racional*<sup>1</sup>, la transformació (racional) de les creences d'un agent en el temps ([RESC79]). Aquest és també l'objectiu principal en la tesi que s'està desenvolupant.

Dintre de la lògica matemàtica s'han desenvolupat eines pel tractament de les creences, essencialment les *lògiques de coneixement i de creences* ([HALP92]). Aquestes lògiques són un cert tipus de lògiques modals, on l'operador de necesitat s'interpreta com *coneixement* (en les lògiques *epistémiques*) o com a *creença* (en les lògiques *doxàstiques*). La interpretació semàntica de les fórmules d'aquestes lògiques s'obté normalment utilitzant el *model dels móns possibles* ([HINT62]), amb la seva *semàntica de Kripke* associada ([KRIP63]). Básicament, aquest model postula l'existència d'un conjunt fixe  $W$  de *móns possibles* (que es consideren descripcions completes i consistentes de les diferents formes en que podria estar el món) i d'una *relació binària d'accésibilitat R* entre móns possibles (que, intuitivament, connecta cada món  $w$  amb tots aquells móns que podrien ser l'actual d'acord amb

\*Breu resum de les idees principals de la tesi que s'està desenvolupant en el programa de doctorat d'IA del departament de LSI de la UPC, sota la direcció dels doctors Ulises Cortés i Ton Sales.

<sup>1</sup>Traducció potser no gaire adequada pel terme *rational inquiry*.

# Intel·ligència artificial distribuïda

les creences de l'agent<sup>2</sup> en  $w$ ). Sota la semàntica de Kripke, es diu que l'agent *creu* una proposició  $p$  en un món  $w$  si  $p$  és certa en tots aquells móns R-accesibles des de  $w$  (i.e. aquells móns  $w'$  t.q.  $(w \ R \ w')$ ).

Aquestes lògiques són útils en determinades circumstàncies (e.g. modelitzar estats de coneixement en protocols de comunicació en sistemes distribuïts, o solucionar puzzles clàssics de coneixement com el dels nens enfangats, veure e.g. [FAGI95]), però no són apropiades per modelitzar la investigació racional per dos motius:

- El conjunt de móns possibles  $W$  i la relació d'accésibilitat  $R$  normalment es prenen com a fixes, i per tant el conjunt de creences que s'obté via la semàntica de Kripke també és constant. Això significa que les aproximacions clàssiques intenten modelitzar les creences de l'agent en un cert punt en el temps, però no la seva evolució racional gradual com a conseqüència del procés d'investigació de l'agent.
- L'ús del model dels móns possibles i la semàntica de Kripke fa que estiguem modelitzant agents que són *lògicament omniscients i raonadors perfectes*. Això significa que creuen totes les tautologies i que creuen totes les conseqüències lògiques de les seves creences. Aquestes propietats són clarament inadequades quan es volen modelitzar agents mínimament realistes (siguin humans o computacionals) que tenen limitacions de recursos que els impideixen ni tan sols apropar-se a aquests increïbles estats de coneixement.

Resumint, el nostre objectiu en la tesi és la *modelització del procés d'investigació racional* (l'evolució de les creences d'un agent racional en el temps com a conseqüència de la seva interacció amb el món i els seus processos interns d'inferència), *mantenint el model dels móns possibles i la semàntica de Kripke* (perque donen una semàntica natural i intuitiva per les lògiques modals) però *evitant els problemes de l'omnisciència lògica i el raonament ideal*.

## 2 Idees principals

### 2.1 Omnipotència lògica i raonament ideal

Dintre de la IA hi ha hagut moltes propostes que han intentat remediar els problemes de l'omnipotència lògica i el raonament ideal (a [MORE93] es pot trobar un breu repàs de les alternatives principals -[FAGI85], [KONO86], [HINT86], [LEVE84], [MONT70], [RANT75], [VARD86]-, i [FAGI95] dedica també un capítol a aquest tipus d'aproximacions). En la nostra opinió, la més interessant és la de Hintikka a [HINT75], on proposa la idea de tenir móns *[lògicament] impossibles [epistémicament] possibles*, encara que ell mateix no sembla haver continuat per aquesta via en treballs posteriors. Nosaltres hem adoptat aquesta idea, com queda reflexat e.g. a [MORE95].

<sup>2</sup>En tot aquest resum ens limitem al cas d'un sol agent.

L'arrel d'aquests problemes és el fet de que els móns possibles siguin descripcions *completes i consistents* de com podria estar el món actual. Aixó fa que siguin *models*, en el sentit lòtic de la paraula, i que per tant el conjunt de fòrmules que són certes en un món sigui lògicament tancat i contingui totes les tautologies.

Així, la primera proposta de la tesi és permetre l'existència de móns possibles que puguin ser *incomplerts i/o inconsistents*, i d'aquesta manera evitar els problemes de l'omnisciència lògica i el raonament ideal. Com apuntarem més tard, el que farem serà definir un món com un conjunt de fòrmules en un cert llenguatge modal proposicional, i no posarem cap condició sobre aquest conjunt de fòrmules (per tant, no tindrà perquè contenir totes les tautologies ni ser lògicament tancat, i evitarem els problemes clàssics). L'inconvenient d'aquesta definició sintàctica dels móns possibles és que és molt limitativa, en el sentit de que l'agent podria creure ( $p \wedge q$ ) i no creure ni  $p$  ni  $q$ , o podria creure ( $p \Rightarrow q$ ) i  $p$  però no creure  $q$ . Per tant, això ens portarà a definir algun tipus d'anàlisi sobre les creences de l'agent, que el permeti com a mínim tenir unes capacitats d'inferència raonables. Aquesta anàlisi està molt lligada a la segona qüestió que ens queda per tractar, com modelitzar l'evolució de les creences de l'agent en el temps.

## 2.2 Investigació racional

Una idea natural per a modelitzar creences dinàmiques, que varien en el temps reflectint els resultats dels processos interns d'inferència de l'agent i la seva interacció amb l'entorn, és permetre algun tipus de variabilitat en els ingredients del model dels móns possibles, el conjunt de móns possibles  $W$  i la relació d'accésibilitat  $R$ .

Imaginem que volem estudiar les creences de l'agent en un món  $w$ , que està  $R$ -conectat amb els móns  $w_1$ ,  $w_2$  i  $w_3$ . Suposem que una certa proposició bàsica  $p$  està continguda a  $w_2$  i  $w_3$ , però no a  $w_1$ . Així, aplicant la semàntica de Kripke, l'agent no creu  $p$  a  $w$ . Si el conjunt de móns pogués ser variable i no constant, es podria donar la següent situació: l'agent podria, e.g. com a resultat d'una observació feta al món real, adonar-se de que  $p$  és realment cert. Aquesta observació es podria afegir en tots els móns accessibles des de  $w$  (cosa que produiria una modificació a  $w_1$ , en aquest exemple), i ara l'agent (sempre via la semàntica de Kripke) passaria a creure  $p$  a  $w$ . Aquest senzill exemple mostra com una variabilitat en els continguts dels móns possibles podria modelitzar el canvi de creences produït en l'agent com a conseqüència d'una observació feta al seu entorn.

En la mateixa situació de l'exemple anterior ( $w_1$ ,  $w_2$  i  $w_3$  accessibles des de  $w$ ,  $p$  contingut als dos últims), imaginem que una certa proposició  $q$  està continguda a  $w_1$  però no a  $w_2$  i  $w_3$ . Així, en aquest punt l'agent no creuria ni  $p$  ni  $q$ . L'agent, en el curs d'un procés intern d'inferència, podria adonar-se de que  $q$  és clarament inaceptable (e.g. contradiu un subconjunt gran del reste de les creences). Per tant, podria concloure que els móns accessibles que continguin  $q$  no són alternatives viables al món actual, i que no han de continuar essent considerats accessibles. En aquest cas, això implicaria que la relació ( $w R w_1$ ) ja no es mantindria, i el conjunt d'alternatives doxàstiques de  $w$  ja només seria  $\{w_2, w_3\}$ . Aplicant la semàntica de Kripke, ara l'agent passaria a creure  $p$  en  $w$ , perquè  $p$  està contingut en aquests dos móns. En aquest exemple es veu com una modificació en la

# Intel·ligència artificial distribuïda

relació d'accesibilitat podria modelitzar el canvi de creences de l'agent com a conseqüència dels seus processos interns d'inferència.

Així, la segona proposta de la tesi és *modelitzar el procés d'investigació racional* (l'evolució gradual de les creences de l'agent en el temps) permetent *canvis tant en el conjunt de móns possibles  $W$  com en la relació d'accesibilitat  $R$*  (canvis que es traslladaran a les creences aplicant la semàntica de Kripke).

## 3 Anàlisi de les creences

El llenguatge usat per modelitzar les creences de l'agent és un subconjunt del llenguatge usat en les lògiques doxàstiques modals proposicionals clàssiques. De moment només permetem fòrmules proposicionals *standard* precedides per una seqüència (posiblement buida) d'operadors modals<sup>3</sup>. Un món es defineix com un conjunt arbitrari de fòrmules en aquest llenguatge. No hi han condicions sobre aquest conjunt, per tant pot ser tant *parcial* (molts fets del món actual probablement no estaran continguts en tots els móns) com *inconsistent* (encara que la inconsistència pot no ser gaire apparent, i estar amagada a la seva clausura deductiva). Aquesta caracterització dels móns possibles, com s'ha indicat abans, fa que desapareguin els problemes de l'omnisciència lògica i el raonament ideal. Les qüestions a adreçar en aquest punt són com analitzar aquestes creences (de caire tant sintàctic) i veure com evolucionen en el temps.

18

### 3.1 Anàlisi tri-dimensional

Proposem una anàlisi<sup>4</sup> de les creences de l'agent en tres direccions complementàries, que anomenarem *lògica*, *experimental* i *axiomàtica*. En la primera l'agent podrà fer deduccions sobre el seu conjunt de creences, utilitzant el mètode dels taulers analítics (amb certes modificacions); en la segona, l'agent realitzarà determinades observacions al món real (observacions sugerides per la dimensió lògica), i incorporarà el resultat d'aquestes observacions en els taulers analítics, fent-hi els canvis oportuns quan hi hagi algun tipus de discrepància entre els resultats lògics i els experimentals; finalment, en la dimensió axiomàtica l'agent compactarà el seu conjunt de creences, transformant-lo en un sistema axiomàtic (un conjunt d'axiomes i un conjunt de regles d'inferència). Degut a les limitacions d'espai d'aquest document, només donarem una visió global de l'anàlisi lògica<sup>5</sup>.

<sup>3</sup>Aquesta restricció sintàctica s'abandonarà en estats més avançats, on també es passarà a considerar el càcul de predicats.

<sup>4</sup>Aquest punt, que mostra l'estat actual de la tesi, serà més desenvolupat en la versió publicable d'aquest resum.

<sup>5</sup>A [MORE95] es poden trobar alguns detalls més tant de la vessant lògica com de l'experimental -allà anomenada *física*-.

# Intel·ligència artificial distribuïda

## 3.1.1 Anàlisi lògica

L'agent podrà realitzar deduccions sobre el seu conjunt de creences utilitzant una versió modificada del mètode clàssic dels *taulers analítics* ([BETH55], [SMUL68]). Un tauler es pot veure com la representació del conjunt de creences de l'agent en un cert món  $w$ . Via la semàntica de Kripke, sabem que aquest conjunt conté precisament aquelles fórmules certes a totes les alternatives doxàstiques a  $w$ ; per tant, el mateix tauler també es pot considerar com una descripció (parcial) de la classe de móns possibles accesibles des de  $w$ . Un tauler que conté el conjunt de fórmules  $\Delta$  representa una classe de móns, tots aquells móns que contenen les fórmules de  $\Delta$  (i posiblement d'altres).

La modificació principal que proposem al mètode dels taulers analítics és la prohibició d'afegir lliurement en un tauler qualsevol tautologia, amb una excepció: es poden afegir instàncies del *Principi del Tercer Exclòs* ( $p \vee \neg p$ ). Es prohibeix afegir les tautologies en els taulers perquè sino ja hauríem caigut un altre cop en l'omnisciència lògica. La introducció d'instàncies del PTE permet, d'una banda, que l'agent es pugui plantejar dubtes, que es pugui preguntar si creu  $p$  o  $\neg p$  (pot introduir el dubte en un tauler i generar dos subtaulers, un contenint  $p$ , l'altre  $\neg p$ , i explorar les dues alternatives); d'altra banda, les restriccions que posem al tipus d'instàncies del PTE afegibles als taulers ens permetran controlar el tipus de fórmules que podrà creure l'agent, la seva capacitat deductiva. Aquesta modificació apropa el nostre treball a la proposta de Hintikka en el seu *model interrogatiu de la investigació* ([HINT87], [HINT88], [HINT92]).

L'anàlisi lògica, via taulers, modelitza l'evolució de les creences de l'agent en el temps com a conseqüència dels resultats dels seus propis processos deductius interns. L'agent genera una seqüència de relacions d'accésibilitat ( $R_0, R_1, R_2, \dots$ ) que, a través de la semàntica de Kripke, es transforma en la seqüència de creences de l'agent en el temps. En [MORE95] es descriuen dues formes alternatives de generar les relacions d'accésibilitat, una purament sintàctica i l'altre (usant els taulers analítics) de caire semàntic.

La idea bàsica de la construcció de la seqüència de relacions d'accésibilitat és que cada aplicació de la regla de divisió representa la generació d'una nova relació d'accésibilitat (genera dos subtaulers, que representen subclasses de la classe de móns possibles representats pel tauler original). Més exactament, cada pas restringeix el conjunt de móns accessibles; això implica que el conjunt de creences pot créixer, com a resultat d'aquesta restricció. La decisió de quina proposició (disjuntiva) analitzar en cada pas és l'elecció d'una branca en l'arbre de possibles seqüències de relacions d'accésibilitat potencialment generables per l'agent a partir d'un cert tauler inicial.

# Inteligència artificial distribuïda

## References

- [BETH55] Beth, E.W., "Semantic entailment and formal derivability", from *Mededelingen van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Afdeling Letterkunde*, Vol. 18, no. 13, pp. 309-342, 1955.
- [DENN87] Dennett, D. C., "The intentional stance", MIT Press, 1987.
- [FAGI85] Fagin, R., Halpern, J., "Belief, awareness and limited reasoning", *Procs. of the Ninth IJCAI*, pp. 491-501, 1985.
- [FAGI95] Fagin, R., Halpern, J., Moses, Y., Vardi, M., "Reasoning about knowledge", MIT Press, 1995.
- [HALP92] Halpern, J., Moses Y., "A guide to completeness and complexity for modal logics of knowledge and belief", *Artificial Intelligence* 54, pp. 319-379, 1992.
- [HINT62] Hintikka, J., "Knowledge and belief", Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 1962.
- [HINT75] Hintikka, J., "Impossible possible worlds vindicated", *Journal of Philosophical Logic* 4, pp. 475-484, 1975.
- [HINT86] Hintikka, J., "Reasoning about knowledge in philosophy: the paradigm of epistemic logic", *Proceedings of the 1986 TARK Conference*, Ed. J.Y.Halpern, pp. 63-80, 1986.
- [HINT87] Hintikka, J., "Knowledge representation and the interrogative model of inquiry", International Philosophy Congress, pp. 1077-1084, 1987.
- [HINT88] Hintikka, J., "What is the logic of experimental inquiry?", *Synthese* 74, pp. 173-190, 1988.
- [HINT92] Hintikka, J., "The interrogative model of inquiry as a general theory of argumentation", *Communication and Cognition*, Vol. 25, Nos. 2-3, pp. 221-242, 1992.
- [KONO86] Konolige, K., "A Deduction Model of Belief", Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1986.
- [KRIP63] Kripke, S., "A semantical analysis of modal logic I: normal modal propositional calculi", *Zeitschrift für Mathematische Logik und Grundlagen Mathematik* 9, pp. 67-96, 1963.
- [LEVE84] Levesque, H.J., "A logic of implicit and explicit belief", *Proceedings of AAAI-84*, pp. 198-202, 1984.

# Inteligència artificial distribuïda

- [MONT70] Montague, R., "Universal grammar", *Theoria* 36, pp. 373-398, 1970.
- [MORE93] Moreno, A., "Qué hacer para no saberlo todo", Report de Treball LSI-93-15-T, LSI, UPC, 1993.
- [MORE95] Moreno, A., Sales, T., "Dynamic belief modeling", *Fourth International Colloquium on Cognitive Science*, Donostia, 1995. Una versió més avançada d'aquest article es pot trobar com a Report de Recerca LSI-95-28-R, LSI, UPC, 1995.
- [RANT75] Rantala, V., "Urn models: a new kind of non-standard model for first-order logic", *Journal of Philosophical Logic*, Vol. 4, pp. 455-474, 1975.
- [RESC79] Rescher, N., Brandom, R., "The logic of inconsistency", Rowman and Littlefield Eds., 1979.
- [SMUL68] Smullyan, R.M., "First-order logic", Springer Verlag, 1968.
- [VARD86] Vardi, M., "On epistemic logic and logical omniscience", *Proceedings of the 1986 TARK Conference*, Ed. J.Y.Halpern, pp. 293-305, 1986.
- [WOOL95] Wooldridge, M., Jennings, N., "Intelligent agents: theory and practice", *Knowledge Engineering Review* 10 (2), 1995 (també accesible en versió HTML a <http://www.doc.mmu.ac.uk/STAFF/mike/ker95/ker95-html.html>).

# Inteligència artificial distribuïda

## Un Algoritmo genético con control de los operadores para el problema de FLOW-SHOP

J. Bautista, R. Pastor

Departamento de Organización de Empresas  
E.T.S. Ingenieros Industriales de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña  
FAX: (93) 401.60.54 / E-Mail: Pator@oe.upc.es

### **Resumen**

Se presenta una aplicación de los Algoritmos Genéticos a un problema de organización industrial: el problema del Taller Mecánico tipo Flow-Shop. Los resultados obtenidos, se comparan con cuatro heurísticas clásicas de la literatura mejoradas con un procedimiento de intercambio tipo Raes.

**Palabras clave:** Algoritmos Genéticos; Taller Mecánico

**Clasificación AMS:** 65K99, 62P99

La Inteligencia Artificial (IA), lleva varios años estudiando procedimientos de búsqueda, que pueden aplicarse en la resolución de problemas de organización industrial, habitualmente abordados por la investigación operativa. Uno de estos procedimientos son los Algoritmos Genéticos (AG), y uno de estos problemas es el problema del Taller Mecánico.

El punto de partida para poder trabajar con un problema conocido como de Taller Mecánico, es disponer de un conjunto de N piezas (lotes, trabajos u órdenes) que deben realizarse en un grupo de M máquinas (secciones o puestos de trabajo). Para ser fabricada, cada pieza debe someterse a una serie de operaciones prefijadas, donde cada operación está asignada a una máquina concreta, tiene una duración conocida y está establecida la ruta de operaciones. Una vez realizada una ordenación de la secuencia de piezas a realizar, se puede obtener el valor de un criterio por el cual se mide la calidad de dicha solución frente a otras; normalmente las medidas habituales utilizan la media o el máximo de los instantes de salida, del retraso, del tiempo de permanencia, del nivel de stocks, etc.

Con todo lo anterior resolver un problema de Taller Mecánico se resume en establecer un programa, es decir, secuenciar una serie de piezas en las máquinas, hallando al mismo tiempo la temporización de las mismas, de forma que se optimice un cierto índice de eficacia.

Es necesario destacar que el problema es muy difícil de resolver, ya que, debido a su carácter combinatorio, es un problema NP-hard. A modo de ejemplo imaginemos que se desean secuenciar 15 piezas: debido a que cada posible permutación es una solución potencial, existirán  $15!$  (más de 1,3 billones) posibles soluciones.

El tipo concreto de Taller Mecánico que se ha estudiado ha sido el caso Flow-Shop, que se corresponde con un problema de Taller Mecánico, en el que desde el primer instante todas las piezas y máquinas están disponibles, y en el que además, el orden de "visita" de las N piezas a las M máquinas es el mismo: si para realizar la pieza 1 se debe procesar secuencialmente en las máquinas 4, 2, 3 y 1, todas las otras piezas deberán pasar por las máquinas en idéntico orden. El criterio de evaluación de las soluciones que se ha

# Inteligència artificial distribuïda

utilizado, es el de minimizar el tiempo de permanencia en el taller de la pieza que lo abandona en última posición ( $F_{\max}$ ).

Para la resolución del problema de Flow-Shop existen procedimientos exactos, como el Lomnicki y el Lomnicki pendular (Companys,93), que aunque aseguran la obtención del óptimo, pueden llegar a necesitar un tiempo de cálculo prohibitivo en problemas de dimensiones reales. También se han desarrollado en la literatura numerosas heurísticas, y de entre éstas, y para el presente proyecto, se han elegido cuatro que conducen a resultados muy aceptables sin necesitar cálculos importantes. Las heurísticas seleccionadas han sido la de Palmer, Companys, Gupta y Teixidó-1 (Companys,92), mejoras con un procedimiento de intercambio tipo Raes.

La técnica utilizada en la resolución del problema ha sido los AG, que son procedimientos de búsqueda que imitan los mecanismos de herencia, selección y evolución natural de las especies: se parte de una población inicial de seres, que por mecanismos de herencia y evolución, consiguen procrearse y obtener nuevas poblaciones de mejores cualidades, debido a la transmisión de las buenas características de los progenitores y a la desaparición de los elementos menos dotados.

El funcionamiento básico de los AG es el siguiente:

1. Generación de un conjunto inicial de soluciones del problema, llamado población inicial.
2. Valoración de la población de la generación  $t$ .
3. Selección de un grupo de soluciones de la población, llamadas "padres", que verán modificada su estructura.
4. Alteración del grupo de soluciones "padres" mediante los operadores genéticos de cruce y mutación, y constitución de un nuevo conjunto de soluciones descendientes, llamadas "hijas".
5. Cambio generacional: selección y sustitución de un grupo de soluciones generadoras, por un conjunto de generadas, en función de su "calidad".
6. Comprobación de condiciones de fin: si no se cumple una condición de fin, ir a paso 2 e  $t=t+1$ .

En el momento de decidir cuando se cruza y/o muta, muchos autores como Holland (Holland,92) y Chen (Chen,95), utilizan un procedimiento de gestión y control de los operadores genéticos, estático y predefinido de partida: ratio de cruce y ratio de mutación. La existencia de estas tasas constantes, provoca que las posibilidades de cruzar y/o de mutar, permanezcan invariables sea cual sea el estado de evolución de la población.

Una forma de acelerar la convergencia de los AG (que normalmente se consigue mediante cruces), a la vez que se explora un mayor número de regiones del espacio de soluciones, y por tanto, un mayor número de regiones entorno a óptimos locales (gracias en gran medida a las mutaciones), consiste en gestionar dinámicamente la aplicación de los operadores genéticos (Pastor,95). Esta gestión se basa en dos ideas básicas:

1. Si se alcanza un alto grado de homogeneidad en la población, es decir, si la población está compuesta por un conjunto de soluciones muy semejantes entre sí, conviene mutar en una proporción alta (lo que permite salir de esa región del espacio tan explotada) y cruzar en una baja proporción.
2. Si se alcanza un nivel bajo de homogeneidad, conviene cruzar en una proporción alta (lo que permite converger hacia los óptimos locales existentes en esas regiones del espacio) y mutar en una baja proporción.

El AG desarrollado incorpora un control dinámico de los operadores genéticos en función del índice de homogeneidad de la población, y mediante dos funciones que proporcionan la tasa de cruce y de mutación para cada valor de dicho índice:  $C(\text{homogeneidad})$  y  $H(\text{homogeneidad})$ .

# Inteligencia artificial distribuida

Como aplicación práctica, se presentan los resultados obtenidos de la confrontación trilateral de los siguientes procedimientos:

1. Un AG con control dinámico de los operadores genéticos (acrónimo G1).
2. Un AG con control estático de los operadores genéticos (acrónimo G2).
3. La mejor de las soluciones obtenidas mediante cuatro heurísticas clásicas de la literatura (Palmer, Companys, Gupta y Teixidó-1), mejoradas con un procedimiento de intercambio tipo Raes (acrónimo Heu).

A modo de ejemplo, en el Anexo 1 se muestran y comentan brevemente, los resultados obtenidos en una prueba computacional realizada sobre 625 problemas de Flow-Shop (25 problemas de 25 tipos, considerando como un tipo de problema una combinación del nº de piezas y nº de máquinas), con las siguientes características del AG: 500 generaciones, 20 soluciones en cada población, alteración del 100% de las soluciones "padres", sustitución del 50% de los generadores en cada cambio generacional, operador de cruce OX (Chen,95) y operador de mutación de intercambio posicional de dos piezas.

Las 13 columnas que componen la Tabla de resultados del Anexo 1, tienen el siguiente significado:

- C1 y C2: número de piezas y máquinas del problema.
- C3: número de veces que la solución G1 es mejor que la solución G2.
- C4: número de veces que la solución G1 es peor que la solución G2.
- C5: número de veces que la solución G1 es igual que la solución G2.
- C6: número de veces que la solución G1 es mejor que la solución Heu.
- C7: número de veces que la solución G1 es peor que la solución Heu.
- C8: número de veces que la solución G1 es igual que la solución Heu.
- C9: número de veces que la solución G2 es mejor que la solución Heu.
- C10: número de veces que la solución G2 es peor que la solución Heu.
- C11: número de veces que la solución G2 es igual que la solución Heu.
- C12: tiempo medio tardado en la resolución de un problema mediante G1.
- C13: tiempo medio tardado en la resolución de un problema mediante G2.

## Referencias

- CHEN C.L., et al. (1995), "An application of genetic algorithms for flow shop problems", *European Journal of Operational Research*, n. 80, pp. 389-396.  
COMPANYS, R. (1992), *Problemas de Taller Mecánico*. CPDA-ETSEIB.  
COMPANYS, R. (1993), *Notas sobre el problema de Taller Mecánico*. Documento Interno de Trabajo. DOE-ETSEIB.  
HOLLAND, J. (1992), "Genetic algorithms", *Scientific American*, n. July, pp. 44-50.  
PASTOR, R. (1995), *Aplicación de los algoritmos genéticos al problema del Taller Mecánico*, PFM, ETSEIB-UPC.

## Anexo1

Como puede comprobarse con los resultados obtenidos, cambiar dinámicamente las tasas de los operadores genéticos en función del grado de homogeneidad de las soluciones de una población, permite alcanzar resultados mucho mejores que los obtenidos utilizando unas tasas constantes.

# Intel·ligència artificial distribuïda

## ANEXO 1

Nº Pieza	Nº Máqu.	$\Sigma$ Mejor G1/G2	$\Sigma$ Peor G1/G2	$\Sigma$ Igual G1/G2	$\Sigma$ Mejor G1/Heu	$\Sigma$ Peor G1/Heu	$\Sigma$ Igual G1/Heu	$\Sigma$ Mejor G2/Heu	$\Sigma$ Peor G2/Heu	$\Sigma$ Igual G2/Heu	Tiempo med G1	Tiempo med G2
7	4	14	0	11	8	0	17	4	10	11	20	19
7	5	15	0	10	4	0	21	4	14	7	22	20
7	8	16	0	9	12	1	12	6	13	6	30	27
7	10	20	0	5	13	0	12	4	15	6	35	30
7	15	20	0	5	17	0	8	7	15	3	43	39
10	4	22	0	3	9	1	15	2	20	3	26	25
10	5	19	1	5	17	2	6	5	14	6	33	29
10	8	23	0	2	17	1	7	4	17	4	44	37
10	10	24	0	1	14	4	7	2	20	3	49	41
10	15	24	0	1	19	3	3	10	15	0	62	54
15	4	22	0	3	9	4	12	3	19	3	40	37
15	5	25	0	0	13	5	7	1	23	1	44	42
15	8	24	0	1	15	7	3	1	24	0	67	54
15	10	24	1	0	17	6	2	4	19	2	75	61
15	15	24	0	1	17	6	2	3	20	2	94	81
25	4	24	0	1	6	4	15	1	23	1	59	65
25	5	25	0	0	9	11	5	0	25	0	91	73
25	8	25	0	0	13	12	0	1	24	0	124	92
25	10	23	1	1	9	15	1	2	22	1	137	106
25	15	25	0	0	13	12	0	2	23	0	170	138
50	4	23	0	2	4	12	9	0	23	2	217	153
50	5	25	0	0	7	13	5	0	24	1	262	177
50	8	25	0	0	8	15	2	1	24	0	326	217
50	10	25	0	0	10	15	0	0	25	0	353	243
50	15	24	1	0	7	18	0	0	25	0	420	309

Por otro lado, la utilización del G1 permite obtener resultados bastante satisfactorios frente a las heurísticas de estudio, aunque a medida que crece la dificultad del problema estos van siendo peores, y además el tiempo de cálculo aumenta considerablemente. El procedimiento G2 no aporta buenos resultados aunque el tiempo de cálculo es menor que G1.

# XARXES NEURONALS

Vicente Ruiz de Angulo  
Hugo Zaragoza Ballester  
Gordon Wells

# Xarxes Neuronals

## Interferencia catastrófica en redes neuronales: soluciones y relación con otros problemas del conexiónismo

Vicente Ruiz de Angulo

Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials  
de Barcelona  
Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona  
Fax: +34 3 5809661 e-mail: ruiz@ic.upc.es

BUTLLETÍ DE LA CIÈNCIA

### ***Introducción***

En esta tesis se trata principalmente con la familia de arquitecturas "feedforward", es decir, aquellas que no contienen ciclos en su grafo de conexiones. No obstante, muchas de las conclusiones pueden extenderse a casos más generales.

El problema central de la tesis es la interferencia catastrófica en el contexto del aprendizaje supervisado. Consiste básicamente en la dificultad de las arquitecturas y algoritmos clásicos tipo retropropagación para retener la información ya memorizada cuando se introducen en la red nuevas asociaciones (o "patterns") de entrada-salida.

Los algoritmos clásicos requieren la presentación reiterada de todos los patrones componentes del conjunto de aprendizaje un gran número de veces, para reducir progresivamente la función de coste que evalúa el error global del conjunto. Si en algún momento se presenta repetidamente un solo patrón con el objetivo de aprenderlo rápidamente, como efecto lateral se obtiene una degradación (que puede ser catastrófica) del nivel de aprendizaje de las asociaciones introducidas previamente. Ejemplos de estos problemas y algunas tentativas de paliarlo se pueden encontrar en (Ratcliff, 1990; McCloskey y N.J. Cohen, 1989; R.M. French, 1991)

### ***Algoritmo de aprendizaje con degradación mínima***

La primera parte de la tesis trata del problema de cómo introducir un nuevo patrón intentando preservar la información almacenada, fijada una arquitectura y unos pesos que codifican un determinado conjunto de aprendizaje. Existen esencialmente dos tipos de redes feedforward: las basadas en neuronas (o unidades) locales y las basadas en unidades euclídeas. Una unidad local (llamada también RBF) halla su activación en función de la distancia entre el vector de activaciones de las unidades que le envían señal y el vector de pesos de las conexiones que le unen a estas unidades. En cambio, las unidades euclídeas hallan su activación en función del producto de los dos vectores citados. Las redes basadas en unidades locales no sufren tanto el problema de interferencia, pero a cambio tienen problemas para generalizar fuera del conjunto de aprendizaje cuando contiene un número muy limitado de ejemplos. Para las redes de unidades euclídeas, los trabajos que tratan el tema son escasos y de resultados muy insatisfactorios.

La tesis parte de una formalización rigurosa del problema y estudia las limitaciones a priori para la resolución del mismo en diferentes contextos. El siguiente paso es el desarrollo de un algoritmo que permite la resolución del problema, dada una determinada modelización del error, que constituye una aproximación apropiada del problema de interferencia. Este algoritmo es válido tanto para redes que

# Xarxes Neuronals

contengan unidades locales como para las de unidades euclídeas estándar tipo sigmoide, sugiriendo esquemas mixtos que combinan memoria a corto plazo y a largo plazo. Se pueden encontrar más detalles del algoritmo en (Ruiz de Angulo y Torras, 1991; 1995)

## Estudio del ruido en los pesos

La segunda parte de la tesis es complementaria de la primera. Trata del problema de cómo almacenar un conjunto de aprendizaje en una arquitectura fija, de modo que la retención sea máxima cuando posteriormente se introduzca nueva información. La formalización del problema demuestra las similitudes con el problema de "fault-tolerance", con lo que todas las conclusiones y soluciones halladas serán directamente aplicables en este campo.

El análisis matemático del problema indica que su solución viene dada por la introducción de ruido en los pesos durante el aprendizaje (método cuya ineficacia crece exponencialmente con el tamaño de la red). Esta solución se demuestra idéntica a la minimización de la función de coste original regularizada (lo que establece también fuertes lazos con la cuestión de la generalización). Esta última equivalencia nos permite encontrar un algoritmo de resolución determinista y eficaz (V. Ruiz de Angulo y C. Torras, 1994).

Para la evaluación de algunos de sus resultados, el desarrollo de la tesis conlleva además el desarrollo de métodos objetivos de medida de la dificultad de alcanzar un cierto nivel de error, partiendo desde diferentes puntos del espacio de pesos. Estos métodos demuestran tener aplicaciones más generales de aquélla para la que fueron diseñados, que merecen la pena ser exploradas.

30

En el curso de este trabajo hemos obtenido otros resultados colaterales no relacionados directamente con el tema central de la tesis. Al haber tenido siempre en cuenta que la generalización no fuera perjudicada intentando evitar la interferencia catastrófica, hemos obtenido todo lo contrario: métodos basados en el principio de "Minimum Description Length" para mejorar la generalización. El estudio del ruido en los pesos es aplicable al ruido en las entradas, con beneficio también para la generalización, e incluso al tratamiento de la falta ocasional de los valores de algunos componentes en los datos. Otra aplicación directa de los algoritmos elaborados para la minimización de las perturbaciones en los pesos, esta en la mejora de la resistencia a fallos y a la cuantización de los elementos de la red.

## Bibliografía

- R. RATCLIFF(1990), "Connectionist models of recognition memory: constraints imposed by learning and forgetting functions". *Psychological Review*, Vol. 97, No. 2, pp. 235-308, 1990.
- M. McCLOSKEY & N.J. COHEN(1989), "Catastrophic interference in connectionist networks: The sequential learning problem", in G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, New York : Academic Press.
- R. M. FRENCH(1991), "Using semi-distributed representations to overcome catastrophic forgetting in connectionist networks", CRCC Technical Report 51-1991, Center for Research on Concepts and Cognition, Indiana University.
- V. RUIZ DE ANGULO, C. TORRAS (1991), "The MDL Algorithm", Proceedings of the IWANN'91, edited by A. Prieto, Lecture Notes on Computer Science No. 540 pp. 162-172. Springer Verlag.
- V. RUIZ DE ANGULO, C. TORRAS (1995), "On-line learning with minimal degradation in feed-forward networks", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol 6, pp. 657-668, May 1995.
- V. RUIZ DE ANGULO, C. AND TORRAS, (1994), "Random Weights and Regularization", In the proceedings of the ICANN'94. Springer-Verlag, 1994.

# Xarxes Neuronals

## Aproximació de Funcions i Regularització amb Xarxes Neuronals.

Hugo Zaragoza Ballester,

LAFORIA, Univ. Paris 6, 4 place Jussieu,  
F-75232 Paris cedex 05, (France)  
zaragoza@laforia.ibp.fr

### 1. Introducció

L'utilització de xarxes neuronals per a tasques de classificació i predició és àmplia i prou coneguda per la comunitat d'IA. Menys coneguda, però, és la seva utilització com a eina d'interpolació i regressió. Ambdues utilitzacions palesen la mateixa problemàtica respecte al aprenentatge i a la capacitat de generalització; la naturalesa diferent de les aplicacions; però, permet noves possibilitats d'experimentació. La resolució d'un problema de càlcul radioactiu real amb xarxes neuronals ens ha permés un estudi pràctic paral·lel a l'estudi teòric que, sobre regularització i complexitat, porta a terme aquest equip. Presentem aquí una introducció al tema i alguns resultats demonstratius obtinguts sobre l'aplicació esmentada.

### 1. Introduction

The use of neural networks for classification and prediction tasks is broad and well known by the AI community. Less well known is its use as an approximation and regression tool. Classification and approximation present similar problems for learning and generalization. Nevertheless, the different natures of the two domains of application allow for new possibilities of experimentation. The resolution of a real world problem in a radioactive calculation chain by neural networks has allowed us a practical study parallel to the theoretical investigations carried out by this group on regularization and complexity. We present here an introduction to the topic and some illustrative results obtained in the above-mentioned application.

### 2. Aproximació de funcions amb xarxes neuronals.

Una xarxa neuronal artificial és un conjunt d'unitats anomenades cèl·lules, connectades les unes amb les altres mitjançant lligams de diferent força de connexió o "pes". Utilitzarem aquí una configuració de xarxa anomenada Perceptron multi-capes o PMC (Rumelhart *et al.* 1986). Les cèl·lules d'un PMC estan ordenades en capes i cada cèl·lula està connectada només amb les cèl·lules de la capa immediatament posterior. La primera i darrera capa s'anomenen capa d'entrada i de sortida respectivament i les capes interiors, capes ocultes. Les cèl·lules reben com a entrada un vector  $\mathbf{x}$  i produeixen una sortida real,  $y = g(\mathbf{x}^T \mathbf{w} + \theta)$ . Els components del vector  $\mathbf{w}$  son en aquest cas els pesos dels lligams d'entrada de la cèl·lula i  $\theta$  el seu biaix. La funció de transfer  $g(x)$  que caracteritza les cèl·lules pot variar; les més comunes son la funció sigmoide o la tangent hiperbòlica.

La necessitat de construir models d'interpolació o de regressió per a estimar o predir el comportament d'un sistema és molt comú. Generalment disposem d'una sèrie de mesures obtingudes per observació però no d'un model analític adient. Anomenem  $\mathbf{X}$  el conjunt de vectors  $\mathbf{x}_i$  de condicions de mesurament (variables en el cas de funcions; descripcions en problemes de classificació) i  $\mathbf{Y}$  el conjunt de vectors desit-

# Xarxes Neuronals

jats de sortida  $y_i$ . Per composició de les funcions locals de cada cèl·lula podem construir una funció global de la xarxa, que anomenem  $G(\mathbf{x})$  (el vector  $\mathbf{x}$  sense cap index representa qualsevol vector de  $R^n$ ). Per a una arquitectura de xarxa fixa i un determinat conjunt d'entrada i de sortida, la funció  $G(\mathbf{x})$  dependrà exclusivament de la distribució dels pesos  $W$ .

En problemes de classificació voldriem que la xarxa, donat un vector d'entrada que descrigui un objecte, sorti un vector que indiqui la classe a la que pertany aquest objecte. "Aprendre", sota aquest formalisme, és equivalent a trobar una distribució de pesos  $W$  que constitueixi una funció de pertinença  $G(\mathbf{x})$  tal que  $G(\mathbf{x}_i) = y_i$ . En problemes d'aproximació, els vectors d'entrada son les variables de la funció aproximada i el vectors de sortida desitjats son els valors coneguts d'aquesta funció al punt  $\mathbf{x}$  de dimensió igual al nombre de cèl·lules d'entrada. Normalment disposem d'una sola cèl·lula de sortida,  $y = G(\mathbf{x})$ . "Aprendre" per a una xarxa d'interpolació suposa trobar una distribució de pesos  $W$  tel que  $y_i = f(\mathbf{x}_i)$ , on  $f(\mathbf{x})$  és la funció que desitjem aproximar.

L'error quadràtic del conjunt d'aprenentatge,  $C = 1/N \sum_i (y_i - G(\mathbf{x}_i))^2$ , és una de les possibles mesures de qualitat d'una xarxa. Ha estat demonstrat que els PMC son classificadors universals; amb un número suficientment gran i finit de cèl·lules ocultes, qualsevol funció  $X \rightarrow Y$  pot ser apresa amb un error quadràtic tan petit com es vulgui. Allò de més interessant del sistemes d'aprenentatge no és, però, la seva capacitat d'aprendre exemples, sino la seva capacitat de generalitzar a partir d'aquests exemples. La mesura d'error definida anteriorment no dona cap mesura de capacitat de generalització. L'error quadràtic real entre una funció interpolada i un model d'interpolació es pot expressar com la esperança  $E[(y - f(\mathbf{x}))^2 | \mathbf{x}]$  calculada sobre tots els vectors  $\mathbf{x}$  possibles. Aquest error no es pot calcular normalment (de la funció  $f(\mathbf{x})$  només coneixem alguns exemples). Per a aproximar l'error quadràtic real calculem l'error quadràtic d'un conjunt d'exemples independents del conjunt d'aprenentatge anomenat conjunt de test o de verificació.

32

Inicialment una xarxa té una distribució de pesos aleatòria, amb un error quadràtic alt. A mesura que ensenyem una xarxa els exemples del conjunt d'aprenentatge, tant l'error quadràtic d'aprenentatge com el de generalització disminueixen. L'error d'aprenentatge es la funció de cost que minimitza l'aprenentatge i continuarà, doncs, disminuint fins que aquest acabi. L'error de generalització, però, començarà a créixer possiblement després d'un cert temps d'aprenentatge, degut al sobre-aprenentatge de les característiques particulars del conjunt d'aprenentatge. Intuitivament ens adonem que un model d'interpolació massa simple, val a dir una xarxa amb poques cèl·lules ocultes, serà insuficient per a aproximar adequadament els diferents exemples del conjunt d'aprenentatge i produirà com a interpolació una simplificació de la funció. Un model massa complexe apprendrà excessivament de les idiosincrasies de les dades particulars utilitzades per a la construcció de l'interpolació i en perdrà capacitat de generalització. Finalment notem que una simplificació de la funció pot donar un error de generalització inferior a l'error de generalització més complex, tot i mostrar un error d'aprenentatge molt superior.

La complexitat d'una xarxa està en relació amb el seu nombre de paràmetres lliures, els pesos. Una xarxa petita tindrà pocs paràmetres de llibertat i constituirà així un model amb una relació entre error d'aprenentatge i error de test poc dependent de les dades; constituirà un model d'interpolació biaixat. Tradicionalment es considera per analogia amb els sistemes d'aprenentatge paramètrics que, a mesura que la xarxa augmenta de tamany, augmenta també el component de variança de l'error de test i disminueix el biaix. La relació entre tamany i complexitat dels models no-paramètrics és, però, molt difícil de determinar i constitueix un dels temes centrals de la recerca fonamental en xarxes neuronals.

## 3. Regularització i altres tècniques de reducció de complexitat

Intuitivament desitjem construir xarxes amb el mínim nombre de paràmetres lliures possible per a conseguir una millor capacitat de generalització. El terme "regularització" inclou vagament tots els mètodes que introduceixen restriccions d'aprenentatge per a reduir el tamany d'una xarxa.

# Xarxes Neuronals

Generalment això consisteix a minimitzar al llarg de l'aprenentatge una funció de cost de tipus  $Q = Q_1 + \lambda Q_2$ , on  $Q_1$  és la funció de cost d'aproximació (quadràtic, per exemple) i  $Q_2$  una restricció adicional sobre la solució desitjada. El factor  $\lambda$  pondera la limitació de complexitat introduïda per  $Q_2$  en relació amb la qualitat de l'aproximació definida per  $Q_1$ .

Existeixen nombroses proposicions per a  $Q_2$ , com per exemple:

$$Q_2 = \sum_i (w_i/c)^2 (1+w_i^2/c^2)^{-1}$$

Aquesta restricció estableix una frontera entre pesos "febles" i "forts", i elimina els pesos febles forçant el seu valor mitjà a 0. Les tècniques més avançades de regularització defineixen restriccions diferents per a diferents grups de pesos, imposant una distribució de probabilitat característica a cada grup. Si anomenem  $P_i$  la probabilitat *a priori* per grup  $i$  de pesos, i  $p(w|i)$  la probabilitat condicional de  $w$  dins del grup  $i$ , la minimització de funció:

$$Q_2 = -\sum_j \log \sum_i P_i p(w_j|i)$$

forçarà els pesos al llarg de l'aprenentatge per que aquests es configuri segons la barreja de densitat de probabilitats. El problema d'aquest mètode i de mètodes similars és la seva sensibilitat als nombrosos paràmetres introduits per la regularització (distribucions de pesos i de probabilitats, constants  $c$  i  $\lambda$ , etc.). La teoria bayesiana permet certes optimitzacions d'aquests paràmetres. A la pràctica, però, esdevé necessari utilitzar regles heurístiques i molta experimentació (Weigend *et al.* 91).

Una altra tècnica de reducció de xarxes és la poda d'enllaços. La xarxa s'entrena normalment (sense regularització) i, un cop l'aprenentatge finalitzat, es prova d'eliminar directament els enllaços menys significatius. Per fer això cal mesurar l'influència que el canvi d'un pes comporta en l'error d'aprenentatge, calculant la matriu d'Hessian, característica de derivades parcials del pesos respecte a la funció de cost. Aquesta matriu resulta molt costosa de calcular per a xarxes de gran tamany i és normalment aproximada. Comentarem aquí només el mètode *Optimal Cell Damage*, (Cibas *et al.* 94) derivat d'un del primers i més ben coneixuts mètodes de poda d'enllaços *Optimal Brain Damage*, (LeCun *et al.* 90). OCD és un mètode concebut pel nostre equip i aplicat amb èxit a problemes tant de classificació com de predició de sèries temporals i d'aproximació de funcions. Si assumim que la xarxa tractada es troba en un mínim local de la funció de cost (és a dir, que el seu aprenentatge és finalitzat), que aquest mínim és localment quadràtic i que la matriu d'Hessian de la funció respecte als pesos és diagonal (i per tant, la degradació de la xarxa depen individualment de cada pes modificat) podem mesurar la *saliency*  $s_i$  d'una cèl·lula com:

$$s_i = 1/2 \sum_j w_{ji}^2 (d^2 C / dw_{ji}^2)$$

Quan l'aprenentatge arriba a la seva fi, les *saliencies* de les cèl·lules d'entrada es podran calcular per a eliminar aquelles més débils (descartant així les variables menys relevantes de la funció interpolada). La nova xarxa reduïda podrà, aleshores, re-aprendre els exemples. L'error d'aprenentatge augmentarà lleugerament, però l'error de generalització posiblement disminueixi. Aquest process pot repetir-se mentre es detecti una millora de generalització.

## 4. Un Problema Real

Malgrat l'interès que han desvetllat les possibilitats de càlcul de les xarxes neuronals, existeixen enguany molt poques aplicacions reals on aquesta tècnica s'utilitzi amb èxit. L'estudi de tècniques de regularització ha estat encadrat, en aquest estudi, amb un objectiu pràctic concret: la millora d'un sistema comercial de modelització de càlcul radiactiu en columnes de gas. Per aquest càlcul existeix un mètode analític exacte anomenat *Line by Line*, LBL, que requereix massa temps de càlcul per poder uti-

# Xarxes Neuronals

litzar-ho interactivament. El nostre objectiu ha estat la creació d'un model d'interpolació que simuli el comportament del sistema LBL.

Les dades d'aquests problemes son una sèrie de columnes de gas dividides en segments de temperatura i pressió constant. Mitjançant una sèrie de transformacions i simplificacions físiques proposades pel model de càlcul radioactiu simplificat CKFG podem arribar a calcular una aproximació de la luminositat d'una columna per l'integració d'una sèrie de coeficients de transmitivitat relativa,  $k^*$ , dependents de la presió i de la temperatura dels segments. Aquesta dependència, però, té una forma analítica extremadament complexa. Per a construir un model d'aproximació disposem d'una sèrie de punts i de set paràmetres ( $t, t^{-1}, g^{-1} = p^2/t, g^{-2}, \ln(g), 1/\tan^2(g)$ ) de pressió i temperatura continguts à la funció analítica. La Figura 1 mostra els valors  $k^*$  d'una columna típica (representats per cercles) i una possible superfície d'interpolació.

Les Figures 2 i 3 mostren els resultats, en valors de luminositat i en error absolut, obtinguts pel mètode LBL i per tres models de xarxes CKFG. Per als càlculs de luminositat presentats a la Figura 2 hem utilitzat una columna de gas que conté els mateixos segments utilitzats per a l'aprenentatge de les xarxes; l'error observat és comparable amb la mesura d'error d'aprenentatge discutida anteriorment. La Figura 3 presenta els mateixos resultats sobre una columna de test; com sabem que l'exactitud del model LBL es independent de la columna, l'error de calcul observat per una xarxa és comparable a la seva mesura d'error de test i ens permet, doncs, estudiar la capacitat de generalització.

NN1 és un PMC amb set cèl·lules d'entrada (els set paràmetres proposats inicialment) i 35 cèl·lules ocultes, entrenat fins a obtenir un error quadràtic d'aprenentatge negligible. Aquest sistema calcula exactament la luminositat de la columna de construcció (Figura 2b) però té un fort error de generalització (Figura 3b). NN2 és una xarxa semblant a NN1 amb només 10 cèl·lules ocultes. Aquesta xarxa es mostra molt pitjor en el càlcul de luminositat de la columna de construcció però té un comportament lleugerament superior a NN1 en verificació. NN3 és la xarxa NN2 després de aplicar-hi el mètode de reducció de variables OCD eliminant una cèl·lula d'entrada a cada iteració de poda. El número de cèl·lules d'entrada ha estat reduït a 4 i la xarxa ha guanyat sobtosament en capacitat de generalització, reduint el temps de càlcul i d'aprenentatge. Finalment NN4 és un model de tipus NN1 al que hem introduït durant l'aprenentatge un terme regulador que força cap a 0 els pesos, eliminant així pesos (i cèl·lules, quan tots els seus pesos d'entrada o de sortida són 0). El tamany de la xarxa ha estat reduït un 40% i el resultat és una xarxa amb un bon error quadràtic d'aprenentatge i una bona generalització.

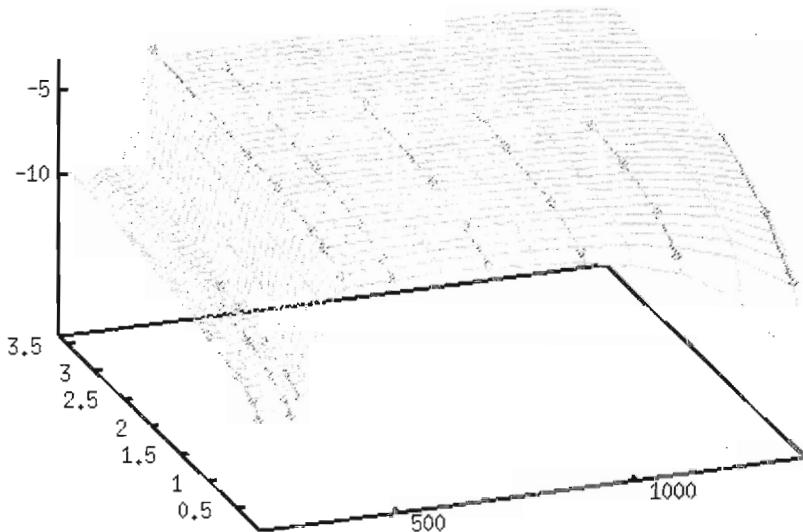
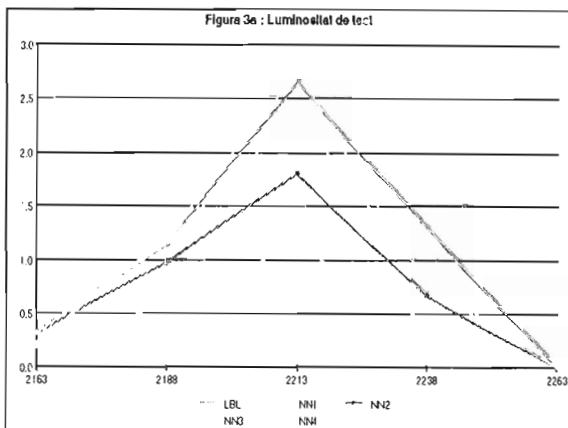
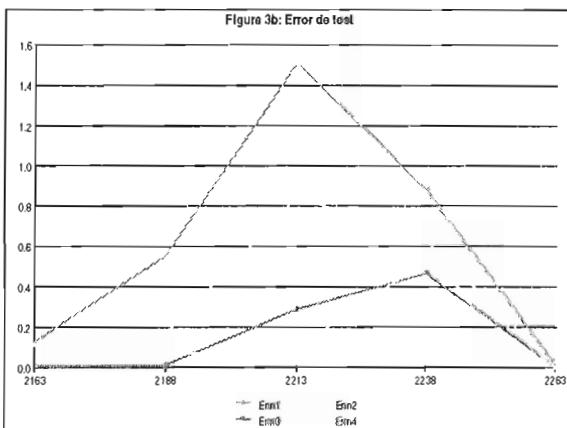
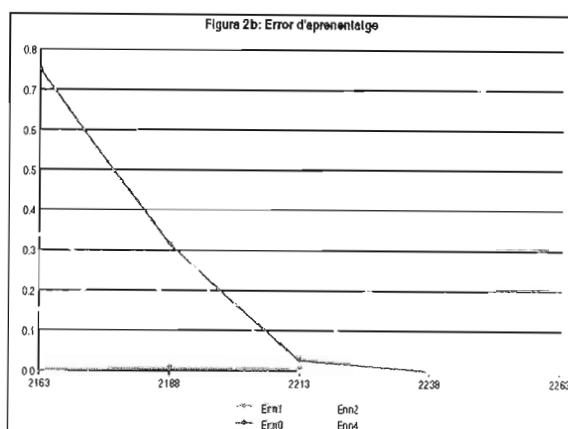
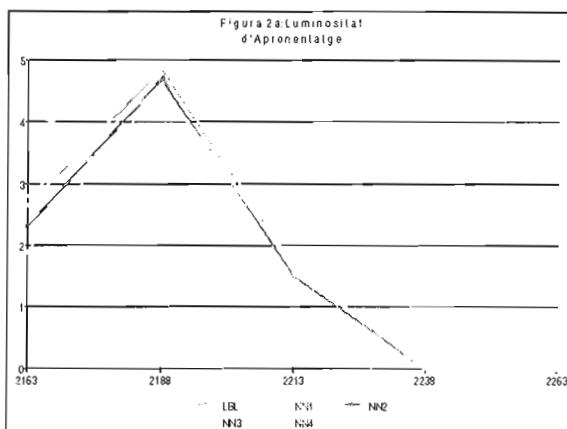


Figura 1: Punts d'aprenentatge (cercles) i una possible superfície d'interpolació.

# Xarxes Neuronals



## 5. References:

- CIBAS T., SOULIÉ F.F., GALLINARI P., RAUDYS S., (1994). Variable Selection with Optimal Brain Damage. In *International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN'94)*, Proceedings, M. Marinaro, P.G. Morasso eds., vol I, 1464-1469. Springer-Verlag.
- LE CUN Y., DENKER J.S., S.A. SOLLA (1990). Optimal Brain Damage. In *Neural Information Processing Systems (NIPS'89)*, D. Touretzky ed., vol II, 598-605. Morgan Kaufmann.
- RUMELHART D.E., HINTON G.E., WILLIAMS R.J., (1986). Learning Internal Representations by error propagation. In *Parallel Distributed Processing*, vol 1, chap. 8. MIT Press.
- WEIGEND A.S., RUMELHART D.E., HUBERMAN B.A., (1991). Generalization by weight elimination with application to forecasting. In *Neural Information Processing Systems (NIPS'90)*, R.P. Lippmann, J.E. Moody, D.S. Touretzky eds., vol. III, 875-882, (1991). Morgan Kaufmann.



## Posicionamiento visual de robots mediante redes neuronales y descriptores globales de la imagen

Gordon Wells

### 1 Introducción

Desde hace muchos años, uno de los principales objetivos en el campo de la robótica ha sido dotar los robots con unas capacidades de control más sofisticadas mediante el uso de retroalimentación visual. En teoría, un robot con visión sería capaz de aproximarse, seguir, y aprehender objetos desconocidos en lugares arbitrarios, ensamblar piezas y evitar obstáculos imprevistos, incluso a pesar de tener deformaciones y descalibraciones en su estructura mecánica. El sistema ideal puede imaginarse como aquel que sirva para manipular objetos arbitrarios en entornos reales, sin necesidad de modelar el objeto, el entorno, ni la cámara, que no requiera calibración, y que pueda seguir objetos móviles en tiempo real.

En la actualidad, el estado de la tecnología parece todavía lejos de conseguir estos objetivos. A pesar del volumen creciente de trabajos publicados presentando métodos y sistemas de control visual, en general la sofisticación de la mayoría de ellos sigue sin evolucionar más allá del problema "de laboratorio": para objetos y entornos simplificados e invariables. Los pocos sistemas industriales existentes también son para tareas repetitivas en entornos simplificados, como la soldadura de metales y la aplicación lineal de silicona, aunque existen algunos sistemas comerciales para aprehensión de piezas idénticas de cajones ("bin-picking").

Una de las razones principales de las limitaciones de muchos sistemas de control visual es el uso persistente de técnicas de visión muy simples y poco robustas. Típicamente, se emplean como características de la imagen unos cuantos puntos, líneas, u otros componentes geométricos del objeto, cuya extracción no suele ser fiable y depende en gran medida de la forma del objeto. Para traducir estas características en movimientos del robot, suele ser necesario tener un modelo del objeto y de la cámara, y buscar la correspondencia entre las características de dos imágenes a fin de estimar las coordenadas relativas del robot y el objeto. Incluso los sistemas comerciales de "bin-picking" se basan en este tipo de procesado de la imagen, limitando así su aplicabilidad a objetos con determinadas características geométricas.

En el presente trabajo se describe un método de posicionamiento visual basado en el aprendizaje y en los descriptores globales de la imagen, con el cual se pretende superar algunas de estas limitaciones y hacer un avance importante hacia el uso del posicionamiento visual de robots en entornos reales.

### 2 El posicionamiento visual de robots

El objetivo fundamental de equipar a los robots con sistemas visuales es conseguir una posición y orientación deseadas del elemento terminal del robot con respecto a uno o más objetos o marcas observadas en la imagen, con el fin de inspeccionarlos, cogerlos o manipularlos, o bien, en el caso de los robots móviles, ayudar a la navegación del robot por su entorno.

Si el objeto es estacionario, la tarea consiste en el posicionamiento estático. Para los objetos en movimiento, es necesario realizar un seguimiento dinámico del objeto a modo de interceptarlo o conseguir una posición relativa estable previa a su manipulación.

# **Redes neuronales**

Para generar la señal de control del robot, generalmente se realiza un procesado de la imagen observada para extraer algunas características importantes, tales como el centroide del objeto al que se quiere aproximar el manipulador. Estas características se comparan con las que se obtendrían con el robot en la posición deseada para generar una señal de error, la cual se utiliza en una ley de control para mover el robot.

El control visual se ha estudiado extensamente para los manipuladores industriales. Un resumen muy completo de la bibliografía puede encontrarse en [1]. Aunque, en muchos casos, se busca el control de seis grados de libertad, el control de sólo dos o tres grados de libertad es a veces suficiente para algunas aplicaciones, y puede simplificar en gran medida el diseño del controlador. El control visual también se ha aplicado a la navegación de los robots móviles.

## **3 Método basado en redes neuronales y descriptores globales de la imagen**

En colaboración con la empresa Thomson Broadcast Systems (Rennes, Francia), se está desarrollando un todo de posicionamiento visual de robots basado en descriptores globales de la imagen, junto con el aprendizaje mediante redes neuronales. Estos trabajos se han descrito en detalle en Venaille et. al [3] y Wells et al [4]. Dicha empresa propone el uso del posicionamiento visual para una aplicación de inspección industrial automatizada, en la que se requiere colocar una cámara de inspección en una posición y orientación pre-especificadas con respecto a distintos objetos estáticos cuya situación es desconocida y variable. La cámara está montada en la pinza de un brazo articulado industrial "GT Productique" de seis ejes. Los objetos empleados son diferentes componentes o piezas de productos industriales comunes, tales como culatas de motores de automóvil, válvulas de agua, placas electrónicas, y otros. El sistema de posicionamiento es capaz, mediante las desviaciones observadas en la imagen de la cámara, de colocar la cámara siempre en la misma situación relativa a un objeto dado para su inspección posterior, independientemente de la situación inicial del objeto dentro de un espacio acotado.

El uso de descriptores globales permite, por un lado, evitar la extracción de características geométricas (locales) de la imagen, y por el otro, no tener que buscar la correspondencia entre las características en la imagen observada y la deseada. De este modo, y a diferencia de los métodos existentes, el método puede aplicarse a imágenes complejas de escenas reales, para las cuales las técnicas de extracción y correspondencia de características geométricas no pueden aplicarse o son poco fiables.

Si bien, para muchas características de tipo geométrico, es posible encontrar la relación analítica entre sus coordenadas proyectadas en la imagen y sus coordenadas 3D, en el caso de descriptores globales esto puede ser muy difícil, si no imposible. En el presente trabajo se han utilizado como descriptores globales de la imagen los descriptores de Fourier y los momentos geométricos. Los primeros caracterizan el contenido frecuencial del contorno del objeto observado, y los segundos cuantifican los niveles de gris de los pixels de toda la imagen. En ambos casos, los valores de los descriptores dependen de un modo complejo de la forma y las propiedades reflectivas de los objetos observados.

Debido a su capacidad de aproximar funciones no lineales complejas, las redes neuronales tipo "feedforward" son muy adecuadas para aprender, a partir de ejemplos, la función que relaciona las variaciones observadas en los descriptores de la imagen, con respecto a los de una imagen de referencia, con los movimientos del robot desde la posición deseada hasta la posición donde se tomó cada imagen con una cámara fijada en el elemento terminal. Esto es posible sin necesidad de modelar el entorno ni de calcular transformaciones intermedias, tales como la situación de los objetos, la relación entre la cámara y el robot y el modelo proyectivo de la cámara. Asimismo, no es necesario que la cámara ni el robot estén calibrados, ya que la red neuronal aprende a relacionar sus propios movimientos con las imágenes observadas en cada posición. Teniendo esta función, una tarea de posicionamiento consiste en medir las diferencias entre la imagen observada y la imagen correspondiente a una posición deseada, y generar directamente el comando de movimiento para llevar el robot a esta posición. La ventaja fundamental asociada a esta capacidad de aprendizaje es la generalidad del método y su aplicabilidad a diversos robots y entornos.

# Xarxes neuronals

Se entrena la red mediante un conjunto de imágenes muestreadas en el espacio de trabajo del robot en las cercanías de una posición deseada, dando como entradas a la red las diferencias entre los descriptores de la imagen observada y la imagen deseada, y como salidas los seis coordenadas del robot relativas a la posición deseada. Una vez entrenada, mediante una regla de aprendizaje como el de "retropropagación", la red es capaz de estimar las coordenadas relativas de imágenes arbitrarias del mismo objeto, que pueden usarse para mover el robot a la posición deseada.

## 4 Resultados experimentales

En la Figura 1, se dan los errores finales de posicionamiento con respecto a dos objetos, utilizando descriptores de Fourier y momentos geométricos como características de la imagen. En estos experimentos, la cámara se encontraba a una distancia de unos 550 mm del objeto, distancia sobre el eje óptico a la que se encontraba también el centro de rotación. Se observa que el error final (desviación estándar) es de aproximadamente 2 a 3 mm para los movimientos de traslación, y de 1 a 2 grados para los de rotación.

Table 1: Error de posicionamiento para 10 ensayos empleando redes neuronales entrenados con descriptores de Fourier y momentos geométricos.

axis	Valvula 22 GM		Culata de motor 22 GM	
	mean	std	mean	std
Tx (mm)	-0.2	1.7	-1.9	2.9
Ty	-0.6	2.2	-1.4	3.1
Tz	0.1	1.2	-1.0	2.6
Rx (deg)	-0.2	1.8	-0.5	1.8
Ry	0.6	2.1	-0.7	1.7
Rz	0.0	0.9	-0.3	0.7

En la Figura 1, se muestran las imágenes que se observan durante un ensayo típico de posicionamiento utilizando momentos geométricos como características de la imagen. Se incluye una representación 2D de la posición y orientación de los ejes de inercia mayor y menor de cada imagen para facilitar la comparación de cada imagen con la imagen de referencia.

39

## 5 Conclusiones

Se ha descrito un método nuevo para realizar el posicionamiento visual de robots basado en el aprendizaje neuronal y los descriptores globales de la imagen. El método explota la capacidad de las redes neuronales para aproximar las funciones complejas que relacionan las variaciones en los descriptores globales de la imagen, como los descriptores de Fourier y los momentos geométricos, con el desplazamiento de un robot de 6 grados de libertad desde una posición y orientación deseadas. Los experimentos realizados han mostrado que se puede alcanzar una precisión de 2 a 3 mm de traslación y 1 a 2 grados de rotación. Se ha comprobado que el método es muy robusto para distintas perturbaciones, tales como variaciones en la iluminación, generalización fuera del espacio empleado para el entrenamiento, ruido en la imagen, y defectos en los objetos [2].

## References

- [1] Corke, P., "Visual Control of Robot Manipulators - A Review", in *Visual Servoing*, K. Hashimoto ed., World Scientific, Singapore, 1993, pp. 1-31.
- [2] Venaille, C., Adam, P., Thévenon, J., Wells, G., and Lesaint, E., "Industrial Inspection Robot", informe técnico del proyecto CONNY (ESPRIT núm. 6715), Rennes, Francia, mayo, 1995.

# Xarxes neuronals

- [3] Venaille, C., Wells, G., and Torras, C., "Application of neural networks to image-based control of robot arms", *Proc. 2nd. IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications (SICICA)*, Budapest, 1994, pp. 281-286.
- [4] Wells, G., Torras, C., and Venaille, C., "Vision-based robot positioning using neural networks", (artículo enviado para publicación), 1995.

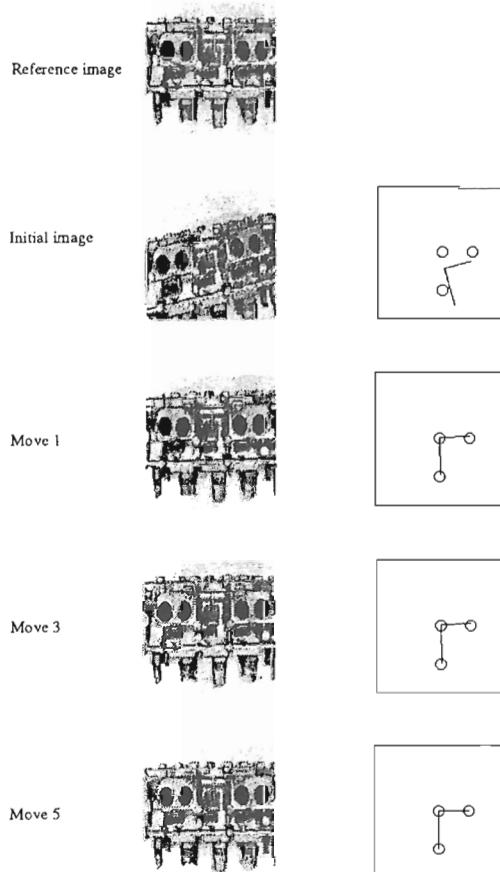


Figure 1: Posicionamiento visual con respecto a una culata de motor de automóvil, empleando momentos geometricos de la imagen. La secuencia muestra la imagen de referencia y la imagen actual después de 3 de entre una serie de 5 movimientos, junto con una representación 2D de los ejes de inercia mayor y menor de la imagen, donde los círculos corresponden a los extremos de los ejes en la imagen de referencia.

# ROBÒTICA I VISIÓ I

M. Carmen Molina Gámez

Petia Radeva i Enric Martí

Maria Vanrell

F.X. Roca

## 2D Object Recognition in Polynomial Time by Approximate Geometric Matching

M.Carmen Molina Gámez and J. Brian Subirana Vilanova

Grupo de Visión por Computador - Dpto. de Informática

Universidad Autónoma de Barcelona - 08193 Bellaterra (Barcelona)

e-mail: carme@upisun1.uab.es

### Abstract

We approach the problem of 2D model-based object recognition as the problem of finding a transformation that matches model features to a subset of image features. We look for that transformation in a *Transformation Parameter Space*, that allows us an efficient search. The method presented here works in polynomial-time while it is robust in the presence of geometric uncertainty. Features used consist of linear and curved segments from the contour of the objects. We introduce unary geometric constraints that reduce in practice the complexity of the method. Experimental results are given applying the method to the license plate recognition problem.

### 1 Introduction

Generally speaking, object recognition is the problem of identifying a known object among a set of objects taken from a scene by means of a sensor [7]. The task of identifying this known object implicitly involves to locate it relative to a sensor. That is, we can affirm we have recognized an object in an image if we can determine where it appears. In doing this we are giving the *pose* of the recognized object in the image. This pose may be expressed as a transformation that brings the known object into congruence with the image.

Recognition process involves the use of a great amount of context information, and non-shape attributes, such as color, texture or motion. However, most common objects can be recognized in isolation, without using context information. In these cases, objects are recognized only by their shape properties. In this work we are concerned about recognition based on shape properties.

Our representation of the shape is based on **local geometric features**, which are enough to extract important characteristics of the spatial structure of an object. This representation has two important advantages: first, we reduce the amount of information needed to process, and second, we become invariant to many kinds of changes in illumination. Examples of local geometric features include elements like points, vertices, edges, curved segments, surface patches, and associated geometric

quantities like surface and curve normals.

Our approach is based on **model-based** object recognition. This means that we will interpret subsets of sensory data corresponding to **instances** of objects in the scene in terms of a priori known **models** of the object. Other authors have focused on this topic with similar approaches, but their methods usually present two kinds of drawbacks: when the method is robust it shows an exponential complexity [5] and, on the other hand, when the method has polynomial complexity it is not robust to occlusions or geometric uncertainty [7].

In this paper we propose an algorithm able to cope with occlusions and uncertainty in images while it has polynomial complexity. Next, we discuss the main difficulties with which we have to face in a geometric matching, and our approach to overcome them. Later, we explain the plain algorithm and its complexity in detail. In section four we propose to define geometric constraints that will reduce the complexity of the method. Finally, we show our results and conclusions.

### 2 Difficulties in Geometric Feature Matching

Three attributes of this task domain make the geometric matching problem difficult. First, **spurious** data features due to unknown objects in the scene which do not correspond to any feature of the model. Second, even in the presence of a model instance in the scene there can be model features **missing** from the data due to object occlusion and failures in feature extraction. Third, the sensory data are subject to **geometric uncertainty** due to sensor error, partial occlusions, and inaccuracies in feature extraction that greatly affects the process of geometric matching and pose determination. The performance of our algorithm depends strongly on the way we model this error.

We refer to **transformation parameter space**, or briefly *TPS*, as the space of possible transformations of the model, that is, the set of all transformations that we allow the object to undergo. Model matching can be accomplished by searching for the transformation that aligns model features to data features in the transformation parameter space. The effects of data uncertainty and missing

and spurious features will make the search for the best transformation in this space difficult.

## 2.1 Handling Geometric Uncertainty

When we work with real images there is a geometric error in measurements based on the image or their representation in terms of features. This error comes from two main sources: sensing and features extraction. It is necessary to handle with a representation of this uncertainty precise enough and computationally efficient.

Two key assumptions are usually made: the uncertainty in the actual position and orientation of an image feature is bounded<sup>1</sup>. And the second assumption is that uncertainty in position and orientation measurements are independent. Under these assumptions we can establish that, for each feature from the image: first, the true position may deviate from the measured position by a maximum distance of  $\epsilon$ . So the real position falls within a circle of radius  $\epsilon$  centered at the measured position. Second, the true orientation may deviate from the measured orientation by a maximum angle of  $\delta$ , thus the real orientation falls within a range of orientations of length  $2\delta$  centered at the measured orientation [2] [3] [4].

## 3 Recognition as Searching in Parameter Space

Denote a model feature  $m = (p_m, \theta_m)$  by an ordered pair of vectors representing the feature position and orientation, respectively. Similarly a data feature is given by  $d = (p_d, \theta_d)$ . We will denote a *feature match* (or just *match*) as an ordered pair  $(m, d)$ .

Let  $T$  be the group of translations,  $R$  be the group of rotations about the origin. Accordingly,  $T\mathcal{PS} = T \otimes R$  is their composition. We will let  $T_\phi \in R$  be the operator for rotation by  $\phi$ , and  $T_t \in T$  be the operator for translation  $t$ . A transformation  $T = T_t \circ T_\phi$  is the composition of a rotation and a translation, applied in this order.

Let  $T$  be an arbitrary transformation, and let  $(p'_m, \theta'_m) = T[(p_m, \theta_m)]$  be a transformed model feature. For each match, we are interested in the set of transformations that approximately aligns the model feature with the image feature. This set is given by:

$$\mathbf{F}_{m,d} = \{T \in T\mathcal{PS} : |p'_m - p_d| \leq \epsilon, |\theta'_m - \theta_d| \leq \delta, (p'_m, \theta'_m) = T[(p_m, \theta_m)]\} \subseteq T\mathcal{PS}$$

that is,  $\mathbf{F}_{m,d}$  is the set of transformations which leave the model feature  $m$  within  $\epsilon$  in position, and  $\delta$  in orientation of the data feature  $d$ . We denote the set of *feasible transformations* for the feature match  $(m, d)$  to be the set  $\mathbf{F}_{m,d}$ .

We are interested in transformations that align most of the model features with the image features.

<sup>1</sup>This is a simple and discrete approximation to a continuous, uncertainty distribution.

The term *match-set* will be used to describe a set of model and image features matches. Let  $M = \{(m_i, d_j)\}$  be a set of feature matches. Such a match-set is called *geometrically consistent* if

$$\bigcap_{(m_i, d_j) \in M} \mathbf{F}_{m_i, d_j} \neq \emptyset$$

Namely, if some transformation exists which is geometrically consistent for all  $(m_i, d_j) \in M$ , then  $M$  will be called geometrically consistent. We are interested in the maximum geometrically consistent set  $M$ , where the bulk of the model features appears. This maximum geometrically consistent match-set  $M$  will be found by searching in  $T\mathcal{PS}$  for a transformation that aligns all pairings in  $M$ .

## 3.1 Efficient Transformation Equivalence Analysis

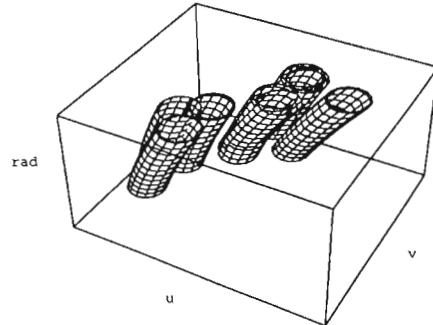


Figure 1: Topology of a section of the Transformation Parameter Space.

If we assume that model and image features have the same orientation, the transformations that align them consist of a 2D translation, within a circle of radius  $\epsilon$ . When model and image features have different orientations, there is a set of rotations about a fixed point (the origin) that align them. For each of them, the circle of possible translations changes its location in the  $T\mathcal{PS}$ . Therefore, each set of consistent transformations for a match  $(m, d)$ , before denoted as  $\mathbf{F}_{(m,d)}$ , is an helical tube, which extends in the vertical direction depending on the angle uncertainty  $\delta$ , and circular cross section depending on the positional uncertainty  $\epsilon$  (see figure 1). In the matching process we are interested in the region of the transformation space where we find most of the helical tubes intersecting.

With  $m$  model features and  $d$  image features, there exist exactly  $m \times d$  helical tubes in the  $T\mathcal{PS}$ . The overlapping sets  $\mathbf{F}_{m_i, d_j}$  for all  $(m_i, d_j) \in m_i \times d_j$ , divide the  $T\mathcal{PS}$  into equivalence classes where each class is associated with a different geometrically consistent match-set. Namely, transformations can be grouped into equivalence classes in such

a way that all transformations in one class are consistent with the same set of matches  $\{(m_i, d_j)\}$ . We do not have to explore each transformation in the  $TPS$ , but only one transformation for each equivalence class.

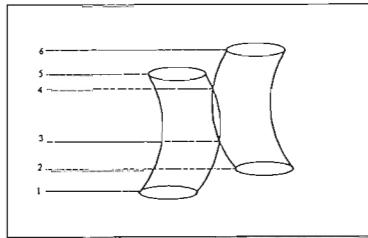


Figure 2: Critical Rotations are marked with a number. They delimit the ends of rotational equivalence classes. Numbers 3 and 4 correspond to *type I critical rotations*, while numbers 1, 2, 5 and 6 correspond to *type II critical rotations*

Let *critical rotations* denote that rotations that divide  $TPS$  into equivalence classes, in which the topology of the helical tubes changes. These rotations are associated with different events of the helical tubes and, therefore, with different topologies of the circles or *match-discs* in different slices of the  $TPS$ . Two main events can be differentiated. The first case is the angle  $\phi$  at which two match-discs are intersecting and then move (when rotation changes) such that they are just tangent, and then completely separate. The  $\phi$  which tangency occurs marks a topological boundary (*type I critical rotations*). If we include angle constraints, that is, if we require that  $|\theta_d - T_\phi[\theta_m]| \leq \delta$ , we introduce new topological boundaries. The  $\phi$ 's we are interested in, mark the end or the beginning of a given helical tube (*type II critical rotations* (see figure 2)).

For each rotational equivalence class  $[\phi_{b,i}, \phi_{e,i}]$  we choose  $\phi_{m,i}$  so that  $\phi_{b,i} \leq \phi_{m,i} \leq \phi_{e,i}$ , apply the rotation  $\phi_{m,i}$  on the model features, and compute the circles formed in this slice. For each pair of circles, compute their intersection, that in fact are transformations. We count in how many other circles these transformations, if it exists, belong to. A circle represents a match, so we can also know the feature pairs that are aligned with this transformation.

The transformation that belongs to the largest number of circles is the transformation that aligns the maximum match-set. Then, the best transformation and also the maximum geometrically consistent match-set  $M$  will have been found.

### 3.2 Reducing the Complexity

If we have  $m$  model features, and  $d$  image features, the number of helical tubes is exactly  $m \times d$ . The complexity of the algorithm depends on the number of equivalence classes we will have to study. With  $m \times d$  helical tubes,  $2md$  *type II critical rotations* and, in the worst case,  $m^2d^2$  *type I critical rotations* are generated. Therefore, we will have a polyno-

mial number of equivalence classes, in the order of  $O(m^2d^2)$ . If we study every equivalence class directly, we will have to compute the intersection of  $m^2d^2$  circles for each one. The complexity of the method would be  $O(m^4d^4)$ .

In order to reduce the complexity, rectangular convex-hulls can be constructed for each tube and each circle. This convex-hull must be the minimum rectangle that covers all the projection of an helical tube on the translation space. Convex-hulls are widely explained in [6]. If we have  $n$  isothetic<sup>2</sup> rectangles, their intersections can be computed in  $O(n \lg n + k)$  time, where  $k$  is the number of intersecting rectangles. In the worst case  $k = O(n^2)$ , but in practice there are many fewer rectangles which actually intersect, so this first step can considerably reduce computation in practice.

The other way to reduce complexity is based on the study of the equivalence classes. When we pass from one equivalence class to the next one, normally only one change has happened (one type of the two events associated with the critical rotations). The amount of work can be reduced if this fact is exploited, applying an incremental analysis of the topological changes occurring in translation space as we step through the rotational equivalence classes in order. The data structure used in this analysis is the *statical interval tree*. In [6] a good explanation on this data structure can be found. With this improvement the resulting complexity of the method is  $O(m^3d^3 \log md)$ .

## 4 Geometric Constraints

The main problem this method bears is the large number of cells or equivalence classes generated and which represent only a small number of pairings, i.e., a small matching, in which we are not interested at all. We can reduce the number of this kind of equivalence classes if we introduce some geometric constraints.

Our goal is to reduce the complexity of the method by using the most efficient representation of the shape. We have chosen two kinds of geometric features: linear and curved segments from the contour of the objects, which we call **extended features**. These features allow us to include geometric constraints [1] that will direct the search for the best transformation.

We have found that the best results are obtained when we used length as a geometric constraint for linear segments. Then, two linear segments can map only when they have a *similar* length. With *similar* we mean we have a certain allowed error, that will depend on the noise the image had or the precision we wanted to give a result. For curved segments we have used length and curvature as geometric constraints, in the same way explained above. Then, two curved segments can map only if they have *similar* length and *similar* curvature. In figure

<sup>2</sup>Isothetic means the sides of the rectangles are all parallel to the coordinate axis.

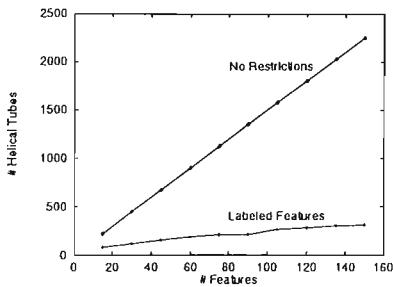


Figure 3: The complexity of the method depends on the number of helical tubes generated. So we compare in this graphic the complexity when geometric constraints are applied (labeled features, that is, linear and curved features) and when features consist in mere points, without restrictions.

we compare the complexity using our geometric constraints to the complexity using only points as geometric features without any constraint.

## 5 Results

We have addressed the number plates recognition problem. This application has been approached many times before, but never from a geometric matching perspective. The previous approaches have been mostly based on neural networks, that needed an earlier segmentation process. We do not need a previous segmentation, which makes our algorithm more robust (as we avoid errors during segmentation) and faster. Results are shown in table 1. In this table we have located the model (a "B" image) in the image. The result of our algorithm is a transformation that has been aplied to the model image. The transformed model has been overprinted on the image.

## 6 Contributions and Conclusions

The algorithm presented is efficient as well as it can be used in a wide range of problems related to recognition. Its efficiency is due to its polynomial-time complexity. Moreover, the results achieved are excellent despite the presence of high level of noise in the image. Therefore, our algorithm permits a good approximate matching between the model and the image.

We find that in the Cass' algorithm [3] [4], that uses points from contours as features, many cells are generated by the helical tubes corresponded only to small matchings. We have solved this problem introducing the geometric constraints. These constraints allow us to avoid the treatment of most of the useless helical tubes. But the constraints can be applied only if we have proper features, like linear and curved segments. In fact, linear and curved segments have two other main advantages. The first

is that fewer features will be needed to describe objects than if we were merely using points. The second is that this representation is more intuitive for persons than points. As conclusion, we can assert that our extended features considerably speed up the matching process.

## References

- [1] A. J. Bray. *Properties of Local Geometric Constraints*, British Machine Vision Conference, pp. 95-103, 1991, Springer-Verlag.
- [2] Thomas M. Breuel. *Geometric aspects of visual object recognition*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [3] Todd A. Cass. *Feature matching for object localization in the presence of uncertainty*, A.I. Memo No. 1133, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, May 1990.
- [4] Todd A. Cass. *Polynomial-Time Geometric Matching for Object Recognition*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [5] W.E.L. Grimson and T. Lozano-Pérez, *Localizing overlappings parts by searching the interpretation tree*. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., vol. 9,no. 4, pp.469-482, 1987.
- [6] E.P. Preparata and M. Shamos. *Computational Geometry-An Introduction*. Spring-Verlag, New York, 1985.
- [7] Shimon Ullman. *An Approach to Object Recognition: Aligning Pictorial Descriptions*. A.I. Memo No. 931, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, December 1986.

# Robòtica i visió I

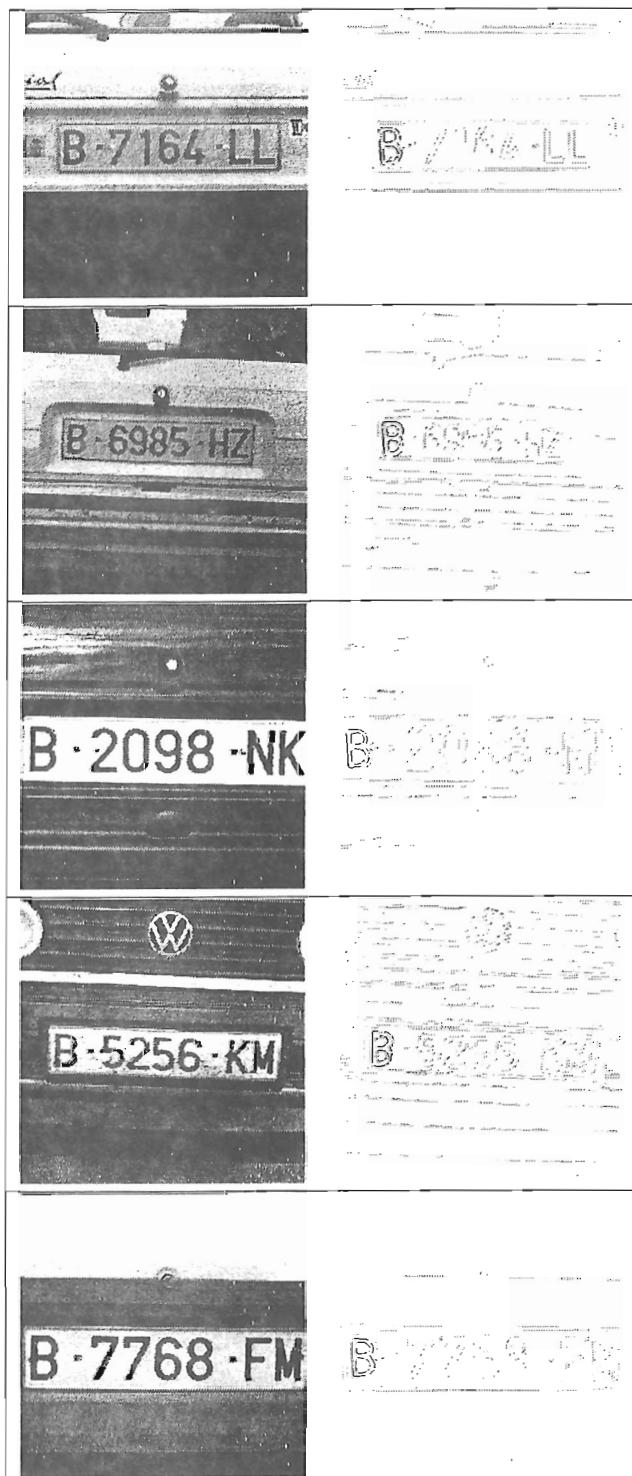


Table 1: The left column shows the original camera image, and the right one the model ("B") located in the image.

## Facial Features Segmentation by Model-Guided Snakes

Petia Radeva and Enric Martí

Departament d'Informàtica, Facultat de Ciències,  
Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain  
e-mail petia@upisun1.uab.es

### Abstract

Deformable models have recently been accepted as a standard technique to segment different features in facial images. Despite they give a good approximation of the salient features in a facial image, the resulting shapes of the segmentation process seem somewhat artificial with respect to the natural feature shapes. In this paper we show that active contour models (in particular, the model-guided snakes) give more close and natural representation of the detected feature shape. Besides, using snakes for facial segmentation frees us from the problem of determination of the numerous weights of deformable models. Another advantage of our snakes is their reduced computational cost.

Our experiments using the model-guided snakes for segmentation of facial snapshots have shown a significant improvement compared to deformable models.

### 1 Introduction

The successful automatic extraction of facial features is strongly dependent on the existence of feature model that should be descriptive enough to embody common shape, but yet flexible to allow some degree of variation [4]. With this fact we can explain the popularity of deformable models [17] for the segmentation of facial features. Deformable models are collections of parameterized curves (normally, parabolae and circles) which, taken together, describe the expected shape of the feature to be detected in the image [2]. The template interacts dynamically with the original image and with the peaks, the valleys and the edges derived from the image. An energy function is determined that estimates and reduces the deviation of the template from the image characteristics. The minimum of the energy function corresponds to the best fit with the image.

Due to the special shape of the deformable template (consisting of parabolic curves and circles) the segmented facial features seem somewhat artificial. We should admit that almost never can we see such a regular and symmetric eye, that the eyelashes have exactly the shape of parabolic curves and the iris is seen as a perfect circle. Another problem of the deformable models technique is the previous determination of the parameters of the parabolae and the circle of the model and of the numerous weights for the constituents of the energy determined empirically [17, 2, 13, 16]. Xie et al. in [16] propose to normalize the different external energies in order to avoid the predetermination of the weights. This way the parameters to be assigned are reduced and the rest of them are derived from the grey level mean and standard deviation of the eye area. Another problem pointed out by many researchers working on the facial features segmentation by deformable models [13, 16]

is the difficult segmentation of the lower eyelash and the lower lip. We show here, that the use of snakes is convenient for facial segmentation because they adjust themselves better to the facial image and help avoid the mentioned problems of deformable models.

The main difference between deformable models and snakes is that the latter are not restricted to some predetermined family of shapes, and this way the segmented features have more natural representation. The classical snakes [6] do not take into account the specific *a priori* knowledge available, have more parameters to update and, hence, they are computationally slower [17]. For this reason we chose to segment the facial features by snakes [10] whose deformation is model-guided similarly to the elastically deformable models proposed by Terzopoulos et al. [14]. The model-guided snakes begin their deformation from a particular model of an individual feature and change their shape in accordance to the data in the image maintaining minimal difference with the eye model. This way they achieve to adjust themselves better to the edges and valleys of the image and do not need a previous determination of so many energies weights and parameters of parameterized curves due to the explicit use of a feature model. The only parameters necessary to determine previously are the parameters of elasticity and rigidity that are global for all the pixels of the snake. Similarly to the deformable models, the model-guided snake deforms on edge and valley potentials but in a reduced computational process.

The deformable models have been preferred to the active contour models because of their global deformation [17], the shape changes are propagating along the parabolic curves and circles. In order to preserve this global nature of the deformation process we propose to use an additional component to the internal energy acting as springs between certain pairs of snake pixels and that take charge of the approximately symmetric changes in the snake shape. Finally, in this work the standard scheme for the feature localization and segmentation is modified to optimize the features localization, to solve some problems of the segmentation as for example this of the lower eyelash and of the lower lip, and to reduce the calculus of the deformation process.

The article is organized as follows: in section 2, we expose the fundamentals of model-guided snakes. In section 3, we discuss the localization of the features of interest: the eyes, the eyebrows and the mouth. Section 4 is dedicated to features segmentation. Finally, conclusions are reported.

## 2 Model-Based Snake Model: Fundamentals

A model-guided snake is a continuous curve that, from an initial state, tries to position itself dynamically on image characteristics (f.e. edge or valley points).

External forces are designed to minimize the snake external energy so that it is pushed towards certain characteristics of the original image. These forces are associated to a potential which is defined in terms of a distance map of the image characteristics [3]. For the facial segmentation we use two potential fields: edge potential field and valley potential field. The construction of the edge potential field is done in terms of a signed distance potential that explicitly incorporates information about the gradient direction of the edges derived from the image [11].

An internal force of the model-guided snake minimizes its internal energy keeping it near the feature model. The internal energy is as follows:

$$E_{int} = \alpha(u_s(s) - u_s^0(s))^2 + \beta(u_{ss}(s) - u_{ss}^0(s))^2$$

where  $u(s) = (x(s), y(s))$  is the snake curve,  $s$  is the curve arc-length,  $|u_s(s)|$  is the membrane energy of the snake,  $|u_{ss}(s)|$  is its thin-plate energy,  $|u_s^0(s)|$  and  $|u_{ss}^0(s)|$  are the membrane energy and the thin-plate energy of the feature model [10]. The parameter of elasticity  $\alpha$  and the parameter of rigidity  $\beta$  take charge of the control of the snake deviation from the model in each step of its movement [8, 9]. Thus, the model-guided snake explicitly incorporates structural information about the desired final snake shape. The internal force of the model-guided snake always attempts to compensate the changes caused by the external forces and to preserve the object model controlled by the parameters  $\alpha$  and  $\beta$ .

The minimum of the snake energy corresponds to the best fit with the image. The total energy of the snake is represented by means of the energies addition functional:

$$\begin{aligned} E_{snake} = & \int_0^1 E_{int}(u(s)) + E_{ext}(u(s)) ds = \\ & \int_0^1 \alpha(u_s(s) - u_s^0(s))^2 + \beta(u_{ss}(s) - u_{ss}^0(s))^2 + \\ & P_{edg}(u(s)) + P_{val}(u(s)) ds \end{aligned}$$

In order to extract different types of characteristics from the original image, we use the facet model. It provides a more exact edge points detector, the zero-crossing of the second directional derivative [5]. This is an edge detection method which has a good localization as well as a good estimation of the edge gradient. Another advantage is that it is very sensitive to weak image characteristics, this way it gives us more information about the facial features normally characterized by smooth contours. The facet model also allows to extract in the same computational process the edge points with their magnitude and direction, the valley points and the ridge points.

## 3 Features Localization

In order to segment a facial feature by snakes, we need to locate an initial snake (a model) near the feature. Also, as the snake deformation is guided by a model, some normalization of the initial snake in scale

and orientation should be done using the information derived in the stage of features localization.

A recommended technique for detection of facial features is by template matching [12]. The main disadvantage of this approach is the expansive computational cost. In order to reduce this cost we combine the template matching with the localization by integral projections [1]. Instead of matching the templates on all the image, it is examined for locations that fulfill some predetermined constraint (for example, bilateral symmetry) and thus the matching is done in a delimited region.

Given an image  $I(x, y)$  we consider the vertical and the horizontal integral projections in the  $[x_1, y_1] \times [x_2, y_2]$  rectangle defined as:

$$V(x) = \sum_{y=y_1}^{y_2} I(x, y), \quad H(y) = \sum_{x=x_1}^{x_2} I(x, y)$$

Brunelli and Poggio [1] use the integral projections on the edge map partitioned in terms of edge directions. We found out that more exact results can be obtained applying the projection analysis on the intensity image because of the smooth contours of most of the facial features. One example of vertical and horizontal projections of a face can be seen in Fig. 1 and Fig. 2.

In contrast with most features localizing techniques that begin from the eyes extraction, we firstly detect the nose crest. The nose localization has the advantage that we are looking for a homogeneous bright area, where we do not find external elements that cover it (as compared to the mouth or eyes, where a beard or sunglasses may occur, making difficult their localization). Therefore, the vertical projection is characterized by a well-differentiated peak corresponding to the nose. The nose position is important to locate the eyes symmetrically with respect to the nose. The eyes are localized by two symmetrical pits in the vertical projection and by one pit in the horizontal projection. Another pit in the horizontal projection near the eye location corresponds to the eyebrows. It can be more or less strong than the eye pit and hence we use the fact that the eyes are below the eyebrows to determine the features location. Other pits can appear in the vertical and horizontal projections due to shades and wrinkles around the eyes. Therefore, different hypotheses are constructed about the features location and a template matching is performed in a neighbourhood of the supposed location of the features. It is necessary, since the projections can change in some limits the horizontal and vertical position of the features in case of different facial orientations.

For the localization of the eyes we used a template matching because of the complex structure of the eyes. The template consists of one horizontal segment and three vertical segments looking for dark areas corresponding to the iris and the upper eyelash and for bright areas corresponding to the eye whites. The template is normalized in accordance to the expected feature scale, obtained by the projection analysis. The localization of the eyebrows and the mouth is simpler with respect to the eye localization: the eyebrows are localized by looking for two valleys bilaterally symmetrical with respect to the nose in the neighbourhood of a pit of the horizontal projection. The mouth is detected looking for a valley with its height near a pit in the horizontal projection and symmetrical with respect to the width position of the nose.

# Robòtica i visió I

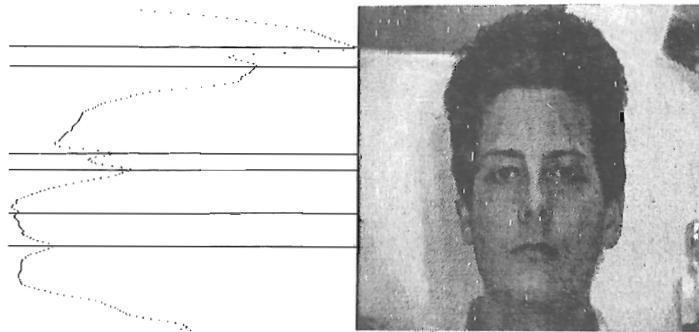


Figure 1: Vertical projections of a face

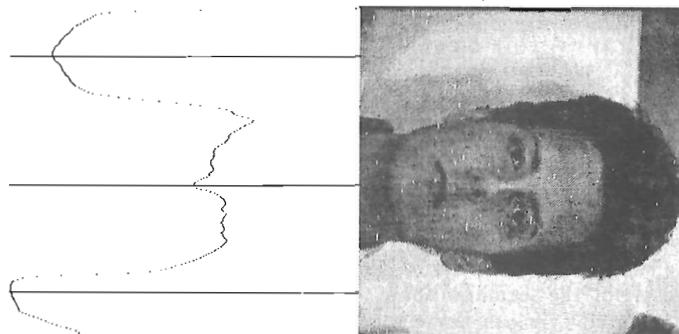


Figure 2: Horizontal projections of a face

## 4 Features Segmentation

Using the information regarding the expected scale and orientation obtained from the distance between both irises, the iris models are scaled and used as initial snakes to adjust to the facial image.

### 4.1 Eye Segmentation

The segmentation of the eyes by model-guided snakes is performed in a sequential manner analogously to the template deformation on different epochs used by Yuille et al. [17]. The reason is that it is easier to detect the irises because they appear as two circular spots symmetrically with respect to the nose. Once they are detected, their location is used to orient the models corresponding to the eyelashes. In order to keep the circular shape of the iris, the iris snakes try to maintain the thin-plate energy of the model. Nevertheless, in cases of occluded part of the iris the model-guided snake obtains the exact contour, producing this way the realistic iris shape.

After the detection of the irises, the eye contours are considered. In contrast to the well-known works on eyes segmentation, our observations on different eyes images are that it is more convenient to look for the eye shape from the valley points than from the edge points, because of the nature of the eyelashes.

In order to increase the global control on the snake shape deformation we add a new term to the internal force of the model-guided snake definition. This force takes charge of the symmetric changes of the snakes, assuring this way certain symmetry between both eyelashes. The new internal energy for an eye is:

$$E_{int} = \alpha(s)(u_s(s) - u_s^0(s))^2 + \beta(u_{ss}(s) - u_{ss}^0(s))^2 + c(u(s) - u^{sym}(s))$$

where  $u^{sym}(s)$ ) is the inverted and symmetric vector of the snake curve  $u(s)$  with respect to both eye ends. Given that the number of pixels for each eyelash is equal and the first pixel and the middle pixel of the snake should correspond to both ends of the eye, it is easy to see that the snake for each eye deforms symmetrically with respect to both its ends. The coefficient  $c$  controls the strength of the symmetry constraint.

Another feature that helps eye segmentation is provided by the iris contours. Using the fact that the iris contour should lay inside the eye, we put the detected irises into the valley potential. If the eye model has some part near these valleys, and there are not any stronger valleys due to eyelashes that make the snake go out from the iris valleys, the snake position remains, so that the iris is always inside the final eye contour detected by the snake.

Once the eye contours have been detected, the results are tested considering for each eye contour its symmetrical one with respect to the nose crest, thus forming two pairs of eyes and repeating the deformation process. The best result of the deformation process is chosen as final result.

When the lower eyelash has large external energy (i.e. the snake fails to detect a valley corresponding to the lower eyelash), the snake is deformed on the edge potential. Both the ends of the snake corresponding to the lower eyelash are fixed. The snake curve is divided in three parts and they are deformed together but looking for edges with different gradient directions. The outside parts of the snake adjust to edge points with gradient directed towards the inside of the eye (due to the whites of the eye) and the central part of the snake is adjusting to edge points with



Figure 3: An example of segmented eyes and eyebrows through model-guided snakes

gradient direction towards the outer part of the eye (due to the touch of the eyelash with the iris). Parallelly, an eyelash snake is deformed adjusting itself to edge points with gradient direction towards the inside of the eye. This is the case when the eyelash does not touch the iris of the eye. The energy of the final snakes is estimated and the snake with the lower energy is considered as the result of the segmentation. An example of different segmented eyes can be seen in Fig. 3.

## 4.2 Eyebrow Segmentation

The contours of the eyebrows are difficult to detect in many facial images because of the texture of the eyebrows. It turned out that the valley points information derived from the original image gives us more consistent data about the position and shape of the eyebrows than that of the edge points. Following this idea, we firstly use an open snake to detect a valley line corresponding to the eyebrow skeleton. Afterwards, two initial models are put around the detected valley and the best deformation is considered as final result of the eyebrow segmentation. Using the results of two models is preferable because of the existence of two general shapes of eyebrows one can see. The first model corresponds to horizontal eyebrows, while the second one corresponds to convex eyebrow shapes. In order to help to the segmentation of the eyebrow contour, an internal energy similar to that of the eye is designed to add a new term. It provides symmetry to the contour with respect to the skeleton of the eyebrow. The left and right eyebrows are segmented independently and their results are tested for symmetry. An example of different segmented eyebrows is given in Fig. 3.

## 4.3 Mouth Segmentation

The segmentation of the mouth is similar to that of the eyebrows. A difference is that here, instead of the skeleton of the eyebrow, we have used the line between the lips detected on the valley potential by an open snake. Afterwards, the mouth model is scaled and oriented in accordance to the line between the lips and put onto the edge potential in order to detect the contours of the lips. The snake is deforming symmetrically with respect to the line between the lips. However, the constraint on the symmetry is lower than in the case of the eyebrows and the eyes, because the lips may be of different width and also in order to

capture the existence of convexities in the upper lip that have no corresponding symmetrical convexities in the lower lip.

It has been already reported by other authors [2] that the lower lip often creates problems to be detected due to scarce edge points in the edge map. To solve the problem we use the gradient direction of the edge points. Depending on the illumination conditions, the lower lip may be seen as a dark area, as a bright area or, more frequently, as a smooth composition of dark-bright-dark areas. Since the edge potential contains explicit information about the gradient direction of the edge points, three snakes are constructed corresponding to the different possibilities for the edge points and the snake with best energy estimation after their deformation is considered as the result of the lip segmentation. In Fig. 4 an example of different segmented mouths is shown.

## 5 Results

We have applied the localization and segmentation technique by model-guided snakes presented here on 26 facial images. The conditions on the facial images were to allow 15% deviation in scale, orientation and translation from the center of the image. The illumination when making the photos has been central. The background is supposed to be approximately homogeneous. As a result, in 23 images, the eyes were segmented correctly. The other three failed to detect correctly the irises because of their bright colour. In the mouth segmentation, some problems appeared when the line between the lips is shorter than the valley line in the image due to the presence of wrinkles next to the mouth. In three of the images, the snake could not detect exactly the end of the mouth. The problem we saw with the eyebrows detection is their eventual merge with shadows above the eyes as well as the occlusion of the eyebrow by the hair. We are working on incorporation of high-knowledge about the faces to guide and to test the snake deformation results. An extremely interesting issue to be considered for facial segmentation is the implementation of snakes for the different features that should deform simultaneously and dependently from each other.

## 6 Conclusions

The facial segmentation by model-guided snakes can be considered as a more global technique than the

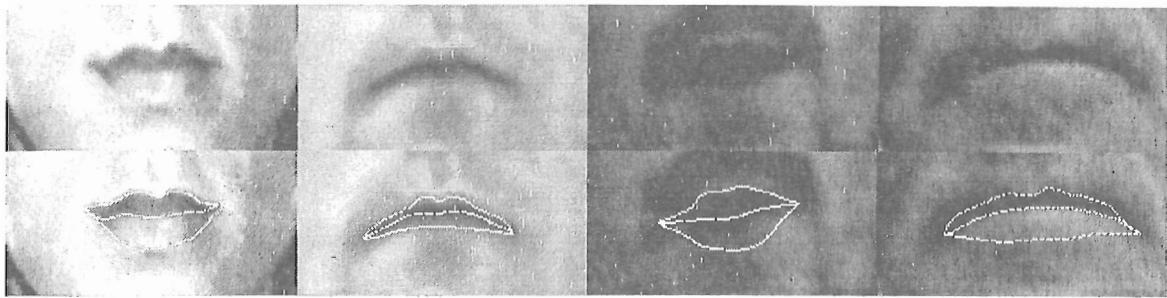


Figure 4: An example of segmented mouths through model-guided snakes

one by deformable templates and less global than by original snakes. It has the advantage that the snakes capture different shapes, unrestricted in a certain family, according to the image characteristics and the imposed constraints on its "distance" to a given model. Besides its possibility to obtain approximately symmetrical shapes, its principal difference from the deformable templates is that it does not need to modelize the object it is looking for, since the model is used implicitly. We also show that the role of valley points is significant for the correct localization and segmentation of most of the facial features as f.e. the eye. This fact allowed us to simplify the scheme of facial segmentation by model-guided snakes using only two external energies. The result is the reduced complexity of the segmentation process and no need of determination of a number of weights used in other facial segmentation techniques.

Since this segmentation technique is not depending on the features we have considered until now, it is easy transferred in segmentation modules for other objects. Our future work is related to the application of the segmentation technique by model-guided snakes to detect other facial features and objects as wrinkles, spectacles, a moustache, etc. as part of our future work on facial expressions recognition.

## References

- [1] R. Brunelli and T. Poggio, "Face Recognition: Features versus Templates", *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 15, No. 10, October, 1993, pp. 1042-1052.
- [2] Ch.-W. Chen and Ch.-L. Huang, "Human Face Recognition from a Single Front View", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 6, No. 4, pp. 571-594, 1992.
- [3] I. Cohen, L. D. Cohen and N. Ayache, "Using Deformable Surfaces to Segment 3-D Images and Infer Differential Structures", *CVGIP: IMAGE UNDERSTANDING*, Vol.56, No.2, pp.242-263, 1992.
- [4] G. Chow and X. Li, "Towards a System for Automatic Facial Feature Detection", *Pattern Recognition*, Vol. 26, No. 12, 1993, pp. 1739-1755.
- [5] R. M. Haralick and L. G. Shapiro, "The Facet Model," *Computer and Robot Vision*, Vol.1, Addison-Wesley, New York, 1992.
- [6] M. Kass and A. Witkin and D. Terzopoulos, "Snakes: Active Contour Models," *Proc. of Int. Conf. on CV*, pp.259-268, London, 1987.
- [7] F. Leymarie and M.D. Levine, "Tracking Deformable Objects in the Plane Using an Active Contour Model", *IEEE Trans. PAMI-15*, No.6, 1993.
- [8] O. V. Larsen, P. Radeva and E. Martí, "Bounds on the Optimal Elasticity Parameters for a Snake", Proceedings from 8th International Conference on Image Analysis and Processing, San Remo, Italy, 1995 (accepted).
- [9] O. V. Larsen, P. Radeva and E. Martí, "Guidelines for choosing optimal parameters of elasticity for snakes", Proceedings from CAIP'95 - International Conference on Computer Analysis and Image Processing (Accepted), Czech Republic, Prague, 1995 (accepted).
- [10] P. I. Radeva, "Segmentation of Radiographs by Rubber Snakes. Application to the Assessment of Skeletal Maturity", *Master Thesis*, UPIA, UAB, September, 1993.
- [11] P. I. Radeva and J. Serrat, "Rubber Snake: Implementation on Signed Distance Potential", In *Vision Conference SWISS'93*, pp. 187-194, September, 1993.
- [12] A. Samal and P. A. Iyengar, "Automatic Recognition and Analysis of Human Faces and Facial Expressions: A Survey", *Pattern Recognition*, Vol. 25, No. 1, 1992, pp. 65-77.
- [13] M. A. Shackleton and W. J. Welsh, "Classification of Facial Features for Recognition", *Proc. of Conf. on CVPR*, Hawaii, 1991, pp. 573-579.
- [14] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr and K. Fleisher, "Elastically Deformable Models", *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, July, 1987, pp. 205-214.
- [15] D. Terzopoulos and K. Waters, "Analysis of Facial Images using Physical and Anatomical Models", *Proc. of Conf. on CVPR*, 1989, pp. 727-732.
- [16] X. Xie, R. Sudhakar and H. Zhuang, "On Improving Eye Feature Extraction using Deformable Models", *Pattern Recognition*, Vol. 27, No. 6, 1994, pp. 791-799.
- [17] A. L. Yuille, P. W. Hallinan and D. S. Cohen, "Feature Extraction from Faces using Deformable Templates", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 8, no. 2, 1992, pp. 99-111.

## Percepció de textures

Maria Vanrell

Unitat de Processament d'Imatges i d'Intel.ligència Artificial – Dep. d'Informàtica

Universitat Autònoma de Barcelona – 08193 Bellaterra (Barcelona)

Tel: (3) 581 21 66 - e-mail: maria@upisun1.uab.es

### Resum

La percepció de textures és un problema clàssic en visió computacional. En aquest treball es dóna una introducció de dos importants treballs realitzats en aquest tema i que han dirigit la meva línia de recerca. Primerament es presenta una introducció global sobre la definició del terme textura i una divisió general de totes les tècniques que s'han seguit per a tractar-lo. Seguidament es presenten més detalladament dos treballs, per una banda els estudis de B. Julesz sobre la discriminació de textures tractats amb experiments psicofísics. Ara bé aquest treball no aporta cap algorisme per a resoldre computacionalment el problema. Per tant, per altra banda presentem un model computacional complet de segmentació preatentiva de textures, que és el de J. Malik et al. i que s'ha basat en la integració de tots els resultats de Julesz i d'altres autors. Seguidament exposem algunes idees per incorporar aquest últim model en un sistema de visió activa com operador per a la detecció del gradient de textura, finalment presentem algunes millores sobre l'algorisme que fan que sigui totalment paral·lelitzable.

### 1 Introducció

La textura és el terme usat normalment per a caracteritzar la superfície d'un objecte. Per extensió en visió computacional s'ha anomenat textura a l'estímul visual que pot provocar aquesta superfície tot i que no només és la superfície de l'objecte que influeix en aquest estímul visual, també hi intervenen altres factors com la il·luminació, el punt de vista o l'escala amb la que la textura és percebuda. El gran nombre d'estímuls diferents que es poden considerar com una textura és tan ampli que fan que el problema sigui difícil de definir, una textura pot ser el resultat de la repetició d'un determinat patró, o una determinada distribució de nivells de grisos, o una orientació predominant, etc.

En visió computacional és interessant l'estudi de la textura ja que permet solucionar problemes de classificació i segmentació automàtica d'imatges, així com l'extracció d'informació 3-dimensional a partir de la deformació de la textura.

Hi ha hagut molts d'autors que han estudiat aquest problema i s'han desenvolupat mètodes per a poder solucionar problemes concrets. Existeixen interessants reculls de tots els treballs fets en aquest camp com [4, 14, 3, 11]. Tots els treballs es poden dividir en dos grans grups, aquells que han intentat veure una imatge amb textura com el resultat d'un procés dirigit per un determinat model, i els que descriuen una textura a partir de la mesura de certes característiques.

En els primers la textura ve definida pels paràmetres del model, així una textura pot ser una determinada distribució de regions homogènies o la realització d'un procés aleatori dirigit per una funció de distribució de probabilitat.

En els segons, basats en el càcul de certes mesures sobre la imatge amb la textura, la definició de la mesura depén de quin és el model d'imatge considerat. Així si es considera la imatge com el resultat d'un procés aleatori aleshores es calculen les probabilitats d'aparició de determinades combinacions de valors a la imatge, i sobre aquestes probabilitats es calculen mesures com la variança, l'entropia, etc. Si es considera la imatge com una superfície dins d'un espai 3-dimensional, aleshores es mesura la rugositat a partir de la curvatura de la superfície o el nombre de contorns per unitat d'àrea a partir del gradient de la imatge. Finalment si es considera la imatge com un senyal de dues dimensions es poden definir mesures com l'energia de la potència de l'espectre de Fourier.

Si bé tots aquests enfocaments són capaços de descriure o diferenciar certes textures, sempre es poden trobar imatges que no es puguin descriure completament. Anem ara a centrar-nos en les teories i models concrets en els que hem treballat.

# Robòtica i visió I

## 2 Teoria del textó

B. Julesz ha estat un dels autors més referenciats pel seu treball a partir d'experiments psicofísics. Aquests experiments s'han fet amb imatges sintètiques formades normalment per la repetició d'un patró.

Els seus experiments es basaven principalment en la búsquera de característiques que permetien que la discriminació entre dues regions amb textures diferents fos preatentiva. En un principi Julesz seguia la corrent *Gestaltista* de la psicologia que sostenia que la percepció visual és el resultat de càlculs estadístics globals de la imatge. Un estadístic de primer ordre representa la probabilitat de que punts llençats aleatoriament sobre la imatge caiguin sobre un determinat nivell de gris, de la mateixa manera un estadístic de segon ordre és la probabilitat de que parelles de punts separades una distància  $l$  i amb una orientació  $\theta$  caiguin sobre una determinada parella de nivells de gris de la imatge. Denotarem l'estadístic global d'ordre  $n$  de la textura  $X$  com  $E_n(X)$ .

Anem a veure les principals hipòtesis que plantejen els seus resultats. L'existència de textures com les de la figura 1 fa que es pugui donar aquesta primera hipòtesi.

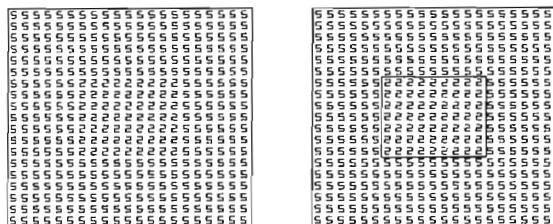


Figura 1: Exemple de dues textures no discriminables preatentivament, però que si ens fixem atentivament en cada un dels elements que la formen podem veure dues regions diferents.

**Hipòtesi 2.1** *Existeixen textures  $X$  i  $Y$  amb  $E_2(X) = E_2(Y)$ , tals que no són discriminables ràpidament però si que ho són si ens fixem en cada un dels elements que la formen. Llavors es pot dir que en el sistema visual humà es donen dos modes d'operació:*

1. *Visió preatentiva. Es realitza de forma instantània, en paral·lel, i cubrint un ampli camp visual.*
2. *Visió atentiva. Es produeix per una búsquera en sèrie i gràcies a la focalització local.*

Per altra banda l'existència d'aquestes textures li permet establir una nova hipòtesi.

**Hipòtesi 2.2** *Existeixen textures  $X$  i  $Y$  amb  $E_2(X) = E_2(Y)$  i  $E_3(X) \neq E_3(Y)$ , i que no són discriminables preatentivament, aleshores podem concloure que el sistema preatentiu humà no pot calcular els estadístics d'ordre 3 o més grans.*

I finalment dedueix l'existència dels textons, a partir de l'evidència de textures com les de la figura 2.

**Hipòtesi 2.3** *Existeixen textures  $X$  i  $Y$  amb  $E_2(X) = E_2(Y)$  i  $E_3(X) \neq E_3(Y)$ , i que són discriminables preatentivament, aleshores si tenim en compte la hipòtesi anterior podem dir que la discriminació és deguda al càlcul d'altres característiques locals, que anomenarem textons.*

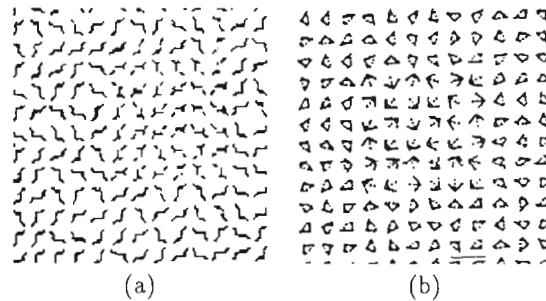


Figura 2: Parelles de textures amb estadístics de  $2n$ . ordre iguals, i que són fàcilment discriminables preatentivament (Aquestes imatges han estat preses dels treballs de B. Julesz).

Els estudis que segueixen es dirigeixen cap a definir quines característiques locals defineixen els textons. Experiments que el portaran a una darrera hipòtesi

**Hipòtesi 2.4** *En percepció de textures el sistema visual preatentiu utilitza només característiques locals visibles, textons, i els textons no són aparellats entre ells. El sistema preatentiu utilitza els textons només globalment de la manera més simple possible, això és comptant el seu número (densitat).*

El treball de B. Julesz i el seu equip es pot seguir en una sèrie d'importants articles ([7, 5, 6, 8]). Altres treballs posteriors han mostrat resultats que no són consistents totalment amb aquesta teoria del textó, però tot i així, el model del textó ha sentat les bases de la percepció preatentiva de textures.

### 3 Model basat amb bancs de filters

Com ja hem apuntat anteriorment la teoria de Julesz ha aportat resultats molt importants, però se li han fet algunes crítiques pel fet de no oferir un algorisme aplicable a imatges. En el intent de construir aquest algorisme a partir de la teoria de Julesz trobem el treball de H. Voorhees [13] o el que ja hem anomenat de J. Malik [9]. El nostre treball s'ha basat en construir un algorisme eficient per aquest últim, i és aquest model de segmentació preatentiva de textures que presentem en aquest apartat.

El model de J. Malik et al és el resultat de l'intent d'agrupar tots els treballs fets fins al moment per a dissenyar un model que segueixi els següents criteris:

- Plausibilitat biològica. Els diferents estats del models han de ser motivats i han de guardar consistència amb mecanismes fisiològics de visió que siguin coneguts.
- Generalitat. Ha de ser prou general perquè pugui ser aplicat a qualsevol imatge en nivells de grisos.
- Estar d'accord amb dades psicofísiques. La discriminació que pugui dur a terme el model ha d'estar d'accord amb el que es mesuraria psicofísicament.

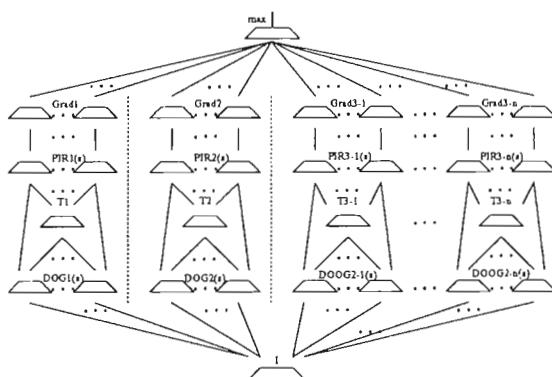


Figura 3: Esquema general del model de segmentació de textures de Malik et al.

L'esquema general del model ve donat en els següents tres estats:

**Estat 1** Es modelitzen les sortides de cel·les simples. La imatge es convolucionada amb un banc

de filtres lineals, que denotem com  $F_k$ , seguit d'una rectificació de mitjana. Aleshores tindrem un conjunt de respostes neuronals que representarem com  $R_i(x, y)$ , on  $i$  indica el canal amb el que s'ha convolucionat.

Distingirem la part positiva i negativa de la resposta de la següent manera:

$$R^+(x, y) = \max\{R(x, y), 0\}$$

$$R^-(x, y) = \max\{-R(x, y), 0\}$$

Aleshores el conjunt de respostes obtingudes, sobre la imatge  $I$ , serà:

$$R_{2k} = (I * F_k)^+(x, y)$$

$$R_{2k+1} = (I * F_k)^-(x, y)$$

Els filtres amb simetria central modelitzen les cel·les simples no orientades, i els filtres orientats en una direcció modelitzen cel·les simples sensibles a barres. La família de filtres usada és la DOG i DOOG, que forma els filtres a partir de diferències de gaussianes i gaussianes desplaçades.

**Estat 2** Consisteix en una inhibició no lineal, que elimina respostes débils quan hi ha respostes més importants en posicions acostades. La postinhibició l'expressem com

$$PIR_i(x_0, y_0) = \max_{x, y \in S_i(x_0, y_0)} k(R_i(x, y) - T_i(x, y))^+$$

on  $k = 1/(1 - \alpha_{ii})$  i  $S_i(x_0, y_0)$  és un veïnatge de mostreig, i  $T_i$  representa una transformació d'umbralització definida de la següent manera:

$$T_i(x_0, y_0) = \max_j \max_{(x, y) \in I_{ji}(x_0, y_0)} \alpha_{ji} R_j(x, y)$$

on  $I_{ji}$  és un veïnatge de  $(x_0, y_0)$ , en el que les neurones del canal  $j$  poden inhibir les neurones del canal  $i$ , i  $\alpha_{ji}$  és una mesura de l'efectivitat de la inhibició.

**Estat 3** Càcul del gradient de la textura, que es defineix com el màxim del gradient de totes les respostes de l'estat anterior, suavitzades amb una gaussiana  $G$  d'amplada  $\sigma'$ , això és

$$\max_i \|\nabla(PIR_i * G_{\sigma'})(x, y)\|$$

Des del punt de vista de les xarxes neuronals aquest mecanisme es pot veure com una variant de la xarxa *winner-take-all*.

A la figura 4 es pot veure el resultat d'aplicar aquest mecanisme, el gradient de textura obtingut ens dóna la detecció de les fronteres entre textures diferents, aleshores es pot veure aquest mecanisme com un operador global.

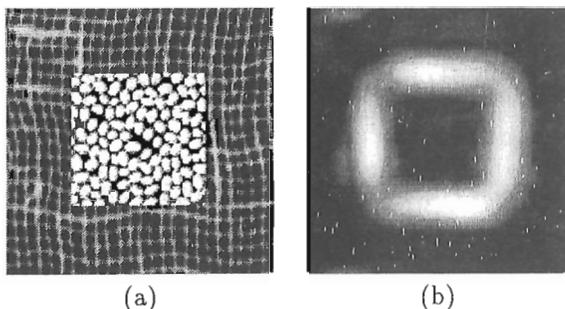


Figura 4: (a) Imatge original. (b) Gradient de textura detectat.

## 5 Millora de l'algorisme

En aquest apartat volem donar algunes idees per a la millora de l'algorisme explicat. No presentem resultats sinó simplement l'aplicació de certes propietats i operacions morfològiques per a que tots els estats de l'algorisme siguin millorats i puguin ser paral·lelitzables.

En el primer nivell del model es realitzen un gran nombre de convolucions amb un banc de filtres, a més a més gran part dels filtres són orientats amb diferents angles. Per a la implementació d'aquest pas, bé es poden tenir tots els filtres generats a l'espai de Fourier, o bé s'han d'anar generant segons quins siguin els rangs d'escales i d'orientacions que es requereixin en cada moment. Evidentment aquesta decisió depén de l'arquitectura de la màquina en la que s'hagi de treballar.

Si els filtres s'han d'anar generant en temps real aleshores és interessant l'optimització d'aquesta generació, en els filtres amb simetria central es pot aprofitar aquesta propietat en la generació, i pels filtres orientables és interessant elegir famílies que compleixin la propietat de ser *direccional*s [2],

**Definició 5.1** Una funció  $f(x, y)$  és *direccional* si es pot escriure com una suma lineal d'un conjunt de versions rotades d'ella mateixa, això és:

$$f^\theta(x, y) = \sum_{j=1}^M k_j(\theta) f^{\theta_j}(x, y)$$

les derivades parcials de la gaussiana és una família que té aquesta propietat i que presenta la simetria parell, que requereix el model.

En el segon nivell es pot introduir una millora molt important si s'introduceix una operació morfològica com la dilatació pel càlcul del màxim d'un entorn de radi donat.

$$(f \oplus \tilde{B})(\vec{x}) = \max_{\vec{y} \in B_{\vec{x}}} f(\vec{y})$$

Per a que aquesta operació sigui més òptima es pot usar la propietat de la recursitat de la dilatació

$$A \oplus B = (((((A \oplus B^1) \oplus B^2) \dots) \oplus B^n))$$

$$\text{on } B = B^1 \oplus B^2 \oplus \dots \oplus B^n$$

de manera que fent servir una bona descomposició de l'element estructurant de radi donat, es poden aconseguir costos molt baixos i algoritmes completament paral·lelitzables ([15, 10, 12]), tant per arquitectures vectorials com *pipeline*.

## 4 Visió activa

Els sistemes de visió activa ([1]) depenen en gran part de mecanismes d'atenció. Aquests poden ser realitzats bé per components dependents del contexte, o bé per components lliures de contexte. Si considerem el model de Malik et al. com un operador per detectar gradients de canvis de textura, aleshores tenint en compte com ha estat dissenyat pels seus autors vindria a ser un operador d'atenció lliure de contexte, ja que en la seva definició es consideren tots els rangs d'escales que representen freqüències percebudes pel sistema visual humà.

Ara bé aquí volem presentar aquest operador com una component dependent del contexte, aleshores el canvi del rang d'escala dels filtres que intervenen pot permetre obtenir respostes diferents, permetent obtenir fronteres més o menys acurades en determinades regions de la imatge.

Aleshores els objectius del propi sistema de visió activa determinarien la regió de la imatge on es vol trobar el gradient de textura i segons el valor de l'escola òptima de la regió determinar quins han de ser els paràmetres de l'operador de detecció de gradient textural.

És evident que qualsevol mecanisme que s'incorpori a un sistema de visió activa ha de ser ràpid, per això un dels primers problemes en els que s'ha treballat és en la millora de l'algorisme.

## 6 Conclusions

En aquest article s'ha donat quina és la línia de recerca en la que estic treballant en el problema de la percepció de textures. Per això s'han introduït les idees generals del problema i ens hem centrat en la teoria de Julesz com a principal referent teòric del problema i el model de J. Malik com a model computacional. Tenint en compte aquestes referències, els objectius que estan dirigit el meu treball es poden resumir en:

- L'estudi del mecanisme de Malik et al. com a operador de detecció de gradient textural i l'estudi del seus paràmetres per a millorar els resultats en un entorn controlat per un sistema de visió activa.
- Dirigir la millora dels algorismes per a que la seva integració en un sistema que treballi en temps real sigui possible.

Finalment tots els paràmetres i el mecanisme en si s'ha d'adaptar per a poder treballar en un entorn on sigui dirigit tant per processos de baix nivell com d'alt nivell.

## Referències

- [1] Yiannis Aloimonos. *Active Perception*. Lawrence Erlbaum Associates, 1993.
- [2] W.T. Freeman and E.H. Adelson. The design and use of steerable filters. *PAMI*, 13-9:891-906, 1991.
- [3] L.van Gool, P. Dewaele, and A. Oosterlinck. Survey: Texture analysis anno 1983. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 29:336-357, 1985.
- [4] R.M. Haralick. Statistical and structural approaches to texture. In *Proceedings of de IEEE*, pages 304-322, May 1979.
- [5] B. Julesz. Textons, the elements of texture perception, and their interactions. *Nature*, 290:91-97, 1981.
- [6] B. Julesz, E.N. Gilbert, and J.D. Victor. Visual discrimination of textures with identical third-order statistics. *Biological Cybernetics*, 31:137-140, 1978.
- [7] B. Julesz and J.R.Bergen. Textons, the fundamental elements in preattentive vision and perception of textures. *Bell Systems Technical Journal*, 62:1619-1645, 1983.
- [8] B. Julesz and B. Kroze. Features and spatial filters. *Nature*, 333:302-303, 1988.
- [9] J. Malik and P. Perona. Preattentive texture discrimination with early vision mechanisms. *Journal of the Optical Society of America*, 7:923-932, 1990.
- [10] Hochong Park and Roland T. Chin. Decomposition of arbitrarily shaped morphological structuring elements. *IEEE Trans. on PAMI*, 17(1):2-15, 1995.
- [11] M. Tuceryan and A.K. Jain. *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision*, chapter 2.1, pages 235-276. 1993.
- [12] Maria Vanrell. Descomposició general d'elements estructurants: Aplicació a la descomposició de discs. Technical Report 2, CVC, 1995. En procés.
- [13] H. Voorhees and T. Poggio. Computing texture boundaries from images. *Nature*, 333:364-367, 1988.
- [14] Harry Wechsler. Texture analysis - a survey. *Signal Processing*, 2:271-282, 1980.
- [15] Jianning Xu. Decomposition of convex polygonal morphological structuring elements into neighborhood subsets. *IEEE Trans. on PAMI*, 13(2):153-162, 1991.

# Robòtica i visió I

## Sistemes Actius de Visió.

F.X. Roca

Unitat de Processament d'Imatges i Intel·ligència Artificial - Dep. d'Informàtica

Universitat Autònoma de Barcelona - 08193 Bellaterra (Barcelona)

Tel: (3) 581 27 77 - e-mail: xavir@upisun1.uab.es

### Resum

Aquesta comunicació presenta una introducció d'un nou paradigma dintre de la visió computacional, *Animate Vision* o *Active Vision*. Aquest paradigma es diferencia de l'enfoc clàssic, pel fet de que no preten recuperar tota l'informació de l'escena. L'habilitat de controlar dinàmicament els paràmetres d'adquisició d'una imatge ens ajuda a simplificar els problemes de baix nivell. La darrera part de la comunicació el dediquem a presentar el sistema base d'experimentació.

## 1 Introducció

La visió és un sensor fonamental d'adquisició d'informació per a molts animals i essers humans. La visió juga, per tant, un paper fonamental en els temes de robòtica avançada.

En molts casos estem acostumats a pensar que la tasca de la visió és la de construir escenes físiques del món a partir d'informació bidimensional que obtenim a través d'un sensor.

Recentment [2, 1, 3], ha anat prenent més força un nou paradigma que s'ha anomenat *Active Vision* o *Animate Vision*. Aquesta nova visió sobre la visió postula que aquesta s'ha d'entendre en el contexte dels comportaments visuals on el sistema visual està immers, aquest comportament no requereix reconstrucció general del món 3-D [10].

Aquest paradigma estudia l'estructura i les funcions del sistema visual humà per tal d'incloure-les en sistemes artificials. Tots els sistemes visuals animals tenen dos sensors (ulls), on cada un d'ells es distingeix en comparació amb les càmeres electròniques per la virtut de tenir molta millor resolució en una petita regió aprop de l'eix òptic. Aquesta regió és anomenada fovea. Sobre aquesta regió la resolució és millor en un ordre de magnitud que en la perifèria. Una característica d'aquest disseny és la capacitat de simultanejar les dues representacions: alta resolució i ampli camp de visió.

Amb les reduïdes dimensions de la fovea no és estrany que el sistema visual tingui uns graus de llibertat que ens permetin posicionar l'objecte sobre aquesta zona, moviments que ens permeten que l'eix òptic estigui perpendicular a l'objecte que estem parant atenció.

## 2 Control de la mirada

Per tant els sistemes visuals animals tenen unes característiques molt concretes tals com la binocularitat, foveies i un control sobre la mirada, que si els sistemes visuals que construim les incorporen podem obtenir certes avantatges computacionals. Quan un sistema incorpori aquestes particularitats direm que té característiques antropomòrfiques.

Deixant de banda les qüestions purament morfològiques, el fet de tenir dos ulls i que aquests tinguin una regió central d'alta resolució, podem considerar que bàsicament la percepció visual com un conjunt de *comportaments* que es manifesten en els essers vius superiors per tal d'aconseguir els seus objectius dins d'un entorn dinàmic. Aquests comportaments reben el nom de *processos oculars primaris (POP)* o de manera general *control de la mirada*.

El mecanismes pel control de la mirada canvien de manera fonamental els models computacionals de la visió. Sense ells el sistema visual pot treballar de manera aïllada, amb una càrrega adicional per solucionar problemes amb molts nivells de llibertat. Per contra si utilitzem aquest POP, obtenim una

# Robòtica i visió I

Manteniment mirada		Canvi mirada
Objectiu en repòs	Objectiu en moviment	
<u>Estabilització</u> : sistema per compensar els moviments del cap. Utilitza coneixement de l'acomodació i la vergència.	<u>Vergència</u> : sistema per moure els ulls en direccions oposades per controlar la distància del objecte i aconseguir que les fovees tinguin una projecció del mateix objectiu.	<u>Seguiment</u> : Un sistema per seguir objectes en moviment a partir de generar senyals de control suaus.

Taula 1: Procesos immersos en un sistema de control de la mirada en primats

62

nova concepció de la visió, en el que els càlculs visuals estan interconnectats amb tot el comportament motriu-sensorial. Es trenca l'esquema que conceveix el procés visual separat del procesament cognitiu o el procesament motriu, els sensors donen percepció per informar al comportament del ser, i les accions motrius fan al ser un observador dinàmic utilitzant els màxim rendiments dels sensors. Aquesta idea és la que s'ha anomenat la retroalimentació visual, *feedback visual*. Un corollari [6] d'aquesta idea és que els sensors i els motors que els mouen han de ser considerats conjuntament per arribar a la descripció d'un sistema de percepció. Una manera de veure això es veure cada ser com un sistema sensor-motor, que està compost de percepció, control i actuadors aquest paradigma rep el nom [2] de *percepció activa*.

Aquesta habilitat de tenir un control sobre els processos d'aquisició ens permet simplificar computacionalment els processos de baix nivell, *early vision*. Però quines són les tasques que ens permeten realitzar aquestes simplificacions? En la taula 1 podem veure els moviments que té el sistema ocular que ens permeten controlar la mirada sota diferents circumstàncies. A part hi ha un sistema d'*acomodació* que actua sobre l'enfoc de les lents.

### 3 Manteniment de la mirada

Hi ha varietat de motivacions [6] tan a nivell perceptual com de comportament per tal d'incorporar el manteniment de la mirada en sistemes automàtics de visió:

- Visió foveal: la necessitat d'iniciar els sensors amb resolució no uniforme a robots [9] per tal d'obtenir imatges d'alta resolució sobre la zona de treball, crea la necessitat de tenir sistemes capaços de mantenir els objectius dintre d'aquestes zones.
- Desenfoc per moviment: el desenfoc d'una imatge produït pel moviment ens pot ajudar (es pot comprovar fàcilment, si fixem la mirada en un objecte aquest sempre queda nítid respecte els altres en moviment), a trobar l'objecte d'interès dintre l'escena que estem mirant.
- Facilita l'estereo: la vergència facilita la fusió estereo, ja que, els punts de fixació tenen disparitat zero.
- Indexació visual: podem "agafar", "dirigir-nos cap a", "esquivar", etc. l'objecte que estem mirant, aquell que estem projectant sobre la fovea.

Els algorismes que apliquem per realitzar aquestes tasques de manteniment de la mirada han de ser el més generals possibles, no han de requerir un coneixement previ de l'objecte. La principal característica del sistema visual humà es l'alta velocitat dels mecanismes de control d'aquest processos, per tant, els

# Robòtica i visió I

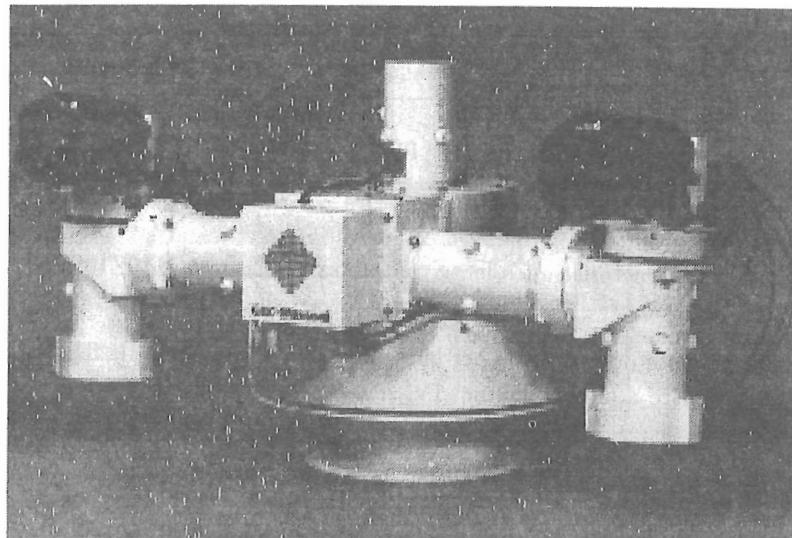


Figura 1: GEC-Marconi RTGC400

Pan	Tilt	Vergència
Moviment horitzontal esquerra dreta ( $\pm 190$ ) velocitat 200 graus/s	Moviment vertical a-dalt abaix (-35,+65) velocitat 200 graus/s precisió de 0.1 graus	Moviment horitzontal independent per cada càmera ( $\pm 25$ ) velocitat 120 graus/s

Taula 2: Característiques plataforma rtgc400.

63

temps amb els que han de respondre aquests algorismes han de ser baixos, és a dir, no podem perdre temps reconeixent l'objecte (a part podem comprovar que nosaltres mateixos som capaços de mantenir la mirada sobre un objecte no conegut, fins que el nivells superiors del sistema visual humà no són capaços de reconeixer'l).

Aquest sistemes s'han de basar en informació que prové de fonts on no hi ha coneixement sobre què estem mirant, informació anterior al reconeixement de l'objecte, aquestes fonts s'anomenen *cues precategòriques*. Les cues visuals sobre les que es basaran aquests algorismes seran: la disparitat, l'enfoc i la detecció del moviment.

L'objectiu d'aquesta tesi és la de construir un sistema capaç de mantenir la mirada sobre un objecte amb l'únic coneixement que els eixos òptics de cada una de les càmeres estan apuntant a l'objecte.

## 4 La plataforma de treball

El treball es realitza sobre un sistema desenvolupat per GEC-Marconi [7]. Amb un total de quatre graus de llibertat, les característiques tècniques es poden veure a la taula 2. A part aquesta plataforma incorpora dues lens motoritzades de la casa Ernitec M10Z10SP amb tres graus de llibertat cada una. A la taula 3 podem veure les seves característiques. Tot això fa que la plataforma de treball, *head-eye system* tingui un total de 10 graus de llibertat. Les càmeres són de la casa SONY model XC-75CE. Actualment es distingeixen dos grans famílies de caps:

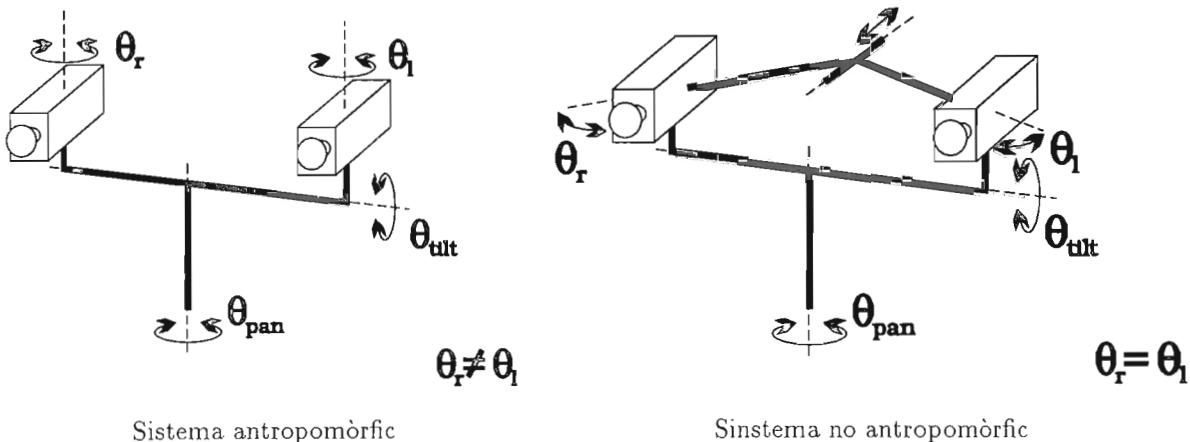
1. No antropomòrfics [8, 5] sistemes que no consideren aspectes fonamentals del paradigma de la visió animada; temps real, disseny, etc.

# Robòtica i visió I

Focus	Iris	Zoom
1m-∞	1:1.6	10-100mm
Temps per anar de punta a punta 2.2s		

Taula 3: Característiques lents motoritzades Ernitec M10Z10SP.

2. Antropomòrfics [6, 11] sistemes inspirats per la bibliografia provenint de la fisiologia dels moviments oculars [4] i l'afinitat entre aquests sistemes i el sistema ocular humà.



64

El concepte de disseny més important que diferencia a les dues famílies és el que podem observar a les dues últimes figures, el concepte de vergència assimètrica.

La figura 2 descriu la configuració *hardware* del sistema complet, sobre el que hem de desenvolupar el treball experimental. La placa d'adquisició COMET capture les imatges provinents de les càmeres. Sobre aquestes imatges s'apliquen tots els processos ooculars primaris, utilitzant DSPs. Tot això està coordinat per un PC que interpreta els senyals visuals per tal de produir les comandes apropriades que són enviate via RS-232 per tal d'ordenar els moviments adients als actuadors.

## 5 Aplicacions

Molts dels robots utilitzats actualment en les indústries estan programats específicament per la tasca que realitzen i el tipus de control que utilitzen està en llaç obert, això implica que el robot no utilitza cap realimentació d'informació per tal d'adaptar les seves accions debant de canvis en l'entorn de treball. Qualsevol sistema complexe de visió que es basi en aquesta idea inicial pot ser una bona aplicació d'aquest sistema.

- Tracking: seguiment de qualsevol objecte en moviment.
- Purposive Vision: en el nivell més baix del sistema visual aquest extreu un conjunt de primitives (mapa de característiques). El següent nivell combina les primitives, aquesta combinació la podem dirigir per tal de trobar un tipus d'objectes concrets o per realitzar una tasca amb un propòsit determinat, eliminant aquella informació que no sigui necessària.
- Navegació: la possibilitat de incorporació del cap sobre una plataforma mòbil com a font d'informació.
- Mesures: una plataforma activa es pot utilitzar com a base per realitzar mesures sobre una escena.

# Robòtica i visió I

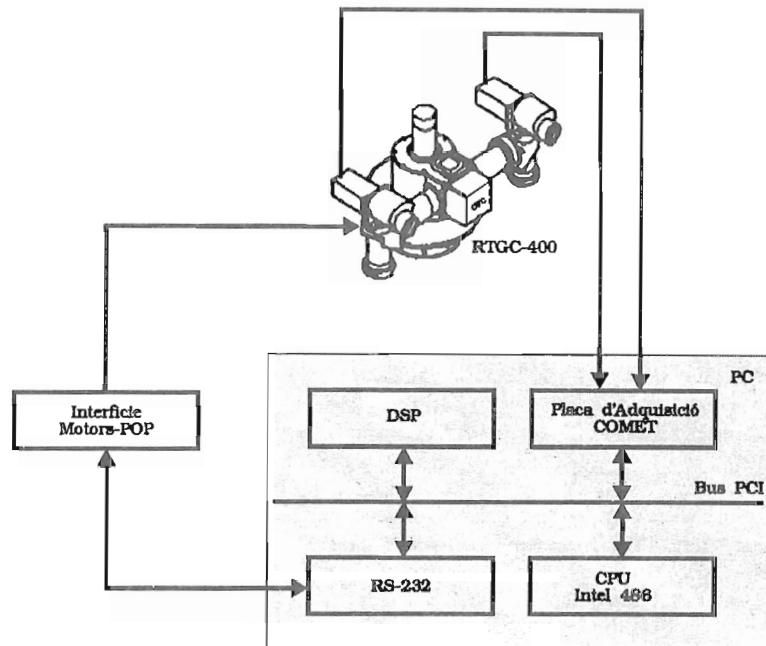


Figura 2: Esquema general del sistema

## Referències

- [1] Y. Aloimonos, I. Weiss, and A. Bandopadhyay, "Animate vision," *Int. J. Comp. Vision*, vol. 2, pp. 333–356, 1988.
- [2] R. Bajcsy, "Active perception vs. passive perception," in *Proc. 3rd IEEE Workshop on Vision*, pp. 55–59, 1985.
- [3] D. Ballard, "Animate vision," *Artificial Intelligence*, vol. 48, pp. 57–86, 1991.
- [4] R. Carpenter, *Movements of the eyes*. Pion, 1988.
- [5] J. Clark and N. Ferrier, "Modal control of an attentive vision system," in *Proc. 2nd Int. Conf. Computer Vision*, pp. 37–42, 1988.
- [6] D. Coombs, *Real-Time Gaze Holding in Binocular Robot Vision*. PhD thesis, Computer Science, University of Rochester, 1992.
- [7] A. P. Division, "Rtgc400, technical manual," tech. rep., GEC-Hirst Research Center, 1994.
- [8] E. Krotkov, *Active Computer Vision by Cooperative Focus and Stereo*. Springer-Verlag, 1989.
- [9] R. Manzotti, R. Tiso, E. Grossi, and G. Sandini, "Primary ocular movements," tech. rep., LIRA-Lab, DIST University of Genova, 1994.
- [10] D. Marr, *Vision*. W. H. Freeman and company, 1982.
- [11] K. Pahlavan, *Active robot vision and primary ocular processes*. PhD thesis, Active Perception Laboratory, Royal Institute of Technology, Sweden, 1993.

# ROBÒTICA I VISIÓ II

Josep Lladós

J. R. Serra

Pablo Jiménez Schlegl

Aleix Martín

# Robòtica i visió II

## Interpretació de dibuixos lineals mitjançant tècniques d'isomorfisme entre grafs

Josep Lladós

Unitat de Processament d'Imatges i Intel·ligència Artificial

Departament d'Informàtica - Edifici C - Universitat Autònoma de Barcelona.

08193 Bellaterra (Barcelona)

tel. (3) 581 18 62 - e-mail: josep@upisun1.uab.es

### Resum

L'anàlisi de documents té com a objectiu la interpretació automàtica de documents impresos sobre paper, amb la finalitat d'obtenir una descripció simbòlica d'aquests, que permeti el seu emmagatzematament i posterior tractament computacional. Les tècniques basades en grafs relacionals d'atributs permeten representar de manera compacta la informació continguda en dibuixos lineals i, mitjançant mecanismes d'isomorfisme entre grafs, reconèixer-hi certes estructures i, d'aquesta manera, interpretar el document. En aquest treball es dóna una visió general de les tècniques de grafs aplicades al reconeixement visual d'objectes en problemes d'anàlisi de documents. Aquestes tècniques s'illustren amb un exemple de reconeixement de plànols dibuixats a mà alçada. Finalment es proposa la utilització de tècniques de Hough com a mecanisme per a accelerar el procés de reconeixement aplicant un cert coneixement sobre el domini en el que es treballa.

### 1 Introducció

Tradicionalment, l'home ha emmagatzemat i tramès la informació utilitzant documents sobre paper. L'aparició de la informàtica ha possibilitat la introducció d'un nou concepte de document: el *document electrònic*. Actualment, els sistemes de disseny assistit per ordinador (CAD) constitueixen una eina de gran ajut en la creació i modificació d'aquests documents. Però existeix el problema invers: convertir documents sobre paper a un format integrable dins d'un sistema CAD. El camp de l'*anàlisi de documents* treballa amb aquest objectiu mitjançant la utilització de tècniques de processament d'imatges i de reconeixement de formes aplicades sobre digitalitzacions de documents sobre paper. En aquest treball ens centrem en el reconeixement d'elements gràfics del document, entenent per elements gràfics aquelles parts de la imatge formades per conjunts de línies i regions omplertes amb una certa textura. L'objectiu serà interpretar el dibuix i reconèixer les entitats d'alt nivell que l'integren, comptant amb el suport d'un cert coneixement sobre el domini en el que es treballi. Una vegada interpretat el document, serà possible editar-lo en un sistema CAD per a poder-lo modificar o integrar en altres documents.

Un sistema d'anàlisi i interpretació de documents gràfics es pot descomposar en tres nivells (figura 1). El *nivell lèxic* extreu les primitives de baix nivell que constitueixen el dibuix lineal (línies rectes, arcs de circumferència, punts d'intersecció, punts extrems i punts d'inflexió) i les seves propietats geomètriques

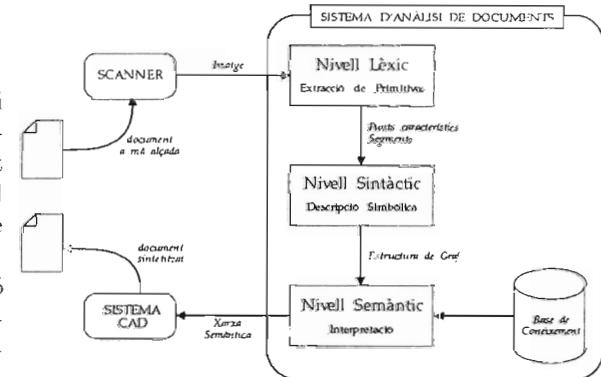


Figura 1: Nivells d'un sistema d'anàlisi de documents gràfics.

i topològiques. El *nivell sintàctic* estableix les relacions estructurals entre les primitives de baix nivell i proporciona una representació simbòlica del document. L'objectiu del *nivell semàntic* és interpretar el document. Això voldrà dir reconèixer els elements constituents d'aquest amb l'ajut d'una base de coneixement dependent del domini al que pertanyi el document. Aquesta base de coneixement estarà formada per models de formes a reconèixer, restriccions geomètriques i topològiques que s'han de satisfer, etc.

En aquest treball ens centrem en el nivell semàntic que consisteix, com s'ha esmentat, en el reconeixement d'estructures complexes. Els *grafs relacionals d'atributs* permeten representar de manera eficient i compacta aquestes estructures i converteixen el problema del reconeixement en un pro-

# Robòtica i visió II

blema de correspondència entre grafs. Diferents problemes de reconeixement de dibuixos lineals han estat plantejats des d'aquest punt de vista [2][5][6] per a diferents àmbits tècnics com la cartografia, el disseny electrònic, mecànica, etc. La interpretació final del document s'emmagatzema en termes d'una xarxa semàntica de la qual els grafs esmentats en formen part.

El present treball està organitzat de la següent manera: a la secció 2 es descriuen els mètodes de correspondència entre grafs, a la secció 3 es proposen mètodes basats en tècniques de Hough per a accelerar el procés de reconeixement. La secció 4 il·lustra els mètodes exposats amb una aplicació dins de l'àmbit de l'arquitectura. Finalment, a la secció 5 es presenten les conclusions i les línies de continuació dins del treball de tesi en el que s'emmarquen els processos descrits.

## 2 Representació de dibuixos lineals amb estructures de grafs

### 2.1 Definicions i notació

70

Un *graf relational d'atributs*  $G$  és una 4-pla  $(V, E, L_V, L_E)$  on  $V$  és un conjunt finit d'elements, anomenats nodes;  $E$  és un conjunt finit de parells d'elements de  $V$ , anomenats arcs;  $L_V$  i  $L_E$  són dues funcions, anomenades funcions d'etiquetatge, definides com  $L_V : V \rightarrow \Sigma \times A^k$  i  $L_E : E \rightarrow \Sigma \times A^k$ , on  $\Sigma$  és un conjunt finit d'etiquetes simbòliques i  $A$  és un conjunt finit de valors d'atributs, és a dir, a cada node (arc) del graf se li assigna una etiqueta i un conjunt de valors d'atributs que el caracteritzen. Un graf  $G' = (V', E', L'_V, L'_E)$  és un *subgraf* de  $G$  (denotat per  $G' \subseteq G$ ) si  $V' \subseteq V$  i  $E' \subseteq E$ . Denotarem per  $|V|$  el número de nodes de  $V$  i per  $|E|$  el número d'arcs d' $E$ . Utilitzarem, per simplicitat,  $G = (V, E)$  en lloc de  $G = (V, E, L_V, L_E)$  sempre i quan no hi hagi confusió.

Una funció  $f : V \rightarrow V'$  és un *isomorfisme entre grafs* de  $G = (V, E, L_V, L_E)$  a  $G' = (V', E', L'_V, L'_E)$  si  $f$  és bijectiva i es compleix:

1.  $L_V(v) = L'_V(f(v))$  per tot  $v \in V$ .
2.  $L_E(\epsilon) = L'_E(\epsilon')$  per qualsevol arc  $\epsilon = (v_i, v_j) \in E$  i  $\epsilon' = (f(v_i), f(v_j)) \in E'$ .
3. Per tot arc  $\epsilon' = (v'_i, v'_j) \in E'$  existeix un arc  $\epsilon = (f^{-1}(v'_i), f^{-1}(v'_j)) \in E$  tal que  $L_E(\epsilon) = L_E(\epsilon')$ .

### 2.2 Isomorfisme entre subgrafts com a procés de reconeixement

Un graf d'atributs permet emmagatzemar de manera eficient i compacta un dibuix lineal, fent corres-

pondre els punts característics del document amb els nodes del graf i les línies del document amb els arcs. D'aquesta manera, reconèixer estructures complexes dins del document consistirà en aplicar un isomorfisme entre subgrafts, concretament, buscar el graf que representa el model a reconèixer com a subgraf del graf que representa el document d'entrada. A aquests dos grafs els anomenarem respectivament *graf model* ( $G_M$ ) i *graf d'entrada* ( $G_I$ ).

Hi ha dos inconvenients que cal assenyalar per a l'isomorfisme entre subgrafts. El primer és la seva complexitat computacional (pertany a la classe de problemes NP-complets). El segon inconvenient és que moltes vegades es treballa amb informació que conté soroll, la qual cosa provoca que una correspondència exacta entre grafs no sigui viable i s'hagi de recórrer a tècniques de correspondència inexacta. Aquest segon problema és especialment sensible en interpretació de documents que han estat fets a mà alçada com en l'exemple de la secció 4.

#### 2.2.1 Correspondència exacta entre grafs

La correspondència exacta entre grafs ( $EGM$ ) pot ser resolta mitjançant algorismes clàssics de cerca amb *backtracking* dins d'un arbre. L'arbre de cerca comença amb el primer node  $v_M^1 \in V_M$ . Aquest node pot correspondre potencialment a qualsevol node  $v_I^j \in V_I$ . Cadascuna d'aquestes assignacions potencials és un node de nivell 1 de l'arbre. L'algorisme tria un d'aquests nodes i fa l'assignació  $f(v_M^1) = v_I^j$ . A continuació es selecciona el següent node  $v_M^2 \in V_M$  i es construeixen les hipòtesis de segon nivell. En aquest nivell, ja no es té en compte aquelles assignacions que violen les condicions necessàries per a l'isomorfisme. El procés continua fins al nivell  $|V|$  de l'arbre. Un camí des de l'arrel fins a una fulla exitosa de l'arbre defineix un isomorfisme.

El cost exponencial del mètode exposat fa necessària la utilització de criteris heurístics d'esporgat. Una de les tècniques més conegudes per a fer aquest esporgat és la *relaxació discreta* que redueix el problema de l'isomorfisme entre subgrafts al problema de l'*etiquetatge consistent* [3]. El problema d'etiquetatge es pot enunciar de la següent manera:  $O$  és un conjunt d'objectes a identificar,  $L$  és un conjunt d'etiquetes que representen hipòtesis sobre la identificació dels objectes i  $R$  és un conjunt de restriccions entre els parells objecte-etiqueta. L'objectiu és el d'obtenir un conjunt  $H$  d'hipòtesis que assignin una etiqueta a cada objecte satisfent les restriccions. En el cas de l'isomorfisme entre grafs, els objectes a etiquetar són els nodes model, les etiquetes es construeixen a partir dels nodes del graf d'entrada i el graf model es pot entendre com un graf de restriccions. Aquestes restriccions estan

## Robòtica i visió II

basades en els arcs del graf i representen condicions geomètriques i topològiques que han de complir els nodes en connectar-se. Des d'aquest punt de vista, a [3] el problema d'etiquetatge consistent es descomposa en tres passos:

- *Consistència de nodes:* cada node model s'etiqueta amb tots els nodes del graf d'entrada que poden correspondre-li. L'etiquetatge es basa en criteris topològics (número d'arcs que hi confluixen) i criteris geomètrics (configuració del node, és a dir, disposició dels arcs que hi confluixen).
  - *Consistència d'arcs:* Es verifica la consistència entre els etiquetatges de dos nodes veïns i s'eliminen tots aquells que són inconsistents. L'algorisme *AC4* [8], basat en tècniques de relaxació discreta, és un dels més utilitzats per aquest propòsit.
  - *Consistència de camins:* es busca un conjunt d'etiquetes globalment vàlides per als nodes model. Aquest conjunt d'etiquetes es consideren com la solució global. Aquest procés es pot fer mitjançant un algorisme de *backtracking with forward checking* que consisteix en tenir en compte, per a cada node de l'arbre de cerca, els parells node-etiqueta futurs que són inconsistents amb l'actual i, per tant, no obrir branques de l'arbre que portin cap a aquest etiquetatge inconsistent.

### 2.2.2 Correspondència inexacta entre grafs

Hi ha casos en els quals pot haver-hi distorsions en els grafs (manca de nodes o arcs, divisió d'aquests, etc.). Aquestes distorsions poden ser degudes a diferents factors: deficient adquisició de la imatge, dibuix a mà alçada, poca robustesa del procés de vectorització, obtenció del graf model mitjançant una generalització de diferents instàncies (aprenentatge inductiu), etc. Això vol dir que determinats nodes o arcs del model poden no tenir correspondència sobre el graf d'entrada o que els seus atributs poden aparèixer sensiblement diferents. Tanmateix, aquesta distorsió no ha de ser inconvenient per a que el model no sigui reconegut. Això farà necessària la utilització de tècniques de correspondència inexacta entre grafs (*IGM*). El problema d'*IGM* es pot entendre com el de trobar el subgraf  $G_S \subseteq G_I$  que més s'assembla al model  $G_M$  en termes d'una distància entre ells inferior a un cert valor  $d$ . La distància d'*edició* per a *strings* [1] pot ser generalitzada i utilitzada com a distància entre grafs. Per a calcular aquesta distància es proposen les següents operacions d'*edició* que serveixen per a transformar un graf  $G = (V, E)$  en un altre:

1. Reetiquetatge d'un node o un arc. Consisteix en canviar la seva etiqueta i el valor

dels seus atributs  $a_1, \dots, a_k$ . Es denota per  $((v, l, a_1, \dots, a_k) \rightarrow ((v, l', a'_1, \dots, a'_k)))$ .

2. *Esborrat d'un node o un arc.* Es denota per  $v \rightarrow \Lambda$ . Cal tenir en compte que l'esborrat d'un node implica l'esborrat de tots els arcs que hi confluixen.
  3. *Inserció d'un node o un arc.* Denotat per  $\Lambda \rightarrow v$ . Només es pot inserir un arc si existeixen els vertexs adjacents.

Es defineix una funció de cost  $c : (a \rightarrow b) \rightarrow \mathbb{R}^+$  com la funció que assigna un cost a cadascuna de les operacions d'edició esmentades. El cost d'una seqüència  $S = s_1, \dots, s_n$  d'operacions d'edició serà per tant  $c(S) = \sum_{i=1}^n c(s_i)$ . La distància entre dos grafs  $G$  i  $G'$  es defineix com  $dist(G, G') = \min\{c(S), S \text{ és una seqüència d'operacions d'edició que transforma } G \text{ en } G'\}$ . Aquesta distància pot ser computada mitjançant tècniques de *programació dinàmica*.

Com es veurà en l'exemple presentat més endavant, les tècniques de relaxació també permeten dur a terme un *IGM* sempre i quan es tinguin en compte les possibles distorsions del graf dins del conjunt de restriccions  $R$ .

### 3 Acceleració del reconeixement utilitzant tècniques de Hough

Sovint, els dibuixos lineals que ens ocupen contenen, a més dels símbols a reconèixer, certes regions omplertes amb una textura estructurada. En aquesta secció ens centrem en el cas més simple de textura que és el constituït per línies rectes paralles i equiespaiades. En aquest cas, detectar i eliminar les línies que formen part d'aquest omplert comporta l'eliminació del graf d'entrada de diversos nodes i arcs. El cost de la correspondència entre grafs és, en el cas pitjor,  $O(|V_1|^{IVM})$ . Si, partint del coneixement que es té sobre el tipus de documents a tractar, es pot eliminar una sèrie de nodes i arcs que no pertanyen a cap model a reconéixer degut a que formen part de les regions esmentades, podrem accelerar el reconeixement que, com hem vist, és inherentment exponencial. La detecció de línies paralles dins d'un dibuix lineal es pot fer utilitzant la transformació de Hough exposada a continuació.

### 3.1 Transformació de Hough bàsica

La transformació bàsica de Hough per a detecció de línies rectes es basa en el següent: donat un punt de l'espai euclidi  $(x, y)$ , l'equació  $\rho = x\cos\theta + y\sin\theta$  representa el conjunt de rectes que passen per ell. El mètode fa un canvi de coordenades calculant, per

# Robòtica i visió II

cada punt de la imatge original, el conjunt de rectes que passen per ell, representant-les a l'espai  $(\theta, \rho)$ . Així, un punt de l'espai  $(\theta, \rho)$  representa una recta a l'espai  $(x, y)$ . El procés consisteix en recórrer tots els punts de l'espai  $(x, y)$  (imatge inicial) i, per cadascun d'ells, incrementar els respectius  $(\theta, \rho)$  corresponents a les rectes que passen per aquest punt. Al final del procés, els punts  $(\theta, \rho)$  "més votats", corresponen a les rectes a les quals pertanyen més punts, per tant, fent la transformació inversa dels màxims de l'espai  $(\theta, \rho)$  obtenim les rectes a l'espai  $(x, y)$ . Partint d'aquesta idea bàsica, s'ha proposat diferents extensions que tenen per objectiu detectar objectes d'una imatge que poden ser descrits donant valors als paràmetres d'una equació (veure recull a [4]).

## 3.2 Transformació de Hough per a la detecció de línies paral·leles

La detecció de línies paral·leles dins d'un dibuix lineal vectoritzat mitjançant un graf d'atributs es redueix a la detecció d'arcs paral·lels del graf. Suposem que, per a qualsevol arc  $e$  que aproxima una línia recta, la funció d'etiquetatge li fa corresponder com a atributs les coordenades polars d'aquesta recta ( $L_E(e) = (\text{recta}, \theta_e, \rho_e)$ ). En aquest cas, cada arc del graf acumula un vot a l'espai  $(\theta, \rho)$ . Com es pot observar a la figura 2, els arcs paral·lels del graf generen un conjunt de punts aliniats verticalment i equiespaciats a l'espai  $(\theta, \rho)$ . La distància ( $\Delta\rho$ ) entre aquests punts correspon a la distància entre els arcs paral·lels i la coordenada  $\theta$  sobre la que estan aliniats correspon a la inclinació d'aquests arcs. Per tant, detectar regions formades per arcs paral·lels dins d'un graf es redueix a buscar, dins l'espai  $(\theta, \rho)$ , configuracions com la que s'acaba de descriure.

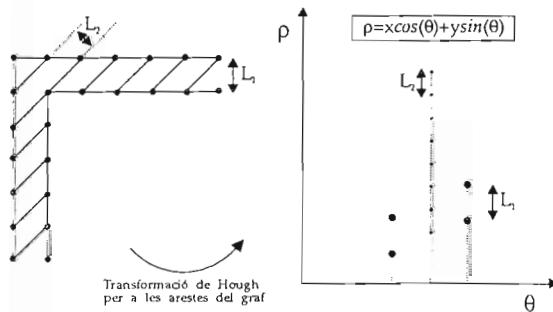


Figura 2: Transformació de Hough a partir del graf d'entrada.

## 4 Exemple d'aplicació

A continuació es mostren uns resultats d'aplicació de les tècniques esmentades per a la interpretació de

plànols d'arquitectura fets a mà alçada com el de la figura 4(a). El sistema, descrit més detalladament a [7], té com a objectiu la interpretació dels documents esmentats com a eina alternativa d'entrada a un sistema CAD. D'aquesta manera, l'arquitecte podria introduir de manera senzilla el document dibuixant el plàtol sobre paper i, posteriorment, fer-ne els retocs finals sobre el CAD una vegada hagués estat interpretat.

Interpretar aquests plànols implica reconèixer certs elements com portes, taules, parets, etc. Per això, es vectoritza el dibuix mitjançant un graf d'atributs (figura 4(b)) i s'aplica un isomorfisme entre subgrafs respecte els models a reconèixer. Per a fer aquest isomorfisme s'ha utilitzat l'algorisme AC4 abans comentat. Donada la introducció manual del document, hi ha certs errors d'imprecisió que cal tenir en compte. Les restriccions imposades per al procés de relaxació han de ser prou flexibles per a reconèixer els models malgrat aquests errors, és a dir, s'ha dut a terme un *IGM*. Així, per exemple, a un arc del graf model se li pot assignar un conjunt d'arcs del graf d'entrada que aproxiem la seva forma. Això es pot observar a la figura 4(b) on es mostren, mitjançant línies més gruixudes, els resultats de l'isomorfisme entre subgrafs respecte als models de la figura 3(a)(b).

En aquest tipus de plànols s'hi pot aplicar el criteri d'esporgat descrit abans per a eliminar arcs del graf que són paral·lels entre si i que pertanyen a la mateixa regió. Concretament, com es pot observar, les regions corresponents a parets presenten aquestes característiques. Si s'aplica el procés basat en la transformació de Hough que s'ha descrit es poden detectar les parets i eliminar del graf d'entrada els arcs que les formen. Això incrementa notablement el rendiment del procés d'isomorfisme doncs hi ha menys nodes i arcs a comparar. El resultat final consistent en la generació del document a partir de la informació obtinguda després del procés d'interpretació es mostra a la figura 4(c).

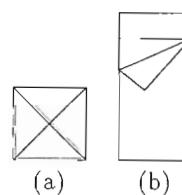


Figura 3: Alguns grafs model a reconèixer.

## 5 Conclusions

Donada la semblança entre un dibuix lineal i una estructura de graf, les tècniques existents per a buscar un isomorfisme entre grafs són de gran utilitat per

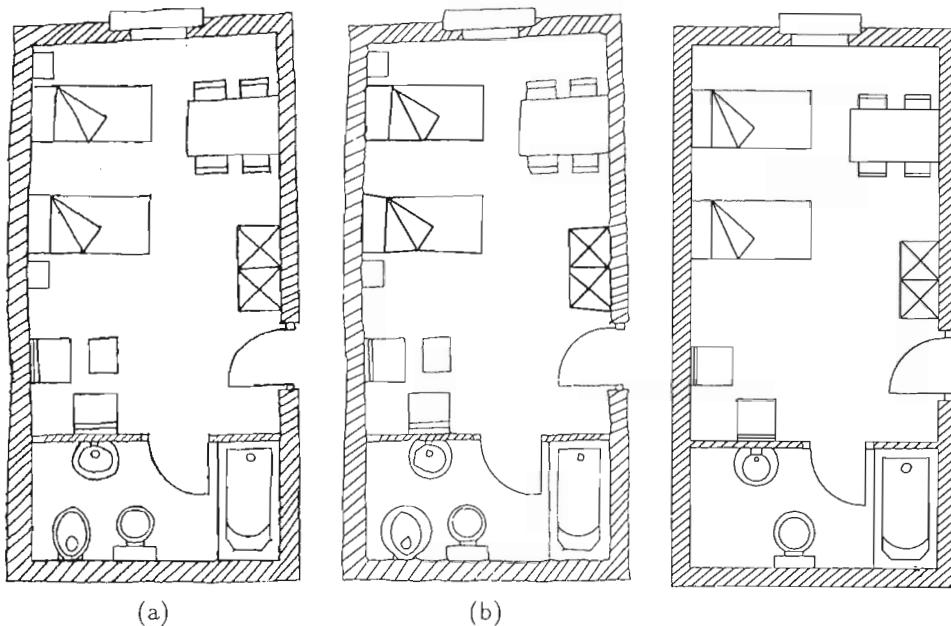


Figura 4: Imatge d'entrada (a), aproximació mitjançant graf i resultat de l'isomorfisme (b), document sintetitzat després de ser interpretat (c).

a interpretar aquest tipus de documents. Aquesta interpretació es pot entendre com un reconeixement d'estructures complexes i de la seva relació estructural. D'aquesta manera, es pot donar una representació simbòlica del document mitjançant, per exemple, una xarxa semàntica. En aquest treball s'ha descrit les tècniques més representatives per a realitzar un isomorfisme entre grafs (exacte o inexacte) i s'ha proposat criteris heurístics basats en les característiques que ofereixen els dibujos lineals utilitzats en dominis d'enginyeria. Finalment, es mostren alguns resultats en els que s'ha aplicat les tècniques descrites que resumeixen el treball de tesi realitzat fins al moment.

Actualment, el treball de tesi en el que es basa aquest treball està enfocat vers l'aprendentatge induïtiu de models. Concretament, aprendre una estructura de graf a partir de diferents instàncies fetes a mà alçada del dibuix lineal que es vol aprendre. Donat que un aprenentatge d'aquest tipus suposa assignar un grau d'incertesa als nodes i arcs obtenits, s'ha escollit una estructura de *graf aleatori* [1]. Els grafs aleatoris són grafs en els que els atributs dels seus nodes i arcs són variables aleatòries de manera que un graf d'atributs pot ser considerat com una realització del graf aleatori.

## Referències

- [1] H. Bunke and A. Sanfeliu. *Syntactic and Structural Pattern Recognition. Theory and Applications*. World Scientific Publishing Company, 1990.

- [2] A.H. Habacha. Structural recognition of disturbed symbols using discrete relaxation. In *Int. ICDAR*, pages 170–178, September–October 1991. Saint Malo, France.
- [3] Thomas C. Henderson. *Discrete Relaxation Techniques*. Oxford University Press, 1990.
- [4] J. Illingworth and J. Kittler. A survey of the hough transform. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, (44):87–116, 1988.
- [5] P. Kuner and B. Ueberreiter. Pattern recognition by graph matching: combinatorial versus continuous optimization. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2(3):527–542, September 1988.
- [6] S.W. Lee, J.H. Kim, and F.C.A. Groen. Translation-, rotation-, and scale-invariant recognition of hand-drawn symbols in schematic diagrams. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 4(1):1–25, 1990.
- [7] Josep Lladós and Enric Martí. Structural recognition of hand drawn floor plans. In *VI Spanish Symposium on Pattern Recognition and Image Analysis*, pages 27–34, April 1995. Cordoba.
- [8] R. Mohr and T.C. Henderson. Arc and path consistency revisited. *Artificial Intelligence*, (28):225–233, 1986.

## Non-Cartesian Networks For Middle-Level Vision: *Texture groups*

J.R. Serra, J. Brian Subirana-Vilanova

Computer Vision Group

Dept. Informática - Universidad Autónoma de Barcelona

e-mail: joanr@upisun1.uab.es, brian@upisun1.uab.es

### Abstract

We present an algorithm to find texture groups based on a novel middle-level vision approach to compute global image structures. Previous schemes to compute global structures are not truly global on the discrete image, either because they are discrete approximations to global continuous processes or because some other non-global component is needed to make the algorithms functional.

Our scheme, Curved Inertia Frames (*C.I.F.*), is based on a novel parallel architecture built around non-cartesian networks. We contend that cartesian networks are specially unsuitable for vision because they have biased orientations, can not provide local estimates of curvature, and can not concentrate processing on selected image locations. Our non-cartesian network proposals solves this three problems and enables a truly global computation.

*C.I.F.* has two stages. In the first stage, we compute local estimates for the texture gradient by filtering the image with multiple filters (similar to those used by current filter-based schemes to texture). Two estimates are computed: the inertia surfaces correspond to texture gradient strength; and the tolerated length corresponds to the amount of possible curvature in the discontinuity's tangent. In the second stage, we compute global curves that correspond to texture groups using the estimates from the first stage. The second stage is based on a dynamic programming scheme that works on non-cartesian networks.

### 1 Introduction

In this paper we address the problem of finding global texture groups on a discrete image-based parallel network. If the scene contains non-rigid objects, finding groups can guide high-level visual tasks such as recognition, grasping and navigation.

Two things make our problem particularly hard. First, there are many attributes that need to be optimized: amount of texture gradient, length and smoothness of the discontinuity, tolerance to noise, treatment of missing gaps and occlusions, etc. Second, defining the search space to find global curves may be exponential.

*C.I.F.* is divided into two successive stages. In the first stage, we obtain two local measures at every point and for every orientation, the inertia value and the tolerated length. The inertia value is high if locally (i.e. considering a small point neighborhood) the point in question appears to be a part of a texture group. The tolerated length is a measure of how much curvature the texture group is likely to have. This measure is correlated with the texture gradient width. These two estimates are then used to define a measure associated to every curve that is maximized by curves that correspond to long and smooth texture groups. In the second stage, we use the two estimates to compute texture groups using a dynamic programming scheme on a non-cartesian network.

The paper is organized as follows. In the next Section, we review previous work. In the following three sections we review the two stages of Curved Inertia Frames. We then show results and the conclusions.

## 2 Inertia Surfaces

The texture gradient is computed by filtering the image and performing some non-linear operations on the obtained output (see [Malik 1989] for more details). We define the inertia by obtaining the maximum texture gradient:

$$In(x, y) = \mathcal{T}\mathcal{G}(x_0, y_0) = \max_i \{\mathcal{GRAD}_i(x_0, y_0)\}$$

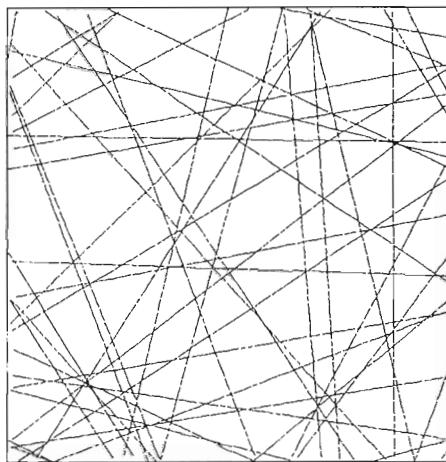


Figure 1: Random network with 100 lines .

## 3 Tolerated Length

The tolerated length will be computed using an estimate of the texture gradient width at each point and for each orientation,  $Width(x, y)$ .

To find the value of  $Width(x, y)$ , firstly  $\mathcal{T}\mathcal{G}$  is filtered with  $\mathcal{DOG}2$  using the same scale range used to compute the texture gradient. After filtering the filter which produced the highest response at  $(x, y)$  is selected, and its  $\sigma$  is chosen as the value of  $Width(x, y)$ . So that we have:

$$Width(x, y) = \max_{\sigma} \max_{\theta} \|(\mathcal{DOG}2(\sigma, \theta) * In)(x, y)\|$$

Actually,  $\theta$ , has 6 orientations.

## 4 Curved Inertia Frame Definition

The approach used in *C.I.F.* is to define a new measure, the curved inertia (or simply inertia) of a curve. Texture groups will be defined by curves that optimize the curved inertia measure. We define such measure as:

$$In_L = \int_0^L In(l) \rho^{\int_0^l \frac{1}{\sigma(t)} dt} dl$$

To describe the calculation we will first present the network, then we will describe the network calculation.

## 5 Network Definition

Several non-cartesian networks can be used with our approach. We have chosen a random network but a network with evenly sampled lines in polar coordinates is also suited to our task. Our network is constructed by randomly throwing lines on the plane.

Once the network has been fully generated, we add processors to each line evenly distributed (a given distance  $d$  apart from each other). Processors are defined in both orientations so each line gives birth to two sets of processors. Where two lines cross the corresponding processors are connected. A maximum of two connections was included in our implementation. The connection chosen was the one that minimizes the line angle difference at both sides of the processor. By default, all processors are connected to the adjacent processor on the same line. Figure 1 shows a 100 line random network, we have used 2500 line networks in our experiments.

## 6 Network Computation

To initialize the network, each intersection is given one variable, corresponding to the tolerated length and each processor is given two local variables, the inertia values and the global curve inertia.

For each intersection,  $int$ , a variable corresponding to the tolerated length is computed as:

$$Tl(x, y) = \begin{cases} r_c(\pi - \arccos(\frac{r_c - \text{Width}(x, y)}{r_c})) & \text{if } r_c < \text{Width}(x, y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

The radius of curvature  $r_c$  is computed as the distance to the center of a polygon. Such polygon is made of segments of the length of a processor and with the angle of the intersection,  $int$ .

The global curve inertia  $GCI(n)$  is a measure that will be updated in an iterative process. It is initially given the same value of the inertia value. The network iteration process consists on iterating the same calculation for every processor at each iteration:

$$GCI(n) = \max\{\mathcal{In} + GCI(n-1)\rho^{1/\alpha Tl}\}$$

where the calculation is maximized over all neighbors (at most three in our implementation),  $\mathcal{In}$  is the inertia of the processor and  $Tl$  is the tolerated length associated with the processor intersection. With this calculation,  $GCI(n-1)$  is the global curved inertia at iteration  $n-1$  of the neighbor.

At iteration  $n$  the network can recover the curve that optimizes the global curve inertia with length  $n$  by tracing the preferences starting at the processor that has the highest global curved inertia  $GCI(n)$ .

## 7 Conclusions

Two examples are showed in figures 2 and 3. The scheme is computationally very efficient because the computations are truly local and very simple. Areas of future research include the generation of different types of non-cartesian networks that adapt better to specific domains (e.g. what is the best distribution to find the number "one" in an image?), (see [Borrell 1995]) theoretical investigation of network properties and the extension to the integration of multiple cues.

## Robòtica i visió II

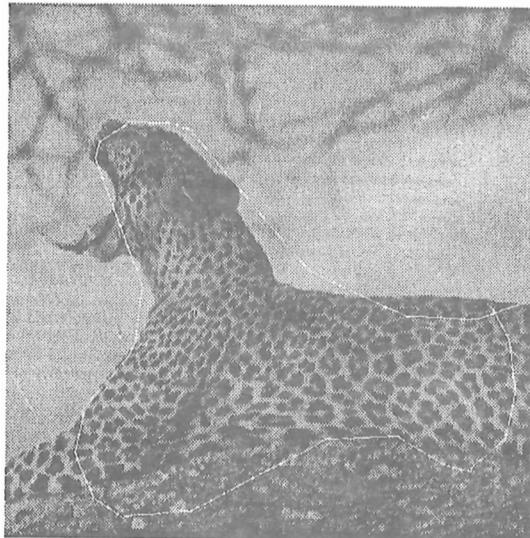


Figure 2: A hungry leopard with the key group on .

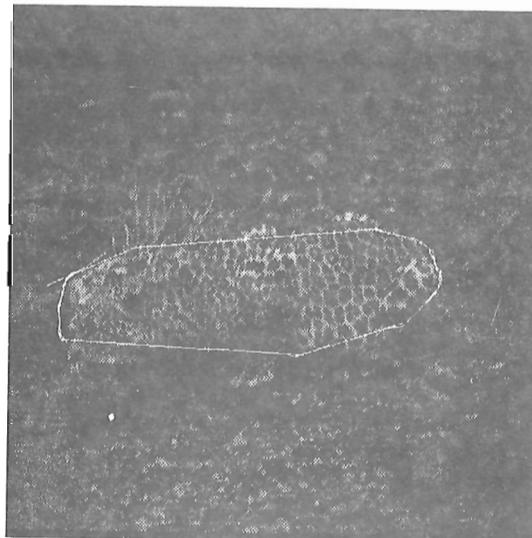


Figure 3: A leopard in visual attention with the key group on .

# Robòtica i visió II

## References

- [Borrell 1995] N. Borrell, Xarxes adaptades: estudi de viabilitat. Final Project. July 1995.
- [Malik 1989] Malik, J. and Perona, P. A computational model of texture segmentation. CVPR pgs 326-332, 1989.
- [Serra, Casadei and SubiranaVilanova] J. R. Serra, S. Casadei and J. B. SubiranaVilanova. Non-Cartesian networks for middle-level vision. In Proceedings of VI Spanish Symposium On Pattern Recognition And Image Analysis, pages 43-51, 1995.
- [Serra 1995] J.R. Serra. Non-Cartesian networks for middle-level vision: skeletons and groups. Master Thesis. July 1995.
- [SubiranaVilanova 1990] Subirana-Vilanova, J. Brian. Curved inertia frames and the skeleton sketch: finding salient frames of reference. In Proc. ICCV, pgs 702-708, 1990.
- [SubiranaVilanova 1993] Subirana-Vilanova, J.B. and K.K. Sung. Perceptual organization without edges. ICCV-1993 pgs 10-18.

# Robòtica i visió II

DETECCION DE INTERFERENCIA ESTATICA Y DINAMICA ENTRE POLIEDROS NO CONVEXOS PARA LA PLANIFICACION DE MOVIMIENTOS.

Doctorando: Pablo Jiménez Schlegl

Dirigido por: Dra. Carme Torras Genís.

## 1 INTRODUCCIÓN.

Un conjunto de objetos localizados en el espacio define implícitamente toda una categoría de problemas asociados a la situación relativa entre los mismos. En este contexto se abordan cuestiones tales como hallar la distancia que hay entre estos objetos, la determinación de su posible interferencia, o la computación de su intersección. Si además los objetos están en movimiento y se tiene en consideración la dinámica del sistema, también entrarán en esta problemática cuestiones tales como la determinación (predicción) de colisiones para trayectorias dadas, o la evitación de obstáculos.

La resolución eficaz de los problemas de detección de interferencias entre objetos geométricos estáticos y de colisiones entre móviles juega un importante papel en numerosas aplicaciones, entre ellas la Planificación de Movimientos en Robótica. El interés teórico también está justificado cuando los objetos involucrados son de elevada complejidad. En el caso en que dichos objetos son poliedros la complejidad se cuantifica en términos del número de vértices, aristas, o caras de los mismos. También la forma juega un papel decisivo: cuando aparecen concavidades, la resolución del problema es cualitativamente más difícil.

## 2 RESULTADOS PREVIOS.

Existe un algoritmo óptimo  $O(\log n \log m)$  de detección de interferencias entre poliedros convexos de  $n$  y  $m$  aristas (Dobkin and Kirkpatrick 1990), así como un algoritmo óptimo de computación de la intersección entre un políedro convexo y uno posiblemente no convexo (Mehlhorn and Simon 1985) de complejidad  $O((n+m+s) \log(n+m+s))$  ( $s$  es el número de aristas de la intersección). Ambos métodos requieren un preprocessado en tiempo lineal para la obtención de una representación jerárquica de los poliedros. Si se pretende aplicar estos algoritmos a una escena donde todos los poliedros sean no convexos, estos poliedros deberán ser previamente descompuestos en objetos convexos. Generalmente, a mayor eficacia de la descomposición (cuanto menor sea el número de objetos resultantes de la misma), mayor esfuerzo computacional necesario para hallarla. Aunque existen técnicas muy eficientes de descomposición, también habrá numerosas situaciones en que este paso previo significará un importante incremento en la complejidad global del método.

## 3 EL TEST DE INTERFERENCIA ARISTA-CARA.

Es posible determinar si dos poliedros no convexos interfieren, sin descomponerlos. En (Thomas and Torras 1994) se describe un método basado en el test de interferencia arista-cara, en la línea establecida en (Boyse 1979), que combina las funciones correspondientes a los contactos básicos (Lozano-Pérez 1983) de forma parecida a la *forma disyuntiva* descrita en (Canny 1988), pero que contempla el caso en que la cara en cuestión no es convexa. El método es, por consiguiente, aplicable a cualquier políedro, convexo o no convexo (de caras convexas o no) y es posible además utilizarlo para la obtención de una cota mínima sobre la distancia entre dos poliedros.

En el peor caso habrá que comprobar si existe o no intersección arista-cara para todos los posibles emparejamientos entre las aristas de un políedro y las caras del otro, resultando, por consiguiente, un algoritmo de complejidad cuadrática. Aunque se ha demostrado la posibilidad de desarrollar algoritmos subcuadráticos para resolver este problema (Pellegrini 1990), utilizando técnicas de *ray shooting*, por el momento éstos se hallan muy lejos de su implementación práctica, debido a la complejidad de las estructuras de datos requeridas y a las elevadas constantes que dominan su coste computacional. Una alternativa consiste en aplicar técnicas de poda al conjunto de pares arista-cara a considerar.

# Robòtica i visió II

## 4 PODA GEOMÉTRICA BASADA EN LAS CONDICIONES DE APLICABILIDAD.

Cuando hay un movimiento traslacional relativo entre dos poliedros inicialmente disjuntos, sólo ciertas intersecciones arista-cara pueden darse en primer lugar. En el contexto de la Planificación de Movimientos en Robótica resulta suficiente hallar estas primeras intersecciones. Se trata entonces de determinar estos emparejamientos candidatos de forma eficiente.

Ello es posible recurriendo a las *condiciones de aplicabilidad*, desarrolladas en (Donald 1984) para el caso en que los poliedros son convexos. Estas condiciones son necesarias y suficientes para que, bajo movimientos traslacionales, sea posible el contacto entre un vértice de un poliedro y una cara del otro, o bien entre dos aristas de sendos poliedros, y en estos casos el contacto es *aplicable*. Si el contacto entre un vértice y una cara es aplicable, se podrá constatar la intersección, si ésta se produce, considerando únicamente el emparejamiento constituido por la cara en cuestión y una de las aristas cofrontera (adyacentes) al vértice. En el caso general, cuando la situación no es de arista paralela a una cara o de caras paralelas, sólo habrá un vértice aplicable respecto a una cara determinada, por lo que no habrá que considerar más aristas como posibles parejas para dicha cara, siguiendo este criterio. De forma similar, cuando dos aristas son aplicables, los emparejamientos candidatos a tener en cuenta serán los formados por cada una de dichas aristas y las caras adyacentes a la otra.

Cuando los poliedros son no convexos, la aplicabilidad de un contacto se convierte en una condición necesaria pero no suficiente para que éste pueda efectivamente producirse. Se habla entonces de aplicabilidad *local*, criterio igualmente válido para realizar una poda, si bien más limitada que en el caso convexo, por cuanto se generarán falsos candidatos a la interferencia arista-cara.

## 5 El Grafo Esférico de Orientaciones de Caras.

82

El proceso de emparejar vértices con caras, y aristas cuyo contacto es aplicable debe llevarse a cabo de una forma eficiente para que el proceso de detección de interferencia resulte eficaz en su conjunto. Ello es posible empleando una representación que hemos desarrollado al efecto, el Grafo Esférico de Orientaciones de Caras (SFOG según su acrónimo en inglés), inspirada en la *Imagen Gaussiana Extendida* (EGI), donde las caras son representadas como nodos sobre la superficie esférica, los arcos de círculos máximos que unen estos nodos representan aristas comunes a las caras correspondientes (se toma el arco menor si la arista es convexa, y el arco mayor si la arista es cóncava), y las regiones delimitadas por ciclos de arcos son representación de los vértices en los que confluyen las aristas respectivas. Por tanto, en cierto sentido es una representación dual del poliedro.

Cuando se trata de poliedros convexos, todas estas regiones son polígonos esféricos convexos y disjuntos. Las relaciones de aplicabilidad pueden determinarse superponiendo los SFOG correspondientes a los dos poliedros con su orientación relativa, tomando la precaución de invertir uno de ellos, como puede verse en la figura 1.

Se ha concebido un algoritmo de recorrido del grafo que determina eficazmente los emparejamientos aplicables como nodos incluidos dentro de regiones (cara-vértice aplicable) y cruces de arcos (aristas aplicables), y, a partir de los mismos, restrinje el número de candidatos a la interferencia arista-cara. Dicho algoritmo se ha implementado, confirmando los resultados experimentales que el número de tests elementales arista-cara a realizar tras la poda es proporcional al número total de aristas, siendo la constante de proporcionalidad próxima a la unidad.

En el caso no convexo, existe una tipología de vértices de acuerdo con su comportamiento respecto a la aplicabilidad. Además de vértices convexos podemos hallar vértices cóncavos (todas sus aristas son cóncavas) y mixtos, entre los cuales, a su vez, pueden distinguirse los que se comportan como convexos y los que se comportan como cóncavos puros. Los vértices cóncavos puros y los que se comportan como tales se caracterizan por no ser aplicables respecto a ninguna cara. Por lo que se refiere a la obtención de candidatos a la interferencia arista-cara, sólo tienen interés los vértices convexos y los mixtos que exhiben el mismo comportamiento, para los cuales puede discernirse sobre el SFOG una *subregión convexa*, zona en la cual puede garantizarse la aplicabilidad local del contacto del vértice con las caras representadas mediante nodos incluidos dentro de la misma. No obstante, estas subregiones pueden superponerse parcial o totalmente, lo cual dificulta el proceso de obtención de los emparejamientos

## Robòtica i visió II

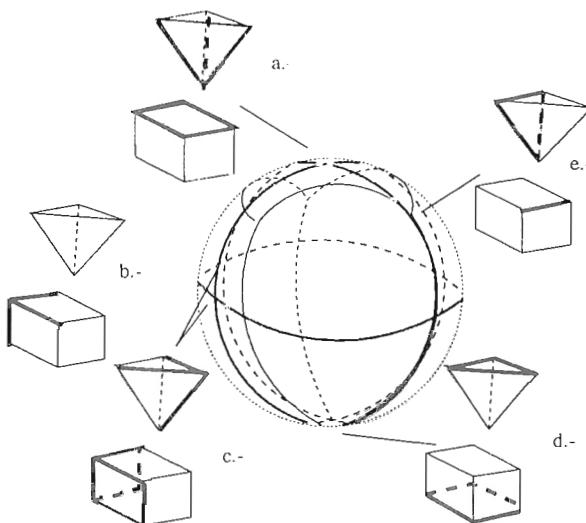


Figura 1: Se ha representado sobre la misma esfera el SFOG de un prisma rectangular y la imagen simétrica central del SFOG correspondiente al tetraedro. Pueden observarse diferentes situaciones: a.- Contacto vértice-cara aplicable, b.-vértice no aplicable respecto a ninguna cara del tetraedro, c.- un mismo vértice es aplicable respecto a dos caras, d.- caras paralelas, e.- arista paralela a una cara (y aristas paralelas).

localmente aplicables. Actualmente estamos trabajando en la confección del algoritmo correspondiente, así como en la cuantificación de la poda realizable en función de las no convexidades.

En (Jiménez and Torras 1995a; Jiménez and Torras 1995b) se describe con mayor detalle la representación SFOG así como el algoritmo de recorrido del grafo en el caso convexo.

### Referencias.

- Boyse, J. W. Jan., 1979. Interference detection among solids and surfaces. *Comm. ACM* 22(1):3-9.
- Canny, J. F. 1988. The complexity of robot motion planning. PhD Thesis. Cambridge (MA): The MIT Press.
- Dobkin, D. and Kirkpatrick, D. 1990. Determining the separation of preprocessed polyhedra -a unified approach. *ICALP-90* 443:400-413.
- Donald, B. R. 1984. Local and global techniques for motion planning. Masters Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Jiménez, P. and Torras, C. July, 1995a. Interferencia entre poliedros: pares arista-cara susceptibles de entrar en contacto.. Paper delivered at VI Encuentros de Geometría Computacional, Barcelona.
- Jiménez, P. and Torras, C. Nov., 1995b. Collision detection: a geometric approach. *Modelling and Planning for Sensor Based Intelligent Robot Systems*. eds. H. Bunke, H. Noltemeier and T. Kanade. World Scientific Pub. Co..
- Lozano-Pérez, T. Feb., 1983. Spatial planning: a configuration space approach. *IEEE Trans. Comput.* 32(2):108-120.
- Mehlhorn, K. and Simon, K. 1985. Intersecting two polyhedra one of which is convex. *Fundamentals of Computation Theory 85, Lecture Notes in Computer Science* 199:534-542.
- Pellegrini, M. 1990. Stabbing and ray shooting in 3-space. Paper delivered at Proceedings of the 6th ACM Symposium on Computational Geometry.
- Thomas, F. and Torras, C. May, 1994. Interference detection between non-convex polyhedra revisited with a practical aim. *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics Automat.* 1:587-594.

## Disseny i implementació d'un hexàpod

Aleix Martínez

CVC - Dpt. de Informàtica

Universitat Autònoma de Barcelona - 08193 Bellaterra (Barcelona)

e-mail: aleix@cvc.uab.es

### Abstract

En aquest article presentarem el disseny i desenvolupament d'un hexàpod que utilitza una xarxa neuronal amb inspiracions biològiques per a poder-se desenvolupar per superfícies abruptes. Finalment comentarem les avantatges que ens pot aportar la utilització del comportament motivacional en aquests agents.

### 1 Introducció

Artificial life (a-life o vida artificial) [Levy92] és una ciència que des dels seus orígens ha tingut una fita clara: la creació de sistemes vius (o que semblin vius) a partir de la utilització de matèria no orgànica. Tot i que aquest propòsit ja fou el perseguit per varíes àrees de la IA, no fou fins l'aparició dels agents autònoms [Maes91][Brooks91][Winston90b] on aquesta fita semblava assolible. Així, cap a finals dels 80 varen començar a aparèixer un conjunt de nous i prometedors enfocs [Kaelbing93][Maes91][Winston 90b] en la creació de vida artificial, enfocs que ens han portat a la creació de noves branques de desenvolupament que s'han assentat en aquesta nova ciència, la *vida artificial*.

Aquesta nova ciència intenta solventar els problemes de la creació de sistemes autònoms-intel·ligents utilitzant un conjunt de tècniques *no sofisticades* (és a dir, sense un processament sofisticat ni complexe de processament de la informació) però capaces de treballar a temps real [Brooks86][Maes91][Brooks91]. D'aquestes noves idees va sorgir el disseny dels *embedded systems* i dels agents autònoms com un cas particular d'aquests.

Des d'aleshores ençà aquesta àrea de la IA ha evolucionat moltíssim. En pocs anys hem passat dels primitius robots sobre rodes als robots amb cames i, recentment, als agents equipats amb sensors actius (com pot ésser el cas de la visió activa) [Brooks93]

[FPAC94].

Si més no, aquestes línies d'investigació també han tingut que superar algunes algunes aspectes més difícils que altres, com per exemple el fet de dissenyar alguns dels seus controladors (força sofisticats) utilitzant tècniques no sofisticades de processament d'informació [Kaelbing93]. Normalment això ha implicat la utilització de tècniques connexionistes, doncs són les que millor resultats estan donant en aquesta àrea. De totes maneres, aquestes tècniques també han sofert entrebancs alhora de solventar el problema. Així, alguns investigadors han optat per estudiar el funcionament d'alguns sistemes biològics (a nivell neurològic i/o biològic) hi ho han intentat imitar [Beer90][McFarland&Bösser93][Posner89][Calataÿ92][Levy92][Winston90a].

Seguidament doncs, presentarem el disseny d'un hexàpod (Atlas - figura 5-b-) que utilitza algunes d'aquestes tècniques i idees per a aconseguir desenvolupar-se sobre superfícies abruptes.

Així, presentarem des del seu disseny mecànic (qüestions d'estabilitat), hardware (velocitat i connexió de l'hexàpod a un PC) i algorismes de caminar implementats (trípode alternant i la xarxa neuronal que Randall Beer proposa en [Beer90]).

Tot això desenvolupat sobre una plataforma transportable i econòmica que permeti una fàcil utilització des de la recerca i l'ensenyament. Precisament aquest darrera pot veure's molt millort amb la inclusió d'agents autònoms reals que permetin a l'alumne jugar amb ells i entendre millor les tècniques, arquitectures i algorismes estudiats a teoria.

### 2 Mecànica i Hardware

Quan vàrem afrontar el disseny d'Atlas (un hexàpod de dotze graus de llibertat), el primer problema al que ens vàrem enfocar fou el de l'estabilitat. La

# Robòtica i visió II

nostra fita era el disseny d'un sistema que ens permetés mantenir el robot dret amb un nombre mínim de cames tocant al terra (en el cas ideal amb només tres cames al terra, per raons que veurem més endavant).

Per aquest motiu tant la distribució física de les cames, els diferents motors (servo motors [Jones&Flynn93]) i el control d'aquests van tenir que ésser estudiats molt acuradament. La distribució física dels motors la podem apreciar en la figura 1-b, mentre que el control dels motors que ha estat implementat utilitzant l'arquitectura de la subsumsió [Brooks86] [Brooks89] es mostra en la figura 2.

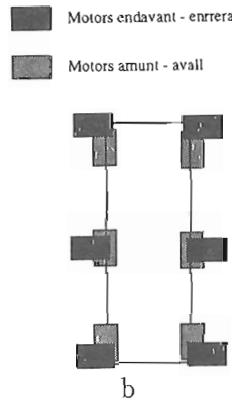


Figure 1: a) Distribució de les cames en un hexàpod i b) distribució dels motors d'Atlas.

## 2.1 Control dels motors

Per a poder fer front al disseny de sistemes que ens proporcionin el control d'un sistema complexe (12 graus de llibertat en el nostre cas) existeixen varies tècniques [Kaelbing93][Posner89]. De totes maneres la tècnica que ha proporcionat més bons resultats fins a l'actualitat ha estat l'**arquitectura de la subsumsió** proposada per primera vegada en [Brooks 86] i que nosaltres hem utilitzat per a desenvolupar el sistema global (tal i com acavem de veure en la fig 2).

Si més no, el mòdul de caminar (que exposarem més endavant) està desenvolupat utilitzant una altra tècnica que intenta millorar el disseny de l'arquitectura de la subsumsió: el **comportament motivacional** [McFarland&Bösser93], dissenyat sobre una xarxa neuronal amb inspiracions biològiques [Beer90].

Pel que respecta a la resta de parts del sistema (fig. 2) voldríem fer esment en el mòdul dedicat al

manteniment, doncs és el responsable de què els motors no deixin de fer força per tal de garantir una màxima estabilitat del robot. Notem que si no ho féssim d'aquesta manera, és a dir, que només féssin força els motors que movem, el robot no estaria fent una força  $f_y$  per allunyar-se del terra i amb conseqüència perderia l'estabilitat ( $f_y - f_{gravetat} > 0$  si  $f_y > f_{gravetat}$ ).

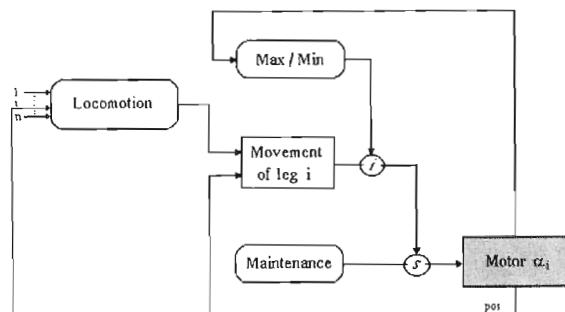


Figure 2: Arquitectura de la subsumsió del sistema.

## 2.2 Control des d'un host

Finalment, un cop el problema de l'estabilitat estava resolt, calia conectar el robot a un host de tal manera que pogués ser programat i/o controlat.

Com que el propòsit era el disseny d'una plataforma fàcil de manejar, programar i econòmica, l'elecció del PC ens va semblar la més adient.

El problema era que si volíem fer un sistema tant econòmic com manejable no podíem afegir cap placa adicional al PC. Això ens obligava a controlar els dotze motors des del port sèrie (1 bit de sortida) o des del paral·lel (8 bits de sortida), ambdós insuficients (doncs necessitem controlar 12 motors). Aquesta restricció ens obligava al disseny d'un hardware específic de control fora del PC.

La nostra opció va ser la de controlar el robot des del port paral·lel de 6 en 6 motors i anar-los alternant. Per aquest propòsit varem desenvolupar una interrupció que fos capaç d'activar-se cada 0.1 ms en el PC i que ens permetés què, els dos grups de motors, només tinguessin un *delay* de 1 ms (un respecta a l'altre). Finalment, varem desenvolupar un petit hardware de decodificació (que va montat sobre el robot) que s'encarrega de commutar entre els dos grups. Aquesta idea la podem veure resumida en la figura 3.

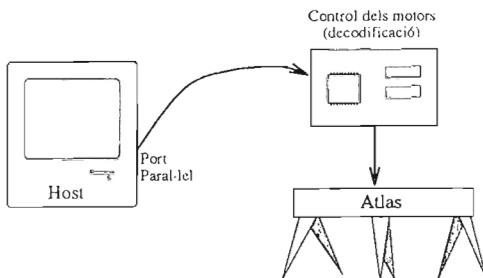


Figure 3: Sistema desenvolupat.

### 3 Caminant

Un cop el sistema de control va estar desenvolupat, varem afrontar el darrer problema de l'hexàpod: els algorismes que el permetessin caminar.

Per aquest motiu varem implementar dos mètodes. El primer es basava en una simple seqüència de caminar anomenada tripode alternant (això és L1-R2-L3 i R1-L2-R3) que s'ha vist que utilitzen alguns insectes de 6 cames (com pot ésser el cas de l'escarbat). En segon lloc varem afrontar el disseny d'una xarxa neuronal amb inspiracions biològiques [Beer90] més la idea del comportament motivacional [McFarland&Bösser93] per a aconseguir un comportament més *intel-ligent* en funció de les necessitats del moment. Així, el nostre hexàpod caminarà més o menys ràpid segons les seves necessitats i buscarà menjar o simplament *passejarà* en funció de l'energia acumulada de que disposi.

#### 3.1 Xarxa neuronal

Per a aconseguir que el nostre hexàpod camini hem dissenyat una xarxa neuronal distribuïda inspirada en la proposada en [Beer90].

El comportament motivacional [McFarland&Bösser93] (que té una inspiració biològica) es basa en la idea de que el nostre agent s'ha de moure segons les motivacions que tingui per a fer determinades coses. Aquestes motivacions venen determinades per: aconseguir algun propòsit, sobreviure o, simplement, evitar obstacles. Així haurem de determinar un conjunt de comportaments i un conjunt de sensors i/o estats interns que ens determinin els estats de motivació del nostre agent.

Però quins són aquests estats de motivació?. En la gran majoria dels animals (els primats, per exemple) disposen de cinc comportaments motivacionals bàsics: *veure*, *empolainar-se*, *defensa del territori*,

*dormir i menjar*; així, seguint aquests processos i en funció de l'espècie, de l'environament i del propi animal en concret obtindrem un comportament o un altre.

En el nostre cas (un agent autònom artificial) aquests comportaments variaran segons les seves necessitats particulars. Per exemple si es tracta d'un agents que camina pel sol d'un altre planeta, segurament l'haurem de dotar de comportaments com *protecció dels rajos d'un sol proper* - al haveri falta d'atmosfera - *busqueda d'aliment* - per recarregar les bateries - , etc.; restriccions que canviaran per un altre agent que, per exemple, s'hagi d'encarregar de la seguretat d'una planta nuclear.

Un altre punt molt important ha tenir en compte és el comportament en grup [Matarić94][Coen94], és a dir, que més d'un agent col·labori per a obtenir un comportament global més satisfactori. Aquest sistema que apriori podria semblar poc útil és utilitzat per a moltes espècies per a obtenir comportaments complexes a partir de individus simples (com pot ésser el cas de la formiga) [FPAC94].

Per altre banda tenim la xarxa neuronal desenvolupada (fig. 4). En la figura 4-a podem apreciar el seu disseny global, noteu com hem dibuixat una rodona per cada una d'aquestes neurones està composta per un conjunt de neurones (fig. 4-b) destinades a un processament local del caminar. La idea de fons es que cada una de les cames treballi de forma independent realitzant el procés de caminar en la direcció que el cervell indiqui (que en el nostre cas es compona d'una única senyal per a totes les cames - LC -), però que a la vegada, i per tal de mantenir l'estabilitat de l'agent, existeixen un conjunt d'inhibicions cap a les cames veïnes que imposen que si una cama està aixecada (L1 per exemple) les seves veïnes no es poguen aixecar (L2 i R1, en aquest cas) evitant, així, que el robot perdi l'estabilitat.

Amb aquesta configuració local amb inhibicions laterals ja tenim garantida una seqüència de caminar que acabarà convergint a la de tripode alternant. De totes maneres, si considerem l'existència d'una neurona central (LC) que ens dongui una seqüència de polsos de velocitat de moviment (caminar), podem aconseguir diferents velocitats de desplaçament [Beer90] tal i com es mostra en la figura 5-a. Si més no, en la xarxa implementada només serem capaços de generar els quatre patrons centrals, no assolint ni la velocitat més elevada (F) ni la més lenta (A).

# Robòtica i visió II

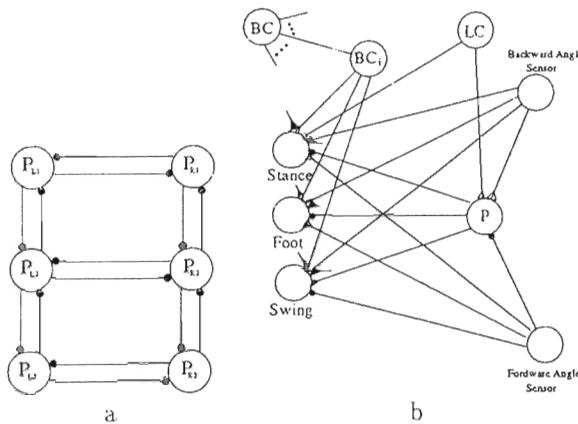


Figure 4: a) xarxa neuronal de l'hexàpod (sistèma global) i b) disseny d'una cama.

Finalment, podrem desenvolupar una xarxa neuronal central (que vindria a ser el *cervell* dels éssers vius) que ens determini el comportament que l'agent ha de tenir. Per això utilitzarem el *comportament motivacional* descrit anteriorment. Així, varem implementar una xarxa neuronal que utilitzant la informació de reserva d'energia, sensor químic per a detectar menjar i detecció de parets (obstacles), desenvolupés un comportament basat en la motivació.

88

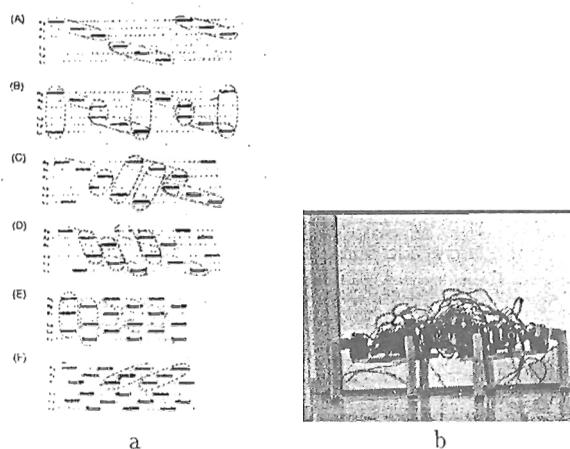


Figure 5: a) Diferentes seqüències que podem aconseguir utilitzant la xarxa neuronal [Beer90] i b) una foto d'Atlas.

## 4 Resultats i Conclusions

Un cop acabat el sistema, podem realitzar un conjunt enorme de proves i testeixos per a tal d'extreure conclusions. Això ho podem fer tant per extreure informació del funcionament del nostre hexàpod, com per a poder entendre millor el funcionament dels sistemes biològics amb els quals ens hem inspirat.

En primer lloc caldria remarcar que el sistema funciona molt bé, i no només es capaç de caminar sense caure sinó que és capaç de seguir els quatre patrons existents (fig. 5-a) molt correctament. Les velocitats de desplaçament aconseguides en Atlas es mostren en la figura 6-a, on hi podem apreciar l'increment de velocitat conforme la neurona central (LC) augmenta la freqüència.

De la mateixa manera, en la figura 6-b, podem apreciar les diferents velocitats asolides per a girar tant a dreta com a esquerra.

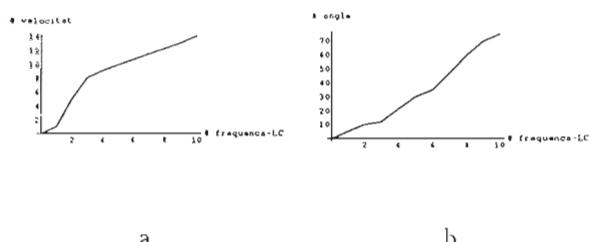


Figure 6: a) Velocitat de moviment endavant - enrera i b) dreta - esquerra.

En segon lloc es de destacar l'avantatge que suposa tenir connectat el robot a un PC, ja que d'aquesta manera, podem anar visualitzant gràficament per pantalla el seu comportament (tant de caminar com neuronal).

A més a més, aquest sistema ens proporciona l'avantatge de simular els algorismes del comportament abans de tindrals que posar sobre el robot. Això implica que quan dissenyem un nou algorisme podem donar per implementat un sensor que encara no existeix físicament, però que en realitat dona informació al programa com si existís (de forma virtual), d'aquesta manera només acavarem implementant els sensors que realment son necessaris, evitant perdudes de temps en la implementació de sensors complicats que mai arribarem a utilitzar en el model

# Robòtica i visió II

final. De la mateixa manera, podem dissenyar una sèrie d'obstacles en el PC que donquin la sensació, tant en els sensors reals com en els虚拟s, de que hi ha un obstacle quan, en realitat, només existeix de forma virtual. Aquesta idea és la que nosaltres hem anomenat *Agent Real en un Entorn Virtual* (RAVE).

Per acabar estaria bé fer un petit repàs per algunes de les avantatges que el *comportament motivacional* ens pot aportar al nostre agent (i als agents autònoms en general).

El primer avantatge clar és obtenir un comportament més intel·ligent. Aquest punt serà el que ens ha de diferenciar el que és un simple autòmat del que és un agent autònom, doncs aquest últim tindrà respostes diferents sota les mateixes condicions ambientals i de localització en espais de temps diferents.

Però el segon i potser no tant clar avantatge és que aquesta tècnica ens pot servir com a eina per a solventar els dos principals problemes de l'aprenentatge: el temps i la capacitat d'emmagatzegament, doncs ara només aprendrem a fer les coses quan realment estiguem molt motivats per fer-ho (és a dir, quan sigui indispensable per a seguir endavant) solventant, així, problemes de capacitat de memòria i de temps d'aprenentatge - al no aprendre tot el que potser algun dia necessitem -. En certa manera ho podríem anomenar com a un *aprenentatge per necessitat*.

## References

- [Beer90] Randall D. Beer. "Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in computational Neuroethology". Academic Press, Inc; 1990.
- [Brooks86] Rodney A. Brooks. "A Robust Layered control system for a Mobile Robot". IEEE Journal of Robotics and Automation, March 1986; pp 14-23.
- [Brooks89] Rodney A. Brooks. "A Robot that Walks: Emergent Behavior from a Carefully Evolved Network". Neural Computation 1:23, 1989; pp 253-62.
- [Brooks91] Rodney A. Brooks. "Intelligent without reason". A.I. Memo No. 1293 (MIT), april 1991.
- [Brooks93] R.A. Brooks and Lynn Andrea Stein "Building Braians for Bodies". A.I. Memo No. 1439 (MIT Artificial Intelligence Laboratory), 1993.
- [Calataÿ92] A.M. de Calataÿ. "Neural and Artificial Intelligence. Misconception about Braians and Neural Networks". North-Holland, Netherlands 1992.
- [Coen94] Michael H. Coen. "SodaBoat: A Software Agent Environment and Construction System". A.I. Technical Report 1493, 1994.
- [FPAC94] "From Perception to Action Conference (PROCEEDINGS)". Lausanne (switzerland), setember 1994.
- [Jones&Flynn93] Joseph L. Jones and Anita Flynn. "Mobile Robots. Inspiration to Implementation". AK Peters, Ltd., 1993.
- [Kaelbling93] Leslie Pack Kaelbling. "Learning in Embedded System". A Bradford Book, The MIT Press, 1993.
- [Levy92] Steven Levy. "Artificial Life. A report from the frontier where computers meet biology". Vitage Books, New York 1992.
- [Maes91] Pattie Maes. "Design Autonomous Agents. Theory and Practice from Biology to Engineering and Back". Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1991.
- [Matarić94] Maja J. Matarić. "Interaction and Intelligent Behavior". PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [McFarland&Bösser93] David McFarland and Thomas Bösser. "Intelligent Behavior in Animals and Robots". A Bradford Book the MIT press, 1993.
- [Posner89] Michael I. Posner. "Foundations of Cognitive Science". Bradford Book, The MIT Press. Cambridge 1992.
- [Winston90a] Patrick Henry Winston and Sarah Alexandra Swleard "Artificial Intelligence at MIT (vol. 1)". The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1990.
- [Winston90b] Patrick Henry Winston and Sarah Alexandra Swleard "Artificial Intelligence at MIT (vol. 2)". The MIT Press, Cambridge. Massachusetts 1990.

# APRENENTATGE I ADQUISICIÓ DE CONEIXEMENTS

Eva Armengol  
Josep Lluís Arcos  
David Riaño Ramos  
Vicenç Torra i Raventós

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## Inducció a partir d'exemples utilitzant el concepte d'antiunificació

Eva Armengol

Artificial Intelligence Research Institute,  
III A Spanish Scientific Research Council, CSIC  
Campus de la Universitat Autònoma de Barcelona  
08193- Bellaterra, Catalonia, Spain  
eva@iiia.csic.es

A F C I A  
I  
T  
E  
R  
I  
D  
E  
B  
U  
T  
L  
I  
E  
R

93

### 1. Introducció

Normalment quan es vol construir un sistema de classificació és necessària una fase d'adquisició de coneixements llarga i farragosa. L'expert ha de donar les classes, la relació entre elles, els atributs comuns amb els que es poden descriure els objectes, quins d'aquests atributs són rellevants, els possibles valors que poden tenir, etc. Una manera de simplificar aquesta fase es que l'expert dongui exemples per a cada classe solució i a partir d'ells aplicar un mètode d'aprendentatge inductiu per obtenir coneixement general del domini. La nostra proposta és que l'expert ens dongui exemples de les classes solució i, a partir d'aquests exemples trobar una caracterització (prototipus) de cadascuna de les classes solució. Existeix el sistema KLUSTER (Kietz i Morik, 1994) que també a partir d'exemples i, usant subsumpció, construeixen automàticament una taxonomia del domini i intenten donar, per a cada concepte, les descripcions discriminants generals més específiques. Nosaltres presentem SPIN que treballa sobre el domini de classificació de les espomes i que utilitza un mètode inductiu basat en el concepte d'antiunificació per obtenir els prototipus de les classes. Mitjançant aquest prototipus SPIN podrà classificar nous exemplars d'espomes que pertanyin a alguna de les classes caracteritzades.

SPIN ha estat implementat usant el llenguatge NOOS que és un llenguatge reflexiu centrat en objectes (Arcos i Plaza, 1994). Suporta descripció, reutilització i combinació de les components resultants d'una modelització de coneixements del domini i els seus elements bàsics són les *entitats* i les *característiques*. Les entitats representen objectes d'un domini i les característiques són els atributs que permeten descriure les entitats. Els valors de les característiques poden ser calculats de varies maneres: fent referència a altres entitats, fent referència a altres atributs o bé utilitzant mètodes. Els *mètodes* són entitats avaluables quines característiques s'anomenen *tasques*. El conjunt de característiques d'un mètode pot interpretar-se com la seva descomposició en subtasques. Es poden definir diversos nivells d'entitats i gràcies a la uniformitat de NOOS és fàcil tractar tots aquests nivells. El procés d'inferència s'engega mitjançant consultes de manera que es pregunta pel valor d'una determinada característica d'una entitat. En la figura 1 podem veure com es representa en NOOS una entitat que descriu una esponja. Podem veure que hi ha característiques com *quim*, *form*, etc que ténen per valor una referència a un altre objecte sense característiques (*silica*, *sheet* respectivament) i que d'altres característiques, com *skel* ténen com a valor una entitat d'un cert tipus (*spiculate-skeleton*).

En les següents seccions es descriu el funcionament de SPIN del qual analitzem el domini d'aplicació, les dades inicials de les que partim per construir la taxonomia del domini i com es creen els prototipus que ens permeten classificar total o parcialment nous exemples. També diem com es fa per identificar noves espomes.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## 2. SPIN

SPIN és una aplicació que treballa en el domini de les esponges i que realitza les tasques de descripció i de classificació. La tasca de descripció la fa usant exemples d'esponges correctament classificades per un expert i a partir d'elles troba una taxonomia del domini relacionant les diferents classes solució i quina és la caracterització (prototipus) d'una esponja pertanyent a la classe en qüestió. Aquesta taxonomia és la que li permetrà portar a terme la tasca de classificació de noves esponges. Abans de passar a detalls tècnics sobre SPIN explicarem breument el domini de les esponges del qual es pot trobar una detallada descripció en Domingo (1995).

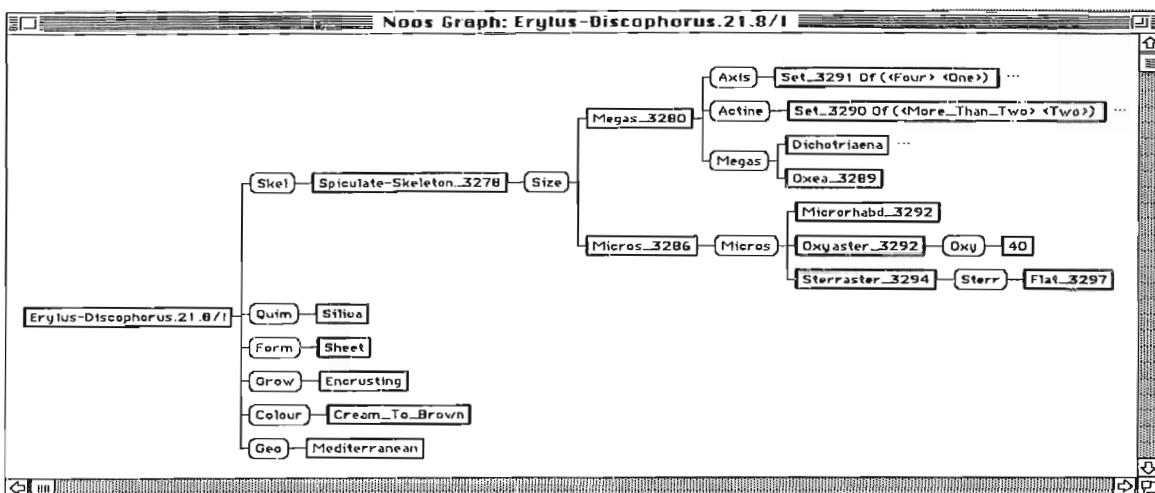


Figura 1. Descripció d'una esponja usant NOOS.

### 2.1 Domini de les esponges

Les esponges és un domini on el coneixement és essencialment heurístic de manera que és molt difícil la classificació de nous exemplars si no s'és realment un expert. No obstant, hi ha molts estudis sobre esponges que passen per una fase prèvia d'identificació d'un nou exemplar. Per tant, és necessària la construcció d'eines que ajudin als qui no son experts i que es dediquen a d'altres camps però que, d'altra banda, necessiten de la identificació d'esponges. En particular, ens centrarem en el filum *Porífera* que és un dels taxons d'invertebrats marins més problemàtics. Aquesta problemàtica és deguda principalment a la plasticitat de les espècies que el componen, al coneixement incomplet de moltes de les seves característiques biològiques i citològiques i a la freqüent descripció de nous taxons. Així, a un aprenent li és difícil fer classificacions ja que moltes vegades s'usen diferents termes per nombrar el mateix concepte i hi ha, en general, força incoherència terminològica. Hi ha un gran cos de coneixement molt complex dividit entre diversos experts i per tant per a poder classificar tots els taxons d'esponges cal un mètode incremental.

Un altre problema d'aquest domini és la incompletesa i incertesa presents en molts aspectes per la qual cosa es necessita una eina capaç de manegar aquests conceptes. Les esponges son genèticament més diverses que d'altres invertebrats marins i dins les espècies també hi ha molta variabilitat degut a la seva capacitat d'adaptació a les condicions ambientals. La variabilitat dels caracters dona incertesa en la definició i descripció del taxon. Aquesta incertesa es fa palesa considerant per exemple, que de vegades s'ha pensat que s'havia descobert una nova espècie quan en realitat era una varietat d'una espècie ja coneguda. La descripció de les espècies està relacionada amb caracters mesurables. En el cas de les esponges un d'aquest caracters seria el tamany de les espículs però, en canvi, la longitud i diàmetre d'aquestes espículs pot dependre de la temperatura de l'aigua, fet que dificulta la classificació.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

Així, doncs, una eina que ens permeti descriure esponges i classificar-ne de noves ha de ser capaç de manegar tots aquests conceptes. Per tant, s'ha de permetre una certa variabilitat en els atributs que descriguin els exemplars així com no haver de dir *a priori* quins son tots els possibles valors d'un atribut.

## 2.2 Representació del coneixement

Els exemples s'obtenen directament a partir de la bibliografia i es representen com objectes estructurats on el valor d'un atribut pot ser, alhora, un altre objecte estructurat (p.ex. atribut *skel* de la figura 1). La descripció de les diferents esponges pot venir donada per diferents atributs de manera que els que apareixen en unes poden no aparèixer en les altres. Es suposarà que els atributs que no apareixen en una esponja no es coneixen i, per tant, no podem assumir res sobre ells (ni la seva existència ni la seva no existència). El conjunt d'entrenament està format per exemples que tenen dos atributs: un que conté la descripció de l'esponja i l'altre que conté la classificació donada per l'expert.

A partir dels exemples d'entrenament construim una taxonomia del domini que té els cinc nivells dins els que es pot classificar un nou exemplar. Aquests nivells són, de més a menys general, classe, ordre, família, gènere i espècie. Cada node d'aquesta taxonomia representa una classe d'objectes i conté quatre tipus d'informació (figura 2): *tipus* indicant el nivell de classificació al que pertany el node (classe, ordre, família, gènere o espècie), *children-type* indicant els tipus fills del node, *examples* que conté els exemples d'entrenament pertanyents al node i *prototype* que dóna una definició que caracteritza als objectes pertanyents al node. D'aquesta manera, la taxonomia així formada ens ha de permetre classificar nous exemples que caiguin dins d'alguna de les classes caracteritzades. També ens permetrà donar classificacions parcials especialment útils quan una esponja està insuficientment descrita i no podem saber de quina espècie és però en canvi es pot classificar en algun dels nivells més generals.

95

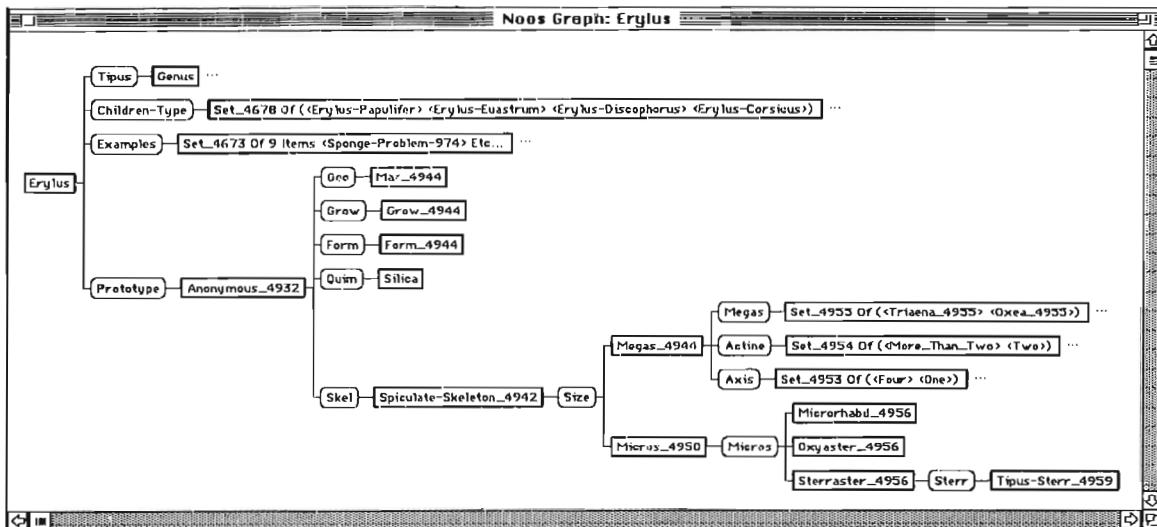


Figure 2. Node de la taxonomia del domini construit a partir dels exemples d'entrenament.

## 2.3 Construcció de prototipus: Antiunificació

Quan es treballa a partir d'exemples i sense una teoria del domini és usual aplicar un mètode inductiu per obtenir coneixement general del domini. Normalment, els mètodes inductius necessiten que els objectes del domini estiguin representats pels mateixos atributs i, preferentment, que no hi hagi valors desconeguts ja que això els complica considerablement. No obstant, en dominis reals és difícil evitar que hi hagi valors desconeguts i també moltes vegades és difícil decidir quins atributs usar

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

en les descripcions i quins són tots els possibles valors de tots ells. En particular, suposem que a partir de les descripcions de les esponges usades com conjunt d'entrenament decidim muntar un arbre de decisió. Com ja hem dit, les esponges poden estar descrites per diferents atributs, per tant podria ser que un nou exemplar a classificar no tingués algun dels atributs que en la construcció de l'arbre s'ha considerat com rellevant, o podria ser tambe que tingués l'atribut però cap dels valors presents en l'arbre. En aquest cas, doncs, no podríem classificar el nou exemplar. En canvi, si d'alguna manera es pogués evitar restringir la classificació de nous exemplars a determinats atributs i al coneixement de tots els possibles valors potser sí que seria possible la classificació. La idea és que hi ha d'haver un mínim d'atributs que caracteritzen els elements d'una determinada classe solució i n'hi hauria prou sabent el tipus del valor de cada atribut. Aquesta idea és la que nosaltres hem implementat seguint el concepte d'antiunificació que consisteix en trobar la generalització més específica comú als exemplars a generalitzar. Amb això aconseguim no dir d'entrada els atributs necessaris ni tampoc el seu valor ja que la caracterització de cada classe dependrà de les descripcions que formin el conjunt d'entrenament. És evident que si el nou exemplar a classificar no té algun dels atributs que apareixen en la descripció construïda, tampoc aquest mètode ens permetrà classificar-lo. L'algorisme utilitzat en la construcció d'aquest prototipus és el següent:

```
Obtenir atributs comuns a tots els elements d'una classe  
Per-a cada atribut comú fer  
    pels valors comuns a tots els elements de la classe fer  
        guardar aquest valor  
    pels valors no comuns fer  
        obtenir tipus  
        pels tipus comuns a tots els elements de la classe fer  
            guardar el tipus  
        pels tipus no comuns  
            buscar tipus més específic comú
```

96

En el nostre cas l'utilitzarem per extreure patrons comuns (prototipus) de descripcions d'esponges que sabem que estan dins d'un mateix node de la taxonomia del domini. Un prototipus ha de ser tan general com per contenir totes les descripcions d'esponges que estiguin per sota d'ell en la mateixa branca de la jerarquia del domini. Per exemple, el prototipus de *Erylus* (veure figura 2) ha d'incloure tots els exemples de les espècies *Erylus corsicus*, *Erylus discophorus*, *Erylus papulifer* i *Erylus euastrum*. Així, un prototipus construït per antiunificació ha de tenir tots els atributs comuns als exemples a generalitzar. Per tant, si un nou exemplar té, entre d'altres, els atributs geo, grow, form, quim i skel és candidat a pertànyer al gènere *Erylus*. Cada atribut comú pot tenir valors que poden estar o no a tots els exemples. Els valors que son comuns a tots s'inclouen en el prototipus (cas del valor silica de l'atribut quim en la figura 2). Pels valors no comuns cal esbrinar quin és el seu tipus. Igual que abans, pot ser que hi hagi tipus comuns a tots els exemples i aleshores cal incloure'ls al prototipus (cas dels valors de geo o form entre d'altres). Podria ser finalment, que hi havessin tipus no comuns però que en canvi tinguessin algun supertipus comú. En aquest cas, el prototipus contindria aquest supertipus comú. Per tant, a diferència del que passa en els arbres de decisió per classificar un nou exemplar, no imosem que els atributs tinguin un valor concret sino que en tenim prou imposant que el valor sigui d'un cert tipus. Així, per exemple, i malgrat que tots els exemples d'entrenament ténen a l'atribut geo els valors atlantic o mediterranean, podríem classificar com *Erylus* una esponja del mar Bàltic.

Per subsanar aquest tipus de fracassos és pel que estem implementant altres mètodes basats en l'antiunificació que permeten generar prototipus menys sobregeneralitzats. Aquests altres mètodes són la *d-antiunification* i la *d2-antiunification* que permeten tenir disjunció en els valors dels atributs. La idea es que quan es detecti que un prototipus cobreix un contraexemple, es passi a un altre mètode que generi prototipus més específics.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## 2.4 Classificació de nous exemplars

Un cop construïts els prototipus per a cadascuna de les classes solució ens proposem classificar nous exemplars. En el nostre cas, la tasca de classificació pot descomposar-se en cinc subtasques independents (figura 3). Això vol dir que un nou exemplar pot ser parcialment classificat. La solució es la classificació de la nova esponja fins al nivell més baix de l'arbre de classificació general al que es pugui arribar. El mètode utilitzat per resoldre aquestes tasques és el mateix per a totes elles: el de subsumpció. La descripció de la nova esponja ha d'estar subsumida pel prototipus de cadascun dels nivells en que es vulgui classificar. Així una nova esponja que no tingui l'atribut *form* no podrà ser classificada com *Erylus*. Igualment no serà classificada com *Erylus* si no té els tres tipus de micros esmentats a la figura 2.

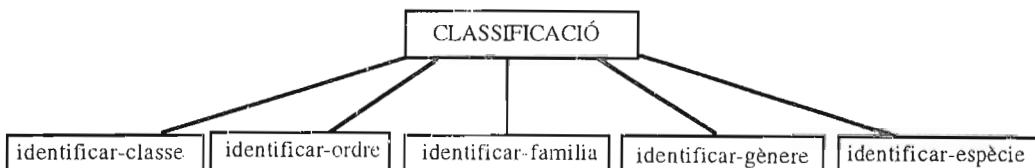


Figure 3. Descomposició en subtasques de la tasca identificar.

## 3. Discussió

L'ús del concepte d'antiunificació com a mètode inductiu ha estat poc utilitzat. El sistema KLUSTER és el primer que l'ha utilitzat per trobar generalitzacions més específiques. Probablement degut a restriccions en el formalisme que usa per representar el coneixement (KL-ONE) les descripcions que troba no són discriminants i li cal fer dos passos posteriors. Primer li cal avaluar les descripcions per assegurar que no cobreixen exemples d'altres classes. Després, i en cas que alguna descripció no sigui prou discriminant ha d'especialitzar-la. El mètode d'antiunificació proposat per nosaltres també troba la definició general més específica comú als exemples però degut al diferent formalisme de representació del coneixement nosaltres obtenim millors resultats. En particular, KLUSTER implementa un exemple senzill de descripció de medicaments i troba definicions que no són capaces de discriminar els exemples a partir de les que s'han creat, per això li calen les etapes d'avaluació i especialització. Utilitzant el nostre algorisme sobre el mateix exemple els resultats han estat que les descripcions trobades ja són prou discriminants doncs no cobreixen exemples d'altres classes. No obstant, per una aplicació real com SPIN els resultats no són tant concluents i, encara que podem assegurar que les descripcions trobades discriminen bé els exemples a partir dels que s'han construït no podem assegurar que no pugui cobrir algun contraexemple posterior. Aquest problema es deriva de la sobregeneralització que fem en els tipus i la resolució d'aquest problema passa per la introducció de disjuncions en els valors dels prototipus de manera que en lloc de generalitzar els valors pel seu tipus introduirem una disjunció entre els valors dels exemples a generalitzar. Així per exemple, si per l'atribut *geo* trobem els valors *mediterrani* i *atlantic*, actualment el generalitzem per *tipus-mar* mentre que la nostra proposta futura és generalitzar per *mediterrani* o *atlantic*. No es pot descartar tampoc que hi hagués subsumpció de prototipus cosa que ens obligaria a més a introduir la disjunció de prototipus.

Amb el mètode d'antiunificació no resolem el problema del tractament de valors desconeguts, doncs si el nou exemplar a classificar no té un dels atributs que apareixen en el prototipus d'una classe no el podrem identificar com pertanyent a ella. La solució a aquest problema podria passar per aplicar un mètode de raonament basat en casos. L'avantage del mètode que hem proposat és que no tenim perquè decidir *a priori* els atributs i valors amb que han d'estar descrits els objectes d'un domini sino que en tenim prou descriptint objectes amb els atributs i valors que coneixem de cadascun d'ells. Després, amb l'antiunificació podrem extreure el que tots ells tenen de comú.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## 4. Conclusions

Hem presentat un mètode d'aprenentatge inductiu basat en el concepte d'antiunificació. Entenem per antiunificació trobar la generalització més específica comú als objectes a generalitzar. Comparant els resultats obtinguts amb el sistema KLUSTER veiem que amb el mètode d'antiunificació aconseguim en un sol pas la definició més discriminant possible respecte als exemples d'entrada. A més, aquest mètode pot ser aplicat a un domini real amb bons resultats.

El mètode d'antiunificació ens dona l'avantatge de no haver de donar *a priori* els atributs i valors que cal utilitzar per descriure els objectes d'un domini. D'aquesta manera podem descriure els objectes de manera diferent. L'inconvenient que presenta aquest mètode és el mateix que el d'altres mètodes inductius, i és que no serà capaç de classificar un objecte com pertanyent a una classe si algun dels atributs presents en el prototipus de la classe no apareix en la descripció de l'objecte.

Un mètode inductiu pot no ser suficient per classificar nous objectes quan un atribut molt rellevant és desconegut. Això fa pensar en la conveniència d'integrar mètodes inductius i de raonament basat en casos per resoldre aquest tipus de problemes.

El nostre propòsit futur és introduir disjuncions tant de valors d'atributs com de prototipus per tal d'assegurar que les descripcions obtingudes per antiunificació no cobreixen cap contraexemple.

## Bibliografia

- PLAZA, E., ARCOS, J.L. (1994), Integration of Learning into a Knowledge modelling framework. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 867. Springer-Verlag 1994, pp. 355-373. Available online at URL "[http://www.iiia.csic.es/People/enric/EKAW-94\\_ToC.html](http://www.iiia.csic.es/People/enric/EKAW-94_ToC.html)"
- DOMINGO, M. (1995) An expert system architecture for taxonomic domains. An application in Porifera: The development of Spongia. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. Facultat de Biologia.
- KIETZ, J.U. i MORIK, K. (1994) A polynomial approach to the constructive induction of structural knowledge. Machine Learning 14, pp 193-217.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## Configuració de problemes de planificació en NOOS

*Josep Lluís Arcos<sup>1</sup>*

IIIA, Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial CSIC,  
Campus Universitat Autònoma de Barcelona,  
08193 Bellaterra, Catalonia, Spain.  
Fax: +34 3 5809661 arcos@iiia.csic.es <http://www.iiia.csic.es>

### ***1 Introducció***

La motivació principal del nostre treball és la de desenvolupar un llenguatge de representació que ens permeti configurar i combinar diversos mètodes de resolució de problemes i mètodes d'aprenentatge en un marc conú. Aquesta necessitat ve determinada perquè sovint, sobretot quan es vol atacar la resolució d'un problema complexe, no hi ha un sol mètode que satisfaci totes les nostres necessitats, sino que hi ha un conjunt de mètodes que permeten resoldre parcialment algun dels aspectes desitjats.

El nostre objectiu al dissenyar un nou llenguatge fou el d'aprofitar el treball dut a terme en el camp del desenvolupament i construcció de sistemes basats en coneixements. Concretament, volem que els elements bàsics del nostre llenguatge siguin pròxims als conceptes desenvolupats en els treballs referents a l'anàlisi dels problemes a nivell de coneixements i els entorns de modelització de coneixements. Aquests entorns de modelització de coneixements com ara KADS [Wielinga 93] o bé Commet [Steels 90] es basen en el principi de descomposició de problemes en tasques i mètodes i en l'anàlisi dels requeriments dels mètodes. La nostra hipòtesi de treball és que tant els mètodes de resolució de problemes com els mètodes d'aprenentatge es poden analitzar mitjançant aquesta descomposició tasca/mètode. A més, el que els diferencia principalment és que els mètodes d'aprenentatge són mètodes amb capacitats introspectives. És a dir, que els mètodes d'aprenentatge han de tenir un model de la inferència que es realitza en el llenguatge i han de poder accedir, i fins hi tot manipular, aquesta informació.

Per dur a terme aquests objectius estem desenvolupant el llenguatge de representació NOOS. NOOS és un llenguatge centrat en objectes amb capacitats reflexives [Arcos 95] que permet construir i combinar diversos mètodes de resolució i aprenentatge per a resoldre problemes complexes.

Un tipus genèric de problemes investigats en la Intel·ligència Artificial són els problemes de planificació. En aquesta presentació mostrarem com configurar i combinar diverses estratègies de planificació en NOOS. A més a més, presentarem un planificador no lineal basat en casos desenvolupat al nostre institut i els resultats obtinguts en el domini de transport de mercaderies entre ciutats (logistics transportation domain [Veloso 92]).

Altres treballs duts a terme mostren com configurar altres tipus de problemes en NOOS com ara raonament basat en casos [Arcos 93], integració d'inducció i raonament basat en casos [Armengol 94] o el suport que ofereix el llenguatge a la modelització de coneixements [Arcos 94].

Primerament descriurem els conceptes bàsics del llenguatge NOOS, a continuació mostrarem com planificar en NOOS i, finalment, apuntarem les línies a seguir com a treball futur.

<sup>1</sup>treball finançat pel projecte ANALOG (CICYT 122/93) i una beca del CSIC.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## 2 El llenguatge NOOS

Els elements principals del llenguatge NOOS són les entitats. Les entitats es descriuen mitjançant característiques. Les característiques es poden definir a la vegada mitjançant referències a altres entitats (per exemple l'entitat Joan té la característica mare que referencia l'entitat Maria), o bé mitjançant referències a característiques d'altres entitats (per exemple, el pare del joan és el mateix que el pare del seu germà), o finalment, bé mitjançant mètodes.

Un altre camí per definir entitats és mitjançant el refinament. Una nova entitat es pot definir com a refinament d'una altra entitat a la que hi afegim un conjunt de noves característiques i en redefinim algunes de les ja existents. Per exemple, podem definir l'entitat cotxe amb totes les característiques comunes dels cotxes i després refinar aquesta entitat per descriure exemples concrets de cotxes.

Els mètodes són entitats avaluables en que les seves característiques són interpretades com a tasques. Concretament, el conjunt de característiques definides en un mètode és interpretat com la descomposició en subtasques del mètode. El llenguatge facilita un conjunt de mètodes bàsics predefinitos a partir del qual podem construir nous mètodes mitjançant el refinament i la combinació.

Una altra característica important del llenguatge és que podem descriure meta-entitats. Una meta-entitat és una entitat, que es descriu anàlogament a una entitat, en la que hem establert un vincle de metanivell amb una altra entitat que anomenem *referent*. Aquesta possibilitat ens permet per exemple descriure diversos mètodes aplicables a una característica de l'entitat referent i criteris de preferència entre ells. L'existència de meta nivells ens permet a més a més incorporar de forma uniforme els mètodes d'aprenentatge.

100

El llenguatge està dotat d'un mecanisme automàtic d'emmagatzematge de les decisions que es prenen en cada pas de la inferència. Aquest conjunt d'informació l'anomenem la *memòria episòdica* del llenguatge i conforma l'*automodel* del llenguatge. Aquesta característica permet també que es pugui configurar mètodes d'aprenentatge.

El mecanisme d'accés a la memòria episòdica és la recuperació. La nostra aproximació és que quan estem interessats en obtenir informació sobre situacions *similars* ja resoltes ho podem fer mitjançant descripcions parcials de situacions. Com que tot en el llenguatge és uniforme, aquestes descripcions parcials de situacions les podem descriure a partir de descripcions parcials d'entitats. Això fa que la recuperació es pugui reduir bàsicament al problema de trobar entitats que subsumeixin una descripció desitjada. Per exemple, si estem intentant diagnosticar la causa d'una avaria en un cotxe, una possible estratègia seria la de recuperar entitats que també siguin un refinament de cotxe i que tinguin el mateix problema que el que ens ocupa, i intentar aplicar en el nou problema els diagnostics que han funcionat en aquests casos precedents. El llenguatge ofereix un conjunt de mètodes predefinitos que permeten recuperar entitats mitjançant la descripció d'altres entitats patró.

## 3 Planificació

Per poder configurar problemes de planificació en NOOS hem de descriure dos tipus de coneixements diferents: el *model de planificació* i els *mètodes de planificació*. En el model de planificació hem de descriure la forma de representar els *estats*, els *objectius*, els *operadors* i els *plans*. Els mètodes de planificació ens permetran dissenyar diferents estratègies de planificació i els descriurem mitjançant la descomposició de tasques i mètodes. Una descripció de la caracterització dels problemes de planificació a nivell de modelització de coneixements es pot trobar en [Valente 94]. Una visió més orientada a la implementació es pot trobar també en [Weld 94].

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

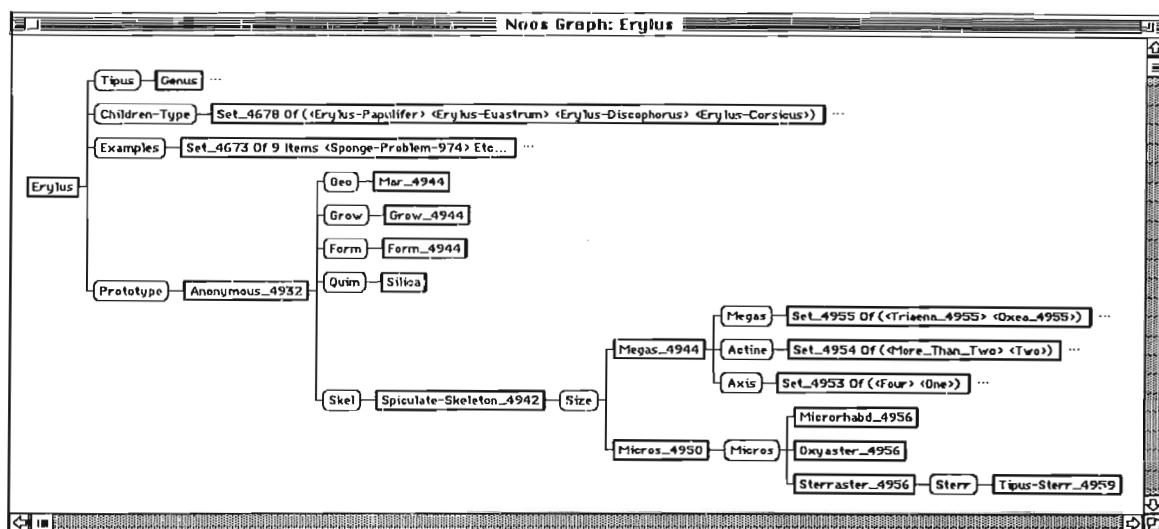


Figura 1. Exemple de descripció d'un estat amb dos camions, un a la ciutat city1 (post-office1 es troba a city1) i l'altre a la ciutat city2 (post-office2 es troba a city2), un paquet que es troba a post-officel i un avió que es troba a l'aeroport airport1. El traç gruixut indica que és una entitat mentre que el traç prim indica que és una característica.

## 3.1 El domini de transport de mercaderies

Abans de parlar dels elements que configuren un problema de planificació descriurem el domini utilitzat per il·lustrar-los. El domini de transport de mercaderies consisteix en resoldre objectius de transportar paquets d'una localització a un altre mitjançant camions i avions. En un problema hem d'especificar un conjunt de ciutats. En cada ciutat establirem un conjunt d'aeroports i un conjunt d'edificis de correus. També hem d'especificar un conjunt d'avions i de camions determinat i donar-los una localització inicial. Finalment hem d'especificar un conjunt de paquets i donar-los també una localització inicial. S'ha de tenir en compte que els camions només es poden moure dins d'una ciutat, havent d'utilitzar un avió si volem traslladar un paquet a una localització que es troba a una ciutat diferent. En aquest domini hi ha set operadors que ens permeten canviar d'estat: carregar un paquet a un camió, descarregar un paquet d'un camió, conduir un camió d'una oficina de correus a un aeroport de la ciutat, conduir un camió d'un aeroport a una oficina de correus de la ciutat, carregar un paquet a un avió, descarregar un paquet d'un avió i traslladar un avió d'un aeroport a un altre.

## 3.2 Model de planificació

Un *estat* del món el representarem com una entitat amb un conjunt de característiques que contenen com a valors el conjunt d'objectes del nostre del problema. Aquests objectes seran representats a la vegada com a entitats amb un conjunt de característiques que establiran relacions entre els diferents objectes. Per exemple, en el domini de transport de mercaderies una descripció d'un estat serà una entitat que contindrà un conjunt de camions, paquets i avions; a la vegada cada camió, paquet o avió serà una nova entitat que contindrà un conjunt de característiques amb relacions entre elles (veure fig. 1).

L'estat inicial ha de contenir la descripció total del món. Només els objectes descrits en l'estat inicial seran utilitzats en la construcció del pla solució.

Els *objectius* seran representats en NOOS com a descripcions parcials d'estats. Concretament, el conjunt d'objectius inicials constituiran la descripció parcial de l'estat final al que volem arribar. Un exemple d'un objectiu es mostra en la figura 2.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements



Figura 2. Exemple de la descripció d'un objectiu (transportar el paquet box1 a post-office2 (que és a la ciutat city2)

Els *operadors* són descrits mitjançant *precondicions* i *efectes*. Les *precondicions* són també descripcions parcials d'estats. Aquestes descripcions parcials especificuen el conjunt de restriccions d'aplicabilitat. Els *efectes* són també descripcions parcials d'estats. Les descripcions parcials dels efectes especificuen els canvis que provoca l'aplicació de l'operador. Per exemple, l'operador de carregar un camió tindrà com a precondició un estat en que hi hagi un camió en el mateix lloc que un paquet, i com a efecte un estat en que el paquet és dins del camió.

Un pla és una composició de passos elementals que permeten satisfer els objectius a partir de l'estat inicial. Un pas elemental es correspon a l'aplicació d'un operador i conté la informació referent a l'estat, els objectius, l'operador seleccionat, el nou estat o els nous objectius (dependent de si planifiquem endavant o endarrer) i el subpla que donada la nova situació ens permet arribar als objectius desitjats (en planificació endavant) o a l'estat inicial (planificació endarrer).

102

## 3.3 Mètodes de planificació

Per atacar problemes de planificació hi ha dos enfocs bàsics: mitjançant la *cerca en l'espai d'estats* [Fikes 72] o mitjançant la *cerca en l'espai de plans* [Sacerdoti 74], [Chapman 87]. Dins del primer enfoc els diferents mètodes de planificació els podem agrupar a la vegada en dos grans grups: mètodes de planificació endavant i mètodes de planificació endarrera (o regressius). Els mètodes de planificació endavant parteixen de l'estat inicial i el van transformant aplicant operadors fins arribar a un estat que satisfà els nostres objectius. Els mètodes de planificació endarrera parteixen dels objectius i mitjançant l'aplicació inversa dels operadors van generant nous objectius fins a obtenir un conjunt d'objectius que se satisfan en l'estat inicial. Una altra manera de caracteritzar els mètodes de planificació és per si realitzen una cerca en profunditat o en amplada.

La nostra recerca fins aquest moment s'ha centrat tant en mètodes de planificació endavant com endarrera però que funcionen fent cerca en profunditat i resseguiment (backtracking) en l'espai d'estats. El conjunt de mètodes dissenyats els podem descriure mitjançant una descomposició de tasques comuna (veure fig. 4). La tasca de comprovació d'acabament consisteix bàsicament en comprovar si els objectius es satisfan en l'estat actual. La segona tasca, selecció d'operador, és la tasca que permet configurar diferents estratègies. Per exemple, un mètode de cerca amb anticipació explorarà l'aplicació de tots els operadors i, en funció d'alguna heurística, decidirà quin és l'operador més adient. La tasca següent és la d'aplicar l'operador escollit per obtenir un nou estat (planificació endavant) o uns nous objectius (planificació endarrera). Finalment aplicarem recursivament el mateix mètode fins que es satisfaci la condició d'acabament.

Els mètodes dissenyats són mètodes de planificació no lineals ja que en cada pas de selecció tenen en compte el conjunt complet d'objectius. Això permet un entrelaçament en la resolució dels diferents subobjectius. És a dir, es generen plans no lineals totalment ordenats.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

B U T L E T I d e l C A R T O

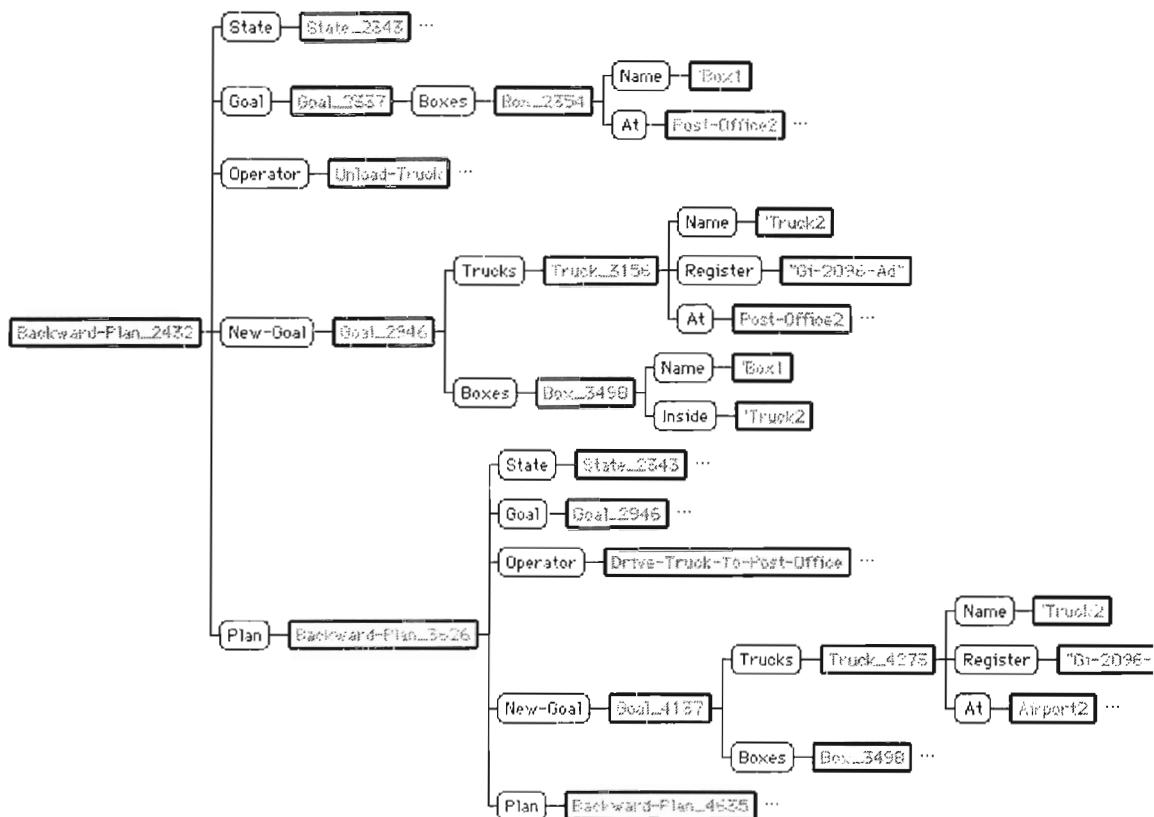
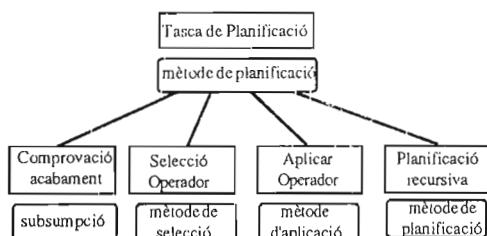


Figura 3. Exemple de dos passos elementals d'un pla generals per un mètode de planificació endarrera.

103

Figura 4. Descomposició de subtasques dels mètodes de planificació.



## 3.4 Planificació basada en casos

El planificador que hem dissenyat combina els mètodes de cerca endarrera amb un mètode basat en casos que, aprofitant l'experiència de problemes ja resolts, guia la selecció dels operadors més prometedors en cada moment reduint així l'espai d'exploració. La idea essencial del mètode és la d'utilitzar el conjunt d'objectius que es tenen en cada pas elemental per recuperar de la memòria episòdica el conjunt de passos elementals ja resolts que continguin com a mínim els mateixos objectius que els actuals, utilitzant un mètode refinat a partir del mètode de recuperació d'entitats a partir d'una descripció parcial d'entitat que ofereix NOOS. A partir d'aquest conjunt de precedents es pot inspeccionar els operadors aplicats en cada cas i guiar el procés de cerca provant d'aplicar primerament aquest conjunt d'operadors.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## 4 Experiment

L'experiment realitzat en el domini de transport de mercaderies l'hem elaborat utilitzant el conjunt riels set operadors i un conjunt variable de ciutats, camions, avions i paquets. S'han fet diferents proves amb diferent nombre d'elements i diferent nombre d'objectius generats aleatoriament. El resultat ha estat que el planificador basat en casos permet escollir els operadors que ens porten més ràpidament a un pla solució i disminueix el replantejament de decisions. Això és degut principalment a que la mitjana d'operadors seleccionats pel mètode de recuperació com a més rellevants és de dos i que en alguns casos es capaç d'identificar només un sol operador.

## 5 Treball futur

Un dels primers treballs a fer és el d'aplicar aquest mateix planificador a altres dominis i comparar els resultats. Actualment s'han construit ja altres dominis com són el domini del món dels blocs i el domini dels laberints (conjunt d'habitacions connectades per portes), i s'hi han fet algunes petites proves que fan preveure també uns bons resultats i corroboren la idea inicial que els mètodes dissenyats són independents dels dominis concrets.

Una segona línia de recerca fa referència a construir altres mètodes d'aprenentatge que ajudin a la planificació. Un primer mètode basat en precedents seria poder detectar quan tenim un subpla ja resolt i podem assegurar que la seqüència d'operadors que conté és ja directament aplicable al problema actual. També tenim previst treballar amb mètodes que treballin amb re-planificació i planificació jeràrquica, així com estudiar el problema de la planificació distribuïda.

Finalment, una tercera línia a explorar és la de com configurar mètodes de planificació que construeixin plans solució com a seqüències d'operadors parcialment ordenats.

## Referències

- ARCOS, J. L., AND PLAZA, E. (1993), A Reflective Architecture for Integrated Memory-based Learning and Reasoning, In S. Wess, K.D. Althoff, M.M. Richter (Eds.), *Topics in Case-Based Reasoning. Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 837, p. 289-300. Springer Verlag: Berlin.
- ARCOS, J.L., PLAZA, E. (1994), Integration of Learning into a Knowledge modelling framework. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 867. Springer-Verlag 1994, pp. 355-373.
- ARCOS, J.L., PLAZA, E. (1995), Reflection in Noos: An object-centered representation language for knowledge modelling. IJCAI-95 Workshop on Reflection and Meta-Level Architecture and their Applications in AI. Agost 1995.
- ARMENGOL, E., PLAZA, E.: Integrating induction in a case-based reasoner. Proc. 2nd European Workshop on Case-based Reasoning, (en premsa).
- CHAPMAN, D. (1987) Planning for conjunctive goals. *Artificial Intelligence* 32(3): 333-377.
- FIKES, R. E., NILSSON, N. J. (1971). STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 2.
- SACERDOTI, E. (1975) The Nonlinear nature of plans. In *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 206-214.
- STEELS, L. (1990) The Components of Expertise, *AI Magazine*, 11(2):29-49.
- VALENTE, A. (1994) Planning, in Commonkads library for expertise modelling. Edited by J. Breuker and W. Van de Velde. IOS Press.
- VELOSO, M., (1992): "Learning by analogical reasoning in general problem solving". Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- WELD, D. S. (1994) An Introduction to Least Commitment Planning, *AI Magazine*, 15(4):27-61.
- WIELINGA, B., SCHREIBER, A., BREUKER, J (1992), KADS: A modelling approach to knowledge engineering. *Knowledge Acquisition* 4(1).

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## Experiències en el camp de la Generació de Regles

David Riaño Ramos

Dept. Enginyeria Informàtica  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica  
Universitat Rovira i Virgili  
Tarragona  
e-mail: drianyo@etse.urv.es

### 1. Introducció

El tema que enfoca la meva tesi de doctorat es troba orbitant entorn del procés de classificació de dominis poc estructurats (o poc informats). Això és, obtenir una estructuració o organització allà on els experts no l'han trobada o bé allà on els experts no arriben a un criteri unànim. Exemples d'aquests dominis, que per altre banda han servit d'exemplificació al meu treball de tesina [Riaño 94] de la que parlaré més endavant, són les *malalties mentals*, regne de les *esponges marines*, estudi del cabal en una planta depuradora d'*aigües residuals*, etc.

En el camí a l'estructuració d'aquest domini es considera l'actuació d'un procés classificador, en aquests cas, portat a terme sota el sistema de classificació LINNEO<sup>†</sup> elaborat com a tesi doctoral del Dr. Javier Béjar [Béjar 95] amb incorporació de nous conceptes (en forma de mòduls integrats en el sistema global) com són EGAG (mòdul de consens [Torra 95] de les dades arribades, de forma que ara és possible entrenar el classificador a partir de les dades donades per múltiples experts o observadors), classificació Not-Yet (sofisticació del procés de classificació [Roure 94] mitjançant el qual les classes són elements més estables al llarg del procés d'entrenament del classificador), o estudis sobre la irrelevància dels atributs [Belanche 91] emprats en la descripció dels exemples al llarg de l'entrenament.

### 2. Treball Prèvi

La base del treball que actualment duc a terme va ser inicialment establerta al llarg de la preparació de la tesina [Riaño 94a]. En ella es plantejava la construcció d'un sistema de classificació basat en regles a partir de l'estudi aïllat d'una sèrie de paràmetres que defineixen qualsevol sistema generador de regles, com són: què format de premisa volem per les nostres regles?, quin tipus de regla estem definint?, es treballa o no amb criteris d'incertesa?, quines heurístiques es fan servir en el procés de selecció dels components elementals de la regla?, quin tipus d'organització existeix entre les diferents regles que descriuen un mateix concepte o classe?, etc.

El resultat va ser la implementació de 10 algoritmes diferents, tots ells amb el propòsit general de generació d'un conjunt de regles descriptives de les classes d'un domini determinat. Tots 10 algorismes van ser aplicats a tres dominis concrets: *malalties mentals*, *esponges marines* i *votants americans* (les proves parcials, però, van ser realitzades sobre un domini menor -tiny problem- i més manegable, el que classificava *països* segons la seva riquesa); i els resultats en qüestió de temps de càlcul i de bondat dels resultats són tabulats i graficats.

Cadascuna de les preguntes que defineixen els paràmetres es van analitzar en detall abans d'implementar els algorismes en qüestió. Així l'estudi dels *tipus de premisa* possibles em van dur a la consideració de

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

premises de tipus conjuntiu (conjuntiu pur o k-CNF) i disjuntiu (k-term-DNF o k-DNF), formes per altra banda ampliament referenciades. Per contestar quins *tipus de regles* podem definir, es van estudiar per separat (1) les regles de descripció del domini i (2) les regles de control, arribant a la consideració exclusiva de les primeres per ser les segones mereixedores d'un estudi en més profunditat, fora de l'àmbit de dificultat d'una tesina. La consideració de criteris d'*incertesa* em van dur al desenvolupament teòric de, per un costat, varis models probabilistes i, per l'altre, de l'adaptació del model d'evidències de Dempster-Shafer al problema tractat i la consideració del coneixement difús amb l'inclusió d'etiquetes lingüístiques. Per raons de manca de temps (i altres considerades a la secció 3) cap dels models d'incertesa desenvolupats van arribar a ser provats sobre les dades reals. En el camp de la *interrelació de les regles* es va considerar el cas de disposar de conjunts no ordenats de regles (l'ordre d'aplicació de les regles és irrelevat pel fet que aquestes són commutables) en front de conjunts ordenats (on les regles s'han d'aplicar en l'ordre en que han estat creades, es a dir de lo general a lo particular).

Per últim, es van considerar un parell d'*heurístiques* que es feien servir en el procés de construcció de les regles, en el moment de selecció de la "millor" condició a afegir a la premissa. Aquestes heurístiques eren: H1, "prendre la condició que més bé va"; H2, "prendre la condició que menys malament va". Aquestes heurístiques em van fer recapacitar sobre com es veurien modificades en ser aplicades en programes estructurats sota un esquema diferent del Hill-Climbing. El resultat d'aquestes consideracions ve expressat en [Riaño 94b] i considera l'estudi general de tres famílies linials d'heurístiques dins algorismes Best-first, Hill-Climbing i A\*.

De la meva estada al CWI (Amsterdam) també queda un segon report [Riaño 94c], aquesta vegada sobre el treball d'extracció d'estructures en forma de conceptes dins un domini expressat com una llista de conjuncions.

106

Altres treballs s'estan duent a terme hores d'ara en temes com: Implementació d'un conjunt de transformadors per compactació de conjunts de regles (aplicació al domini d'aigües residuals), modelització de la tasca de classificació, consideracions d'heurístiques generals en la construcció d'expressions DNF i variants (en procés), i altres.

## 3. Preocupacions Actuals

Els punts de vista que aparèixen a continuació reflexen el meu escepticisme envers els sistemes supervisats de classificació dels que tinc coneixença. Aquest escepticisme és conseqüència, en part, de la problemàtica de la *representativitat* (factor directament dependent del llenguatge en que hem de definir el coneixement après: tipus de regles, tractament o no d'incertesa, descriptors permesos, etc.). Si els factors que afecten la representativitat són finits, això és el nombre de representacions possibles és finit, el problema de trobar la millor representació (sempre que sapiguem què vol dir millor) és un problema d'optimització del temps i de trobar algorismes més ràpids. Exemple: amb N descriptors i permeten únicament K regles conjunctives, podem obtenir  $n=2^N$  expressions conjunctives diferents i  $C_n^{K+C_n}$   $^{1+ \dots + C_n^0}$  ( $C_j$  = combinacions de i elements pressos de j en j) possibles representacions. El problema és doncs trobar algorismes cada cop més eficients, però l'eficiència no és independent del problema tractat i, per tant, algorismes que són bons en certs dominis poden ser molt dolents en altres dominis, o sota altres restriccions de programació.

Altre punt que em sembla contradictori (o poc realista) és el fet d'intentar aprendre en dominis infinitis amb un sistema sota esquemes de representació esbiaixats o finits. És possible representar un coneixement presumiblement infinit mitjançant una representació finita? fins a quin punt podríem acceptar aquest fet? Alternativament no es podria aprendre en termes de constructes que puguin tractar aquesta problemàtica?

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

Part dels meus esforços actuals apunten a obtenir una resposta a les preguntes més modestes:

1. Quin és el màxim de coneixement que podem extreure de les dades?
2. Es aquest coneixement suficient per construir artefactes "intel·ligents" o estarem sempre supeditats a la revisió d'un expert?
3. Es possible veure el procés d'aprendentatge des d'una òptica científica o estem condemnats al punt de vista enginyeril (si funciona, que més volem)?

Com podeu comprovar aquestes són preguntes de caire molt filosòfic, però que tenen repercussions directes sobre els punts, més tangibles, relacionats amb el meu treball:

- Donat un problema (domini) i un llenguatge de representació (regles) quin elements d'estrucció seria interessant tenir-hi, i a quin cost.
- Quina fiabilitat podrem obtenir del procés d'aprendentatge en dominis incerts, estudi comparatiu de les múltiples diferents alternatives.
- Concepte d'infinitud, què (i com) podem aprendre en un domini infinit, quines estructures disposem per representar aquest coneixement infinit (recursivitat, reflexivitat, reificació, ...).

Una possible contraproposta en aquest estudi podria ser la d'enfocar el problema sota una òptica de validació de bases de coneixement. Aquesta alternativa no és que no s'hagi tingut en compte, sino més aviat és el fet de que per validar el coneixement cal disposar d'ell i, per tant, haver-ho representat, i és en el procés de representació en el que es localitza tota la problemàtica. L'únic punt d'esperança, i és on dedicaré el meus esforços futurs, és en el de la construcció incremental de bases de coneixement.

## 4. Treballs Referenciat

- [Béjar 95] Javier Béjar, Tesi Doctoral, Dept. LSI, UPC, (1995).
- [Belanche 91] Lluís A. Belanche, *To be or nought to be. Una qüestió irrelevante?*, Tesina, Dept. LSI, UPC, (1991).
- [Riaño 94a] David Riaño, *Automatic Knowledge Generation from Data in Classification Domains*, Tesina, Dept. LSI, UPC, (1994).
- [Riaño 94b] David Riaño, *Knowledge Abstraction using Heuristic Search. I: A specialization Approach*, Research Report CS-R9469, CWI, Amsterdam, (1994).
- [Riaño 94c] David Riaño, *One Incursion in the non-Supervised Generation of Concepts*, Research Report CS-R9472, CWI, Amsterdam, (1994).
- [Roure 94] Josep Roure, *Study of Methods and Heuristics to Improve the Classification of LINNEO<sup>+</sup>*, Tesina, Dept. LSI, UPC, (1994).
- [Torra 95] Vicenç Torra, *Contribució a l'estudi de funcions de síntesi per a la Intel·ligència Artificial*, Tesi Doctoral, Dept. LSI, UPC, (1994).

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

## Consensus based validation in knowledge base systems

Vicenç Torra

Dpt. d'enginyeria informàtica, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE),  
Universitat Rovira i Virgili

Carretera de Salou, s/n, E-43006 Tarragona (Spain),  
E-mail: vtorra@etse.urv.es

BUTIADA DE LA CIÈNCIA

### 1. Introduction

In all the processes (e.g., knowledge acquisition (Torra et al., 1995) and validation (Meseguer et al., 1993)) related with the definition of a Knowledge Based System (that is, the construction of a model) is more and more frequent the participation of several experts. In this case the combination of information is used so that the knowledge embedded in the KBS is more reliable and with less errors than when a single expert is considered. This presentation is focused on synthesis of information for KBS validation.

Validation of Knowledge based systems (KBS), like validation of conventional programming is to check if the system satisfies the needs of the user. However, software engineering techniques have a limited use for KBS builders because both frameworks are not equivalent. Some of the reasons that make the difference are pointed out in (Bellman, 1990, Nazareth et al., 1993, O'Keefe et al., 1993, Meseguer et al., 1993, Krause et al., 1993):

- KBSs have deceptively simple procedures. Most of the program flow and control is hidden in the knowledge base. In fact, it is difficult to divorce between the software and the model.
- Little method or experience is nowadays available for identifying and correcting the errors that may occur.
- Most KBS are not "stand-alone" systems; to the contrary, most KBSs are only one (often small) part of a larger system.
- Usually, the requirements are ill-defined. Because of that, the specification is often incomplete and not adequate for validation. In fact, a complete specification would suggest the use of a traditional programming language.

Several tools have been developed for KBS validation to overcome these difficulties. They can be classified in three groups, as the validation of a KBS encompasses three different analysis (Meseguer, 1992, Hoppe, Meseguer, 1993): verification, evaluation and test. On one hand, verification and evaluation consist of checking whether the system satisfies, respectively, completely formalizable requirements and partially formalizable ones (inconsistencies, circularity rules,... e.g., Kinkiélé, Ayel, 94, O'Keefe, O'Leary, 93). On the other hand, a test is an exam of the behaviour of the system with respect to a given sample case set (e.g., in Hernandez, et al., 1995).

These tools usually need, besides of the knowledge embedded in the KBS, some extra knowledge that should be supplied by domain experts. This fact, together with the one that validation can be performed at different stages, makes validation a process related with KBS definition instead of a separated one. In fact, these days some tools are built to integrate validation in KBS developing systems. See for example (Gaines et al., 1993) and (O'Keefe et al., 1993).

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

As it has been said, one of the analysis to be performed on a KBS is the study of its level of expertise (to test the KBS). This study can be done (O'Keefe et al., 1993) considering the individual components of the system or the system as a whole. In this later case, the system is treated as a black box simply to determine if it is making the right decisions. On the other hand, in the former case, the KBS is opened up to determine if the line of reasoning is correct, i.e., if it is making the right decisions for the right reasons.

When a system is tested as a whole, we need a sample case set. The selection of cases in this set has to follow some guidelines. These are, according to (O'Keefe et al., 1993):

- The sample case set has to reflect the cases that the system will encounter.
- The number of cases has to be enough to elicit the range of parameters necessary to test the system and to be able to establish some statistical measures of significance.
- The characteristics of the cases should be established from the study of the nature of the problem.
- In some problems the decisions taken by the expert precipitate the actual outcome. Then, the cases cannot be taken into account.

Sometimes the sample case set is not available. In these cases some synthetic ones can be produced. However, when this is done by hand, as is pointed out by (O'Keefe et al., 1993) it is dangerous, and demands considerable objectivity. In some cases the sample case set is created automatically (see Ayel, Lauren 1991, Ayel, Vignollet, 1993).

When a KBS is tested, together with the sample case set we need the optimum solution for each case. This solution is called the golden standard. However, the golden standard is often not known, instead, we usually have available the diagnosis given by an expert or by a set of experts. In this later case, the golden standard can be approximated by a synthesised diagnosis obtained from the diagnosis of the experts through a consensus function. However, it is not always possible to combine the diagnosis of all experts because the values of the experts might be non comparable (O'Leary, Pincus, 1993) or because there is not an intuitively clear consensus function.

When a set of experts is available, Turing tests are appropriate as a validation method (O'Keefe, O'Leary, 1993). Although there are some drawbacks in their application (see Rousset, 1994, for a review of fundamental problems) they have been used in KBS validation.

## 2. Previous results

The main intention of our work was a formal definition of an approximation of the golden standard, and its application to test the expert system Pneumon-ia (Verdaguer, 1989). In the first approximation, due to the fact that in a diagnosis (i.e., a mapping from possible solutions to linguistic labels) a linguistic label in isolation has no clear meaning we dealt with relations between pairs of possible solutions. In fact, the meaning of a label depends on the whole set of linguistic labels used and also on the expert that uses it. Therefore, we consider more meaningful, and more comparable, the relation among pairs of values than the values themselves. According to this, we built a relation from each diagnosis.

In a first step, instead of approximating the golden standard relation by a synthesis of the relations we introduced a consensus interval where the golden standard relation should belong. We introduced both a crisp and a fuzzy consensus interval, stated some properties of both intervals and analysed the results of the expert system Pneumon-ia in relation with them (by means of a Turing Test).

In a second step we studied a synthesising function for fuzzy relations. We built a function when it is supposed to be a quasi-arithmetic mean. The function was built, after stating some natural conditions,

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

through functional equations (Aczél, 1987). The synthesised relation was again used to evaluate the behaviour of the expert system Pneumon-ia.

In a second approximation we considered whether the synthesised relation could be built not only as the synthesis of the fuzzy relations but also from a synthesised diagnosis. We have proven that there are several diagnosis that satisfies this condition, and studied a synthesis function for diagnosis that lead to the synthesised fuzzy relation (Torra, 1995a).

## 3. Future work

- 1) The results achieved suppose a fuzzy relation definition function of the form  $\rho(x,y)=\varphi(\phi(\varphi^{-1}(x)\cdot\varphi^{-1}(y)))$ . This family of functions can be further studied.
- 2) The test of the expert system has been done defining a distance between fuzzy relations. As the distance used has some drawbacks, a new distance should be studied.
- 3) Although the diagnosis of the experts are defined as mappings from possible solutions to linguistic labels, all the results suppose a monotonic mapping from the linguistic labels to the unit interval. An alternative analysis within the framework of linguistic labels is possible. This approach would use the operations and synthesis functions defined over linguistic labels introduced in (Delgado et al., 1993, Herrera et al., 1995).

## 4. References

- [1] J. ACZÉL, *A short course on functional equations*, (D. Reidel Publishing Company, 1987).
- [2] M. AYEL, J.-P. LAURENT, (Eds.) *Validation, Verification and Test of Knowledge-Based Systems*, John Wiley & Sons, 1991.
- [3] M. AYEL, L. VIGNOLLET, "SYCOJET and SACCO, Two Tools for Verifying Expert Systems", *International Journal of Expert Systems*, Vol.6:3, pp. 357-382, 1993.
- [4] K. L. BELLMAN, "The Modeling Issues Inherent in Testing and Evaluating Knowledge-Based Systems", *Expert Systems With Applications*, Vol. 1, pp. 199-215, 1990.
- [5] M. DELGADO, J.L. VERDEGAY, M.A. VILA, On Aggregation Operations of Linguistic Labels, *Int. J. of Intelligent Systems*, Vol. 8, pp. 351-370, 1993.
- [6] B. R. GAINES, M. L. G. SHAW, "Knowledge Acquisition Tools Based on Personal Construct Psychology", *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 8:1, pp.49-85, 1993.
- [7] C. HERNANDEZ, J.J. SANCHO, M.A. BELMONTE, C. SIERRA, F. SANZ, Validation of the Medical Expert System RENOIR, *Computers and Biomedical Research* 27 (1995) 456-471.
- [8] F. HERRERA, E., HERRERA-VIEDMA, J.L., VERDEGAY, "A Sequential Selection Process in Group Decision Making with a Linguistic Assessment Approach", *Int. J. Information Science*, 80, 1-17 (1995).
- [9] T. HOPPE, P. MESEGUER, "VVT Terminology: A Proposal", IEEE Expert, June, pp. 48-55, 1993.
- [10] D. KINKIELÉLÉ, M. AYEL, On Discovering Potential Inconsistencies in Validating Fuzzy Knowledge Bases, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Paris, July 4-8, 1994 533-539.
- [11] P. KRAUSE, J. FOX, M. O'NEIL, A. GLOWINSKI, "Can We Formally Specify a Medical Decision Support System", IEEE Expert, June, pp. 56-61, 1993.
- [12] P. MESEGUER, *Validation of Multi-Level Rule-Based Expert Systems*, Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (1992).
- [13] P. MESEGUER, A. VERDAGUER, "Verification of Multi-Level Rule-Based Expert Systems: Theory and Practice", *International Journal of Expert Systems*, Vol. 6:2, pp.163-192, 1993.
- [14] D. L. NAZARETH, M. H. KENNEDY, "Knowledge-Based System Verification, Validation, and Testing: The Evolution of a Discipline", *International Journal of Expert Systems*, Vol. 6:2, pp.143-162, 1993.

# Aprendentatge i adquisició de coneixements

- [15] R. M. O'KEEFE, D. E. O'LEARY, "Expert System Verification and Validation a Survey and Tutorial", *Artificial Intelligence Review*, Vol. 7, pp. 342, 1993.
- [16] D. E. O'LEARY, K. V. PINCUS, "Models of Consensus for Validation of Expert Systems", *International Journal of Expert Systems*, Vol. 6:2, pp.237-249, 1993.
- [17] M.-C. ROUSSET, "Knowledge Formal Specifications for Formal Verification: A Proposal Based on the Integration of Different Logical Formalisms", Proceedings of the 11th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-94), Amsterdam, The Netherlands, August 8-12, pp. 739-743, 1994.
- [18] C. SIERRA, *MILORD: Arquitectura multinivell per a sistemes experts en classificació*, Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (1989).
- [19] V. TORRA, *Contribució a l'estudi de funcions de síntesi per a la intel.ligència artificial*, Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (1994).
- [20] V. TORRA, Synthesis of fuzzy relations for knowledge based systems, Submitted to *Fuzzy Sets and Systems*. (1995).
- [21] V. TORRA, Synthesis of information in KBS Validation, Para ser presentado en el congreso de la Asociación Española de Tecnología y Lógica Fuzzy, Murcia, (1995a)
- [22] V. TORRA, U. CORTÉS, Towards an Automatic Consensus Generator Tool: EGAC, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 25:5, 888-894, (1995).
- [23] A. VERDAGUER, *PNEUMON-IA: Desenvolupament i validació d'un sistema expert d'ajuda al diagnòstic mèdic*, PhD Dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona, 1989.

# SISTEMES BASATS EN CONEIXEMENTS

Karina Gibert, Manuel Hernández Pajares  
Josep Puyol i Gruart  
Marta Domingo i Gou  
Enrique Paniagua Arís

## Classification based on rules

Karina GIBERT\*

Universitat Politècnica de Catalunya  
Pau Gargallo, 5. Barcelona. 08028. SPAIN.

### 1 Introduction

Classification in *ill-structured* [GIBE93] domains is a difficult problem for the actual statistical and artificial intelligence techniques, because of the intrinsic characteristics of those domains. Briefly, although additional expert knowledge on the domain structure is always available, construction of complete knowledge bases, to be used in diagnostic oriented systems, is almost unreachable due to the complexity of these kind of domains. On the other hand, statistical clustering of ill-structured domains (based on distances, which are, in fact, syntactic criteria) usually has a rather random behavior. Actually, quantitative and qualitative variables — the last ones with great number of modalities — coexists, but standard statistical techniques where not specifically designed for simultaneous treatment of numerical variables and great quantities of qualitative information.

Classification based on rules is our proposal to overcome the limitations of Statistics and Artificial Intelligence techniques referred to this particular context. KLASS is a clustering tool that can use semantic information to guide the classification process. It is parameterized on the aggregation criteria and the metrics. One of its most important features is the use of both qualitative and quantitative variables in the object descriptions, maintaining the symbolic representation of the first ones and avoiding unnatural codifications of quantitative variables. To allow that, the definition of a class representative for qualitative variables is needed as well as the definition of a new measure to evaluate distances between individuals — [GIBE94].

### 2 The methodology

Classification with rules consists on a mixt classification strategy, that incorporates *partial* and/or non-homogeneous knowledge that the expert has on the domain to improve the performance of a statistical clustering algorithm. It is an iterative and interactive process at the end of which, a *satisfactory* classification can be obtained, according to the expert goals. This methodology solves the expert difficulties when formalizing its knowledge in a complete and precise way for ill-structured domains. Let's call  $\mathcal{I} = \{i_1 \dots i_n\}$  the set of individuals to be classified.

1. **Initialization phase:** Classify  $\mathcal{I}$  (see algorithm in §2.1); obtain an initial hierarchical tree. Cut the tree and analyze this partition. Determine an initial set of logic rules.

\*Department of Statistics and Operation Research. Tel: 34-3-4017323. Fax: 34-3-4017040. e-mail: karina@eio.upc.es.

This work has been developed together with Dr. Manuel Hernández Pajares and Dr. Ulises Cortés García, both from UPC.

# Sistemes basats en coneixements

2. **Background knowledge acquisition phase:** Determine the partition induced by the rules §2.2 — this is equivalent to pack knowledge *pieces* in functional units, introducing *semantics* into the system. Built a residual class with the objects for which no information is provided. Study the objects selected by contradictory rules [GIBE93]. Reformulate the rules set if necessary.
3. **Classification phase:** Perform the clustering for each class induced by the rules. Determine their hierarchical trees, prototypes and associated masses.
4. **Integration phase:** Add the prototypes from step 3 to the residual class, as if they were ordinary objects, but taking into account their masses. Classify the resulting data set. A unique hierarchy is built for all the individuals, based on the conceptual description of the classes. Determine the tree-cut which will constitute the final classification. With this information, the expert has to *interpret* the meaning of classification. If the results are not satisfactory reformulation of the rules set and return to point 2 is needed.
5. **Results production phase:** Automatical generation of final reports.

The presented methodology is a new technique to perform classifications of any heterogeneous data matrices and produces specially good results when analyzing data from ill-structured domains.

## 2.1 The clustering

As said before, in the kernel of **KLASS** there is a clustering process. **KLASS** is an addapted version of the *chained reciprocal neighbours (RN) algorithm*, which is based on the concept of *reciprocal neighbours*. At every step, a pair of *RN* is<sup>1</sup> aggregated in a new class. The chained version is a quick algorithm of  $O(n_{obj}^2)$  worse case complexity.

Hard work has been required on two specific points of the algorithm to allow classification of heterogeneous data matrices: Class representation (§2.1) and distance between individuals (§2.1).

**Class representation** Calculation of the quantitative components of the gravity center of a class is easy, but some research was needed for qualitative ones. In [GIBE93] is deduced and justified the representation of the qualitative components of the gravity center of a given class.

From a formal point of view, it is remarkable that the recurrence found by qualitative variables is exactly the *same* as the existing for quantitative ones<sup>2</sup> [GIBE93]. Given two classes  $\mathcal{C}_e, \mathcal{C}_d \subset \mathcal{I}$ , ( $\mathcal{C}_e \cap \mathcal{C}_d = \emptyset$ ), the center of gravity of class  $\mathcal{C} = \mathcal{C}_e \cup \mathcal{C}_d$  is  $\bar{x}_{\mathcal{C}} = (\bar{x}_{\mathcal{C}1}, \dots, \bar{x}_{\mathcal{C}K})$ , where

$$\bar{x}_{\mathcal{C}k} = \begin{cases} \bar{x}_{\mathcal{C}_ek} & , \bar{x}_{\mathcal{C}_ek} = \bar{x}_{\mathcal{C}_dk} \\ \frac{n_{\mathcal{C}_e}\bar{x}_{\mathcal{C}_ek} + n_{\mathcal{C}_d}\bar{x}_{\mathcal{C}_dk}}{n_{\mathcal{C}_e} + n_{\mathcal{C}_d}} & , \text{otherwise} \end{cases}$$

<sup>1</sup>Two objects  $i$  and  $i' \in \mathcal{I}$  are RN iff  $i$  is the nearest neighbour of  $i'$  and viceversa.

<sup>2</sup>Provided that the qualitative components of the gravity center of a class  $\mathcal{C} \subset \mathcal{I}$  are  $((f_{\mathcal{C}}^{k_1} c_1^k) \dots (f_{\mathcal{C}}^{k_{n_k}} c_{n_k}^k))$ , with  $f_{\mathcal{C}}^{k_j} = \frac{I_{\mathcal{C}}^{k_j}}{\sum_{j=1}^{n_k} I_{\mathcal{C}}^{k_j}} = \frac{I_{\mathcal{C}}^{k_j}}{n_{\mathcal{C}}}$ , ( $I_{\mathcal{C}}^{k_j}$  = number of individuals of modality  $c_j^k \in \mathcal{D}_k$  in subclass  $\mathcal{C}$ .  $\mathcal{D}_k = \{c_1^k \dots c_{n_k}^k\}$  is the set of values that a qualitative variable  $X_k$  can take.

# Sistemes basats en coneixements

This is a nice property, that allows homogeneous treatment of qualitative and quantitative variables.

**The mixed metrics** On the other hand, the reciprocal neighbours algorithm needs a distance defined on the objects, so as to identify reciprocal neighbours pairs.

Although the metrics is one of the parameters of **KLASS** and other possibilities can be used, in [GIBE93] is defined a family of measures that allows evaluation of distances between objects partially described by quantitative variables, and partially described by qualitative ones.

$$d_{(\alpha,\beta)}^2(i,i') = \alpha \sum_{\forall k \in C} \frac{(x_{ik} - x_{i'k})^2}{s_k^2} + \beta \frac{1}{n_Q^2} \sum_{\forall k \in Q} d_k^2(i,i') \quad (1)$$

Under certain condition [GIBE93], not very restrictive, the proposed measure (called *mixed distance*) is indeed a metrics<sup>3</sup>.

In fact, mixed metrics is a weighing between a canonical normalized euclidean distance for quantitative components and an evolution of  $\chi^2$ -distance for qualitative ones, in such a way that the complete incidence table is no more explicitly built [GIBE93].

Using some heuristic criteria, a proposal on the values of the weighing constants  $\alpha$  and  $\beta$  is developed (see [GIBE93])<sup>4</sup>:

$$\alpha = \frac{n_C}{d_{C_{max}}^2} \quad \& \quad \beta = \frac{n_Q}{d_{Q_{max}}^2} \quad (2)$$

The values of  $(\alpha, \beta)$  induce an equivalence relationship over the mixed metrics family. It is then possible to work just with the quotient set, taking as the representative of each equivalence class  $d_{\alpha_0, \beta_0}^2$ . Several applications showed satisfactory results using this values (see §3).

## 2.2 The rules-induced partition

**Knowledge representation:** The expert is asked to provide any additional information he has on the domain, even if it looks trivial (complete knowledge is not necessary anymore).

Logic rules were chosen for knowledge representation because high flexibility is needed in this context. The rules structure is as much open as possible to give maximum expressive facilities to the expert:  $B \longrightarrow C$

$C$  is a class identifier and  $B$  must be a boolean expression. It can take many different forms. It is only required to use prefixed notation and to put the names of the variables involved in the rules between parenthesis<sup>5</sup>. This is extremely powerful and, in particular, it allows inclusion of transformed variables in the rules<sup>6</sup>.

**Building the rules-induced partition :** In fact, there is a labelling process.

For each object  $i \in I$ , evaluate all the rules: if  $i$  satisfies rules with equal right hand side  $C$ , mark  $i$  with label  $C$ ; if  $i$  satisfies rules with different right hand side, mark it as *conflictive*

<sup>3</sup>This makes possible the clustering using Ward's aggregation criteria, and all the clustering methods for metric spaces.

<sup>4</sup>Or  $\alpha_0 = \frac{\alpha}{\alpha+\beta}$  &  $\beta_0 = \frac{\beta}{\alpha+\beta}$  for working on the interval  $[0,1]$ .

<sup>5</sup>Technical reasons justify this constraint: Using this syntax and LISP reading macros it is possible to avoid the syntactic analyzer, an the set of operators that may be used in the rules becomes *open!!!*, provided any non-primitive operator is properly defined to LISP environment.

<sup>6</sup>In §3 could be appreciated the interest of this possibility.

# Sistemes basats en coneixements

Iteration	Quality	Rules	Conclusion
0	0.52	$\emptyset$	Semantic information is needed
1	0.57	on velocity coordinates	Rules about the disc are needed
2	0.59	on HR diagram	Only the principal sequence <sup>9</sup> is same
3	0.60	on metallicities and velocity components relationship	Not precise enough rules
4	0.64	on the module of heliocentric velocity (2 classes)	
	0.88	<i>idem</i> (6 classes)	6 classes recommended

Table 1: Classification of stellar populations.

object; if  $i$  satisfies no rules, mark it as *Residual class (RC)*. Then, the partition induced by the rules over  $\mathcal{I}$  is

$$\mathcal{P} = \{\{i \in \mathcal{I} : \text{labelled as } RC\} \cup \{\mathcal{C} = \{i \in \mathcal{I} : i \text{ labelled as } \mathcal{C}\} \mid \forall \mathcal{C} \text{ rhs of any rule}\}\}$$

### 3 Application to the stellar classification in Astronomy

It is well known that the stellar content of the Galaxy can be considered, from the astrophysical point of view, as the superposition of several *populations*. Such distinction corresponds to the different origin of the stars, with different ages, chemical composition, and spatial and kinematical distributions in the Milky-Way. These physical magnitudes cannot be directly measured, but are statistically related with quantitative and qualitative observational properties such as *spectral type*, *luminosity class*, *proper motions*, ...

In this paper, the application of the *classification based on rules* methodology to the classification of stars is presented. Data is provided by a team of Applied Mathematics and Telematics Department from UPC and it has been generated with a simulator<sup>7</sup> based on the HR diagram<sup>8</sup>. Using simulated data allows a perfect evaluation of the performance of **KLASS**, since the real class of the objects is known and missclassification can be quantified. In fact, the percentage of well-classified objects will be used as a quality coefficient.

Using **KLASS** it is possible to take advantage of the expert knowledge about the stars; also, to consider qualitative variables — as the spectral type or the luminosity class — in the stars description, which used to be ignored by other clustering methods, although they contain a lot of relevant information.

Application of the proposed methodology produced a 5 iteration process. An abstract of the results is presented in table 1. In this case, experts are not able to give us rules on the observed variables, but on more *natural* characteristics that cannot be directly measured. Using the rules structure presented before, it is possible to use transformed variables in the rules, provided the relationship between the *derived* variable and the observed ones is properly defined to the system.

Dendrogramme of last iteration is showed in figure 1. Disc stars are marked with a spot. Classes induced by the rules are  $\tau_{Halo}^4$  and  $\tau_{Disc}^4$  and it can be seen how they are inserted into a global hierarchical tree which suggests 6 classes.

<sup>7</sup>It is the first part of a larger research. At present, real data coming from the Hipparcos Input Catalogue [TURO92] is being analyzed. Hipparcos Input Catalogue contains the main observational data available nowadays from earth-based astronomical observatories.

<sup>8</sup>The (HR) Hertzsprung-Russell diagram provides the relationship between the spectral type and the real magnitude of stars.

<sup>9</sup>An area of the galaxy where disc and halo stars can be confused in the diagram HR.

# Sistemes basats en coneixements

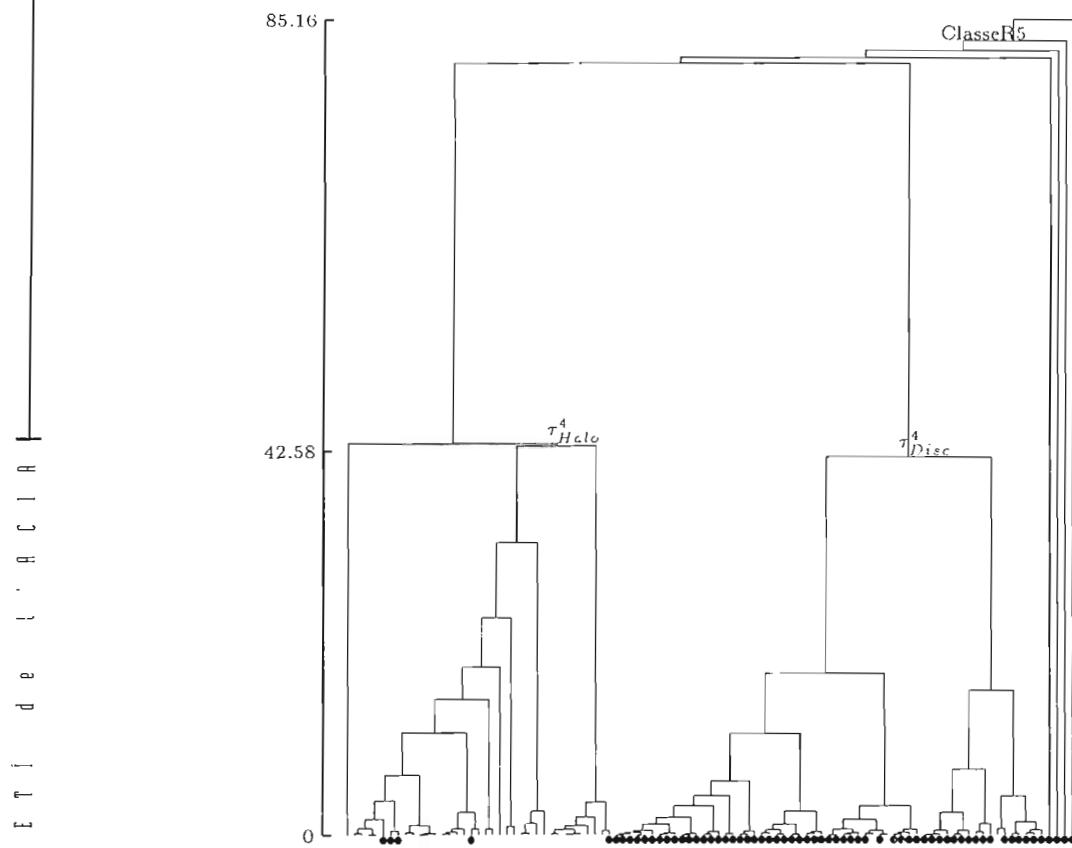


Figure 1: Dendrogramme of fourth iteration.

It is interesting to remark that the proposed methodology helped the experts to make explicit some rules that, although they already knew them, they were not able to formalize initially.

## References

- [GIBE93] Gibert, K. L'ús de la informació simbòlica en l'automatització del tractament estadístic de dominis poc estructurats (Dep. EIO, UPC, 1994) Ph. D. thesis.
- [GIBE94] Gibert, K., Cortés, U. Combining a knowledge based system with a clustering method for an inductive construction of models in: P. Cheeseman *et al.* (Eds.), *Selecting Models from Data: AI and Statistics IV*, LNS nº 89 (Springer-Verlag, New York, 1994) 351 – 360.
- [HERN94] Hernández-Pajares, M., Floris, J., 1994: *Classification of the Hipparcos input catalogue using the Kohonen network*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 268, 444-450.
- [MURT95] Murtagh, F., Hernández-Pajares, M., 1995: *The Kohonen Self-Organizing Map Method: An Assessment*, Journal of Classification, in press.
- [TUR092] Turon C. and the INCA Consortium, 1992: *The Hipparcos input catalogue*, Bulletin d'Information du Centre de Données Astronomiques de Strasbourg, 41, 9-20.

# Sistemes basats en coneixements

## Milord II: Resum de recerca i perspectives futures.

Josep Puyol i Gruart

III A - Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial  
CSIC - Consell Superior d'Investigacions Científiques

Campus Universitat Autònoma de Barcelona

08193 Cerdanyola, Barcelona

e-mail: puyol@iiia.csic.es

### Resum

En aquest article es donarà una visió molt general de l'entorn de desenvolupament de sistemes experts Milord II, així com de les extensions que es pensen dur a terme en el futur. S'introduirà la modularitat, el tractament del raonament aproximat, el mecanisme de deducció basat en especialització y el control de Milord II.

### 1 Introducció

Milord és el nom genèric d'un entorn per al desenvolupament de sistemes experts que a implicat durant molts anys als membres del IIIA, tan en el seu desenvolupament teòric com d'enginyeria. Milord II és el nom que es dóna a l'extensió de la versió anterior de Milord [6]. Aquí es donarà una visió general sense prosumitzar dels aspectes més importants de Milord II. La descripció completa es pot trobar a [5].

### 2 La modularitat

La construcció de sistemes expert modulars va començar amb els treballs fets sobre Milord [1, 7]. L'ideia principal era adaptar-hi les tècniques de modularització del llenguatge ML [3]. Més tard es van incorporar i extender aquests primers estudis a Milord II.

La unitat de programació del llenguatge Milord II és el mòdul. Un programa de Milord II és una estructura jeràrquica de mòduls. Aquesta jerarquia representa la descomposició d'un problema en subproblemes. Cada mòdul representa a un especialista en un domini concret,

normalment en un subdomini del problema global. Per tant els mòduls de Milord II tenen tots els components associats a un sistema expert complet (fets, regles, metaregles, etc).

La declaració d'un mòdul consta de les declaracions de la seva intereficie, del coneixement deductiu i del coneixement de control (veure la Figura 1).

```
Module Gram =  
Begin  
Module D= Respiratory_Diagnosis  
Module T= Type_of_Infection  
...  
Export Pneumococcus, Haemophilus, ...  
Import DCGP, CBGN, ...  
Deductive knowledge  
Dictionary: (no definit)  
Rules:  
R001 If DCGP then conclude  
Pneumococcus is possible  
R002 If DCGP and D/Bact_Pneumonia  
then conclude  
Pneumococcus is very_possible  
...  
R004 If CBGN and P/Penicilin then  
conclude Haemophilus is sure  
Inference system:  
Truth values= (impossible,  
few_possible, sligh_possible, possible,  
quite_possible, very_possible, sure)  
...  
end deductive  
Control knowledge  
...  
end
```

Figura 1: Exemple de mòdul.

# Sistemes basats en coneixements

L'interfície d'un mòdul es compon de la llista de fets que pot contestar el mòdul (export); la llista de fets que pot demanar a l'exterior (en general, l'usuari) del sistema expert (import); i finalment la declaració dels submòduls d'aquest mòdul.

Els mòduls poden importar els fets exportats per els seus submòduls (per exemple, la notació  $P/\text{Penicilin}$  significa que el mòdul *Gram* obtindrà del seu submòdul *P* el fet *Penicilin*).

El coneixement deductiu està format per la declaració dels fets del mòdul, les regles i la lògica local a aquest mòdul.

Els conceptes o fets que es podem manegar dintre de Milord II poden ser de diferents tipus: booleans, lògics, numèrics o enumerats. Tornarem sobre aquest punt en el següent apartat.

Les regles de Milord II estan formades per una conjunció de condicions i una sola conclusió. Les regles estan qualificades amb un valor de certesa. Aquí es pot veure un exemple de regla:

*R001 If quinol and tractament\_oral then conclude oflox is possible.*

El coneixement de control conté la declaració de alguns paràmetres de control i metaregles de primer ordre. Aquestes metaregles poden deduir fets, eliminar regles, eliminar mòduls i àdhuc crear mòduls dinàmicament.

També hi ha la possibilitat de declarar mòduls genèrics. Per exemple, la anàlisi de *Gram* és una tasca independent del tipus de mostra considerada. Així és millor programar aquesta anàlisi com una tasca genèrica en contes de fer-ho com un conjunt de tasques específiques per a cada tipus de mostra. L'instanciació d'un mòdul genèric amb un conjunt de mòduls fa que el mòdul resultant tingui com a submòduls aquests mòduls. També hi ha definides una sèrie d'operacions entre mòduls, com el refinament, expansió i contracció de mòduls que queden fora de l'abast d'aquest article.

En aquest punt es pot dir d'una manera molt resumida quina serà la semàntica operacional d'un programa de Milord II. L'usuari preguntarà el valor d'un fet exportat per un mòdul. Aquest mòdul intentarà deduir el fet mitjançant el seu coneixement deductiu, que provocarà preguntes a l'usuari (import) i als seus submòduls (s'enengearan processos iguals al que s'està descriuint). Les respostes a aquestes preguntes especialitzaran les regles del mòdul. Es faran més preguntes fins que s'arribi a deduir

el fet preguntat. El coneixement de control determinarà quin és el tipus de deducció utilitzat a cada mòdul. Les metaregles es dispararan en qualsevol moment en que es compleixin les condicions i faran les accions pertinentes.

## 3 Raonament aproximat

El tractament del raonament aproximat està basat en l'extensió d'una lògica multivaluada a intervals de valors de certesa [2] com una manera de tractar la incertesa i la imprecisió.

Com es deia abans, cada mòdul pot declarar la seva pròpia lògica local. Aquesta declaració consta de la declaració del conjunt ordenat de valors de veritat  $A_n$  de la lògica i de una T-norma concreta, T. A l'exemple de la Figura 1,  $A_n$  és el conjunt d'etiquetes lingüístiques declarades a *Truth values*. El primer element de  $A_n$  és el valor de veritat *fals* (0) i l'últim és el *cert* (1).

El sistema deductiu de Milord II treballa amb el conjunt dels intervals de  $A_n$ ,  $\text{Int}(A_n)$ , i amb les operacions exteses a intervals de valors de veritat: negació  $N_n^*$ , conjunció  $T^*$  i modus ponens  $MP_T^*$ . Per tant podem parlar que un fet de Milord II, per exemple, *pneumonia*, pren el valor [*possible*, *molt\_possible*]. Aquest tipus de fets són els anomenats de tipus *lògic*. L'interval [0,1] representa el desconegut.

La interpretació d'aquest interval és que en el curs de la deducció s'ha trobat una certa evidència positiva pel fet que *pneumonia* sigui cert (*possible*), però també una evidència negativa que fa que el valor màxim del interval estigui per sota de *segur* (*molt\_possible*). En altres casos també es pot interpretar com el valor de pertinença a un conjunt difús, per exemple si diem que el fet *alt* pren el valor [*possible*, *molt\_possible*], això es pot interpretar com el resultat d'una mesura imprecisa de l'alçada (entre 1,65 i 1,75 m.).<sup>1</sup>

A l'apartat anterior s'ha dit que Milord II pot utilitzar altres tipus de fets. Els fets booleans són un cas particular dels lògics que només poden tenir els valors cert o fals (en aquest cas els intervals [0,0] o [1,1]). Els enumerats són conjunt difusos a on cada element té associat un interval que correspon al grau de pertinença al conjunt. Per exemple, a Milord II podem decla-

<sup>1</sup> Milord II permet això associant una funció a la declaració d'un fet que permetrà la seva evaluació a partir d'altres fets. Per exemple el fet *alt* a partit del fet numèric *alçada*.

# Sistemes basats en coneixements

rar els fets  $tractament_1$  i  $tractament_2$  de tipus enumerat  $\{a, b, c\}$ , a on  $a, b$  i  $c$  són antibòtics. Els valor que podran tenir aquests fets seràn del tipus  $a = [\text{possible}, \text{segur}]$ ,  $b = [\text{segur}, \text{segur}]$ , etc. Després podrem parlar, per exemple, del grau d'inclusió de dos tractaments:

R002 If  $tractament_1 \subset tractament_2$  then conclude ...

## 4 L'especialització

En sistemes basats en regles, la deducció està basada en la regla de modus ponens

$$A, A \rightarrow B \vdash B$$

El modus ponens només és aplicable quan totes les condicions de les premisses de la regla tenen valor, altrament no es pot inferir res. Es proposa l'ús de l'avaluació parcial per a poder extreure la màxima informació, àdhuc en el cas de coneixement incomplet del valor de veritat de les premisses d'una regla.

L'avaluació parcial (o deducció parcial) de regles està basada en l'equivalència lògica  $(A \wedge B) \rightarrow C \equiv A \rightarrow (B \rightarrow C)$ . Això ens dóna la següent regla d'inferència boleana:

$$A, A \wedge B \rightarrow C \vdash B \rightarrow C$$

Es diu que la regla resultant  $B \rightarrow C$  és l'*especialització* de la regla anterior  $A \wedge B \rightarrow C$  respecte a  $A$ .

Pel cas boleà aquesta regla d'especialització no té massa interès, però si que en té per a les regles de Milord II amb incertesa. Donat un fet  $A$  amb un valor de certesa  $\alpha$ , i una regla amb valor de certesa  $\rho$ , aleshores:

$$(A, \alpha), (A \wedge B \rightarrow C, \rho) \vdash (B \rightarrow C, \rho')$$

A on  $\rho' = MP_T^*(\alpha, \rho)$  és el nou valor de certesa de la regla especialitzada.

Per tant, l'especialització d'una base de regles consisteix en la substitució de les regles per la seva especialització respecte als fets coneguts [4]. Recursivament, els fets deduïts per les regles totalment especialitzades (disparades) especialitzaran altra vegada la base. El procés acabarà quan no hi hagui més fets per especialitzar.

Quins són els avantatges d'aquest tipus de deducció respecte al clàssics? El primer que es pot veure és que permet construir *responses condicionades* en el cas de no tenir suficient informació per a poder disparar una regla. Imaginem la regla  $(A \wedge B \rightarrow C, \rho)$ . En el cas de

tenir un valor per a  $A$ ,  $\alpha$ , però desconeixer  $B$ , un sistema clàssic contestaria que desconeix el valor de  $C$ . Mitjançant l'especialització Milord II contestaria amb la resposta condicionada  $(B \rightarrow C, \rho')$ . Això es pot interpretar com que el sistema respón donant el coneixement necessari per a obtenir  $C$  donat que sabem  $A$  i desconeixem el valor de  $B$ .

Aquest tipus de resposta es pot extender a tota una base de regles. Donada una base i els valors d'un conjunt de fets, podem obtenir una nova base de regles especialitzada per un contexte determinat.

Això també ens permet pensar en un tipus de *validació* basat en especialització. No és necessari donar un cas complet a la base per a comparar amb el seu resultat, sinó que podem especialitzar la base per un determinat contexte i observar la nova base. L'expert tindria que estar d'acord amb aquesta nova base restringida. En altres paraules, la base resultant tindria que ser la base que tindria que haber programat l'expert en el cas de voler programar una base per aquest domini restringit. Per exemple, donada una base per al diagnostic d'una enfermetat, si especialitzem aquesta base per el cas de homes, la base resultant tindria que ser la mateixa que hauria programat l'expert si hagues volgut una base per al diagnostic d'aquesta enfermetat però només per a homes.

En quan al mecanisme de deducció (el motor d'inferència) l'especialització també representa avantatges molt importants.

En els motors d'inferència clàssics els processos de cerca i de deducció estan interrelacionats. Per exemple, un motor d'inferència enrera en profunditat, sempre farà el mateix tipus de recorregut de l'arbre deductiu. Aquest tipus de motor no serveix si volem aplicar altres criteris per a determinar l'ordre de les preguntes.

L'especialització permet la separació de la cerca i la deducció com a procediments separats. Això vol dir que el procés de deducció (especialització) dóna una nova base de regles quan coneix el valor d'un nou fet; mentre que el procés de cerca pot utilitzar qualsevol estratègia per a buscar nova informació, que permeti arribar a la solució, mitjançant l'anàlisi de la base de regles actual. Aquest mètode desincronitza l'obtenció d'informació de la deducció.

# Sistemes basats en coneixements

## 5 El control

El control també es beneficia del mecanisme de especialització. Quan el mateix fet es pot deduir per diferents camins (varies regles que el concluen), les regles s'ordenen per el seu valor de certesa. La més certes primer. L'especialització permet reordenar les regles respecte als nous valors de certesa de les regles especialitzades. Això es tradueix en economia de interacció amb l'exterior, i.e. preguntes a l'usuari.

El metacontrol està basat en un mecanisme de reificació y reflexió. El nivell objecte reifica dinàmicament tot els fets deduits. El metacontrol intenta disparar metaregles. En cas que hi hagui metaregles disparades els seus resultats es reflexen al nivell objecte i es fan les accions pertinentes. Per exemple la metaregla

M001 If  $K(A/\$x,\$y)$  then conclude  $K(\$x,\$y)$

té el següent significat: **K** és el metapredicat *coneixer* i el **\$** a devant d'un símbol significa que és una variable; quan es reifica un fet qualsevol  $\$x$  del submodul *A* amb un valor qualsevol  $\$y$  es dona el mateix valor  $\$y$  al fet  $\$x$  (en aquest cas en el mòdul que té la metaregla). Per exemple, si es reifica  $K(A/\text{febre},[\text{segur},\text{segur}])$  es reflexa  $K(\text{febre},[\text{segur},\text{segur}])$ .

## 6 El futur

La nostra idea per el futur de Milord II és passar del paradigma modular al d'agents. Això és una evolució natural del sistema modular ja que els mòduls són sistemes experts complets especialitzats en un domini, i per tant susceptibles de coordinar-se amb altres sistemes o agents. Un agent a Milord II serà un mòdul autònom (un procès) capaç d'interaccionar asíncronament amb l'exterior (altres agents).

El primer pas és la distribució del sistema modular. Això vol dir implementar els mòduls com a processos autònoms i utilitzar la xarxa (Internet) com a via de comunicació. El mecanisme d'especialització serà útil ja que permet tenir un mecanisme de cerca (en aquest cas encarregat de les comunicacions) independent del de deducció. La especialització pot deduir malgrat les comunicacions pendents.

El següent pas es trencar la jerarquia modular i permetre la comunicació bidireccional entre els mòduls, així com afegir protocols de coordinació. Després d'aquest pas ja es podria

parlar d'agents.

A més es pot pensar en la comunicació de coneixement (regles especialitzades) entre agents, oposat a la simple comunicació de dades. Per tant es pot respondre a la pregunta d'un agent amb una base especialitzada, i aquesta incorporar-la a la teoria de l'agent que ha preguntat.

El metacontrol pot servir per a implementar els mecanismes de coordinació, ja sigui cooperació, competició, etc.

Aquesta és una de les línies de treball que es vol portar a terme en els propers anys en la continua expansió i enriquiment de Milord II.

## Referències

- [1] J. Agustí, C. Sierra, and D. Sannella. *Methodologies for Intelligent Systems*, 4, chapter Adding generic modules to flat rule-based languages: A low cost approach, pages 43–51. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1989.
- [2] F. Esteva, P. Garcia-Calves, and L. Godo. Enriched interval bilattices: An approach to deal with uncertainty and imprecision. *Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems (to appear)*, 1994.
- [3] R. Harper, D. McQueen, and R. Milner. Standard ML. Technical Report ECS-LCFS-86-2, Edinburgh University, 1986.
- [4] J. Puyol, L. Godo, and C. Sierra. A specialisation calculus to improve expert system communication. In *Proceedings ECAI'92*, pages 144–148, 1992.
- [5] Josep Puyol-Gruart. *Modularization, Uncertainty, Reflective Control and Deduction by Specialization in MILORD II, a Language for Knowledge-Based Systems*. PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 1994.
- [6] C. Sierra. *MILORD: Arquitectura multinivell per a sistemes experts en classificació*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1989.
- [7] C. Sierra and J. Agustí. Collapses: Towards a methodology and a language for knowledge engineering. In *Proceedings AVIGNON'91*, pages 407–423, 1991.

# Sistemes basats en coneixements

## Una arquitectura de sistemes experts per a la identificació en Biologia: Desenvolupament i aplicació.

Marta Domingo i Gou

III A, Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial CSIC,  
Campus Universitat Autònoma de Barcelona,  
08193 Bellaterra, Catalonia, Spain.  
Fax: +34 3 5809661 e-mail: marta

### Resum

La identificació dels organismes presents en una mostra és el punt de partida obligat de la recerca en moltes branques de la Biologia. Per exemple, en el camp de l'Ecologia necessitem la identificació en els estudis sobre la diversitat biològica, estudis d'impacte ambiental, etc. I també en la recerca aplicada es necessita de la identificació com ara en biotecnologia, en la recerca de productes naturals amb activitat biològica per a finalitats farmacològiques, industrials, o comercials. En molts casos, només els experts en Sistemàtica poden donar una identificació acurada, i es veuen obligats a exercir com a taxònoms enllloc de concentrar-se en la seva pròpia recerca. D'aquí sorgeix la necessitat d'eines automàtiques per a la identificació d'espècimens.

Hi ha dominis taxonòmics que no han estat estudiats exhaustivament i als quals manca una teoria taxonòmica ben establerta. En aquests dominis, que podem anomenar *poc estructurats*, les teories més acurades resulten ser els coneixements dels experts mateixos, que reuneixen continguts teòrics i empírics. En aquest cas, les eines tradicionals d'identificació o bé són inexistentes o hi proporcionen una ajuda molt limitada i hi ha una especial necessitat d'eines per a la identificació que facin accessibles els coneixements dels experts.

La recerca d'aquesta tesi (Domingo, 1995) s'adreça a aquesta necessitat i es centra especialment en un d'aquests dominis: Porífera, d'especial interès i complexitat. El filum Porífera és un bon exemple de domini poc estructurat, en el qual els problemes d'aquest tipus de dominis es presenten amb especial intensitat. Concretament, en el cas de les esponges,

- el coneixement de la biologia i l'ecologia en les Porífera es limita a taxons molt concrets.
- se sap que hi ha molta variabilitat, però no està ben establerta.
- la classificació del filum Porífera és molt controvertida i freqüentment es discuteix la classificació inclús els nivells taxonòmics alts, e.g. família, ordre.
- és corrent la descripció de noves espècies o, al contrari, la sinonimització d'espècies descrites.
- existeixen incoherències en la terminologia: per exemple, utilitzar un mateix terme per anomenar una morfologia que es presenta en diversos caràcters convergents, o simplement la poca estandardització de la terminologia pròpia de les esponges.

A tot això s'hi suma el fet que hi ha molt pocs experts en sistemàtica d'esponges, i solen ser especialistes en una part de la taxonomia. No obstant, l'objectiu d'aquesta recerca no ha estat, només, idear una eina específica per ajudar a la identificació d'esponges sinó proporcionar una eina amb un propòsit general que contribueixi a facilitar la construcció de SE en qualsevol domini taxonòmic.

Dintre l'aproximació de *sistema expert* (SE), trobem eines computacionals capaces de tractar tant coneixements descriptius com heurístics. Aquest tipus d'eina, aplicada a la taxonomia, és capaç de guiar el seu

## Sistemes basats en coneixements

usuari en la cerca dels caràcters per a la identificació tot emulant les estratègies d'un expert: raonar acuradament en base a dades imprecises, incertes o incomplites mitjançant mecanismes de raonament complex (e.g. raonament no monòton, per defecte).

Un SE és un programa que utilitza els coneixements teòrics i heurístics d'un expert humà per resoldre de forma automàtica un problema que típicament requeriria ser resolt per un expert. Un SE consta de dos programes independents. El *motor d'inferència* és un programa capaç de realitzar processos d'inferència en base als coneixements sobre un domini particular que constitueixen la *base de coneixements*. Un tercer element del SE és la *interfície*, que és el mitjà de comunicació entre el programa i un usuari, en la qual s'estableix un diàleg entre ells en llenguatge natural.

La construcció d'un SE implica diverses persones: un expert que té els coneixements sobre un domini particular, un programador de la base de coneixements o enginyer dels coneixements que s'encarrega d'adquirir els coneixements d'un expert del domini, implantar-los en un llenguatge d'acord amb el motor d'inferència, refinar-los i validar la base de coneixements, i un programador del motor d'inferències. Aquest procés representa un volum important de treball en un SE que tracti un problema mínimament complex.

En la construcció d'una base de coneixements hem de distingir entre aspectes de disseny i de programació. Quant al disseny, típicament ha estat un aspecte que depèn de la creativitat de l'enginyer dels coneixements. Més recentment, diferents metodologies dintre de la Anàlisi a Nivell dels Coneixements (Knowledge Level o KL) proporcionen algunes idees sobre com estudiar els coneixements que cal adquirir de l'expert, separadament de tota referència a la seva representació computacional. Hi ha tres idees bàsiques en la anàlisi al Nivell dels Coneixements: la *tasca* a complir pel programa, el *model del domini* que és un model dels coneixements propis del domini que estudiem, i el *mètode* (o mètodes) que utilitzant els coneixements del model del domini fa possible l'acompliment de la tasca.

126

En la anàlisi al Nivell dels Coneixements dels dominis taxonòmics es van estudiar la *tasca* que cal realitzar en un SE en taxonomia, el tipus de *model del domini* que reuneix la teoria taxonòmica, i els *mètodes* que poden utilitzar-se.

En l'estudi dels models del domini es va fer evident l'existència de dos tipus de model:

- un *model estructural*, en el qual els fets de què parlem són els caràcters i podem descriure un arbre de dependències entre caràcters en funció dels components i subcomponents de les estructures típiques del domini taxonòmic estudiat. També podem descriure d'altres dependències en funció de relacions causals o d'incompatibilitat entre caràcters. Els caràcters no han de ser, necessàriament, morfològics; podem tenir caràcters referents a l'ecologia, bioquímica, genètica, etc.
- un *model classificatori*, en el qual els fets de què parlem són els tàxons i podem descriure un arbre taxonòmic que representa diferents nivells d'abstracció en la descripció dels organismes des de filum a espècie. Cada node de l'arbre representa un tàxon i cada tàxon pertany a un i només un tàxon superior. La pertinença d'un espècimen a un tàxon s'estableix en base a l'ocurrència d'un conjunt de caràcters més o menys discriminants per aquell tàxon.

Vam definir la tasca a complir en un SE en taxonomia com a *classificació/identificació*. Es la tasca que efectuem quan a partir d'una taxonomia, que acceptem com a correcte, i d'unes dades subministrades per un cas concret, obtenim un valor per la variable *tàxon* com a resultat, és a dir, una identificació. Donat un model classificatori podem entendre la tasca d'identificació com la simple obtenció del nom de l'espècie o bé, com l'obtenció d'un nom de tàxon a cada nivell de la taxonomia, que es faria executant la tasca d'identificació a cada nivell de l'arbre taxonòmic. La tasca que ens interessa modelitzar en un SE és la segona, que és més general i permet optimitzar l'ús de la informació de què disposem sobre un cas.

# Sistemes basats en coneixements

Els mètodes que vam definir per efectuar la tasca d'identificació descrita són:

- *Refinament.* Es tracta d'identificar un o més tàxons i podar les branques que ja no serveixen. Si a un nivell s'identifica més d'un tàxon possible se segueix avall per les dues branques, i així fins a les fulles de l'arbre taxonòmic.
- *Proposar i Revisar.* Es un mètode que parteix d'una hipòtesi a un cert nivell taxonòmic, donada per l'usuari, aleshores es comprova que la hipòtesi sigui consistent amb el tàxons dels nivells superiors i si és així es segueix el mètode de refinament fins al nivell d'espècie.
- *Descriure i diferenciar.* El mètode parteix d'un conjunt de caràcters sobre l'espècimen, proporcionats per l'usuari i s'eliminen els tàxons que serien incompatibles amb aquesta descripció. Posteriorment es questionen altres caràcters discriminants per als tàxons que encara són possibles.

Per als aspectes de programació hem utilitzat *Milord II* (Puyol, 1994), que és un llenguatge de construcció de sistemes experts basats en regles del tipus "si *premissa* aleshores *conclusió* és *valor de certesa*". Les principals característiques de *Milord II*, orientat a la definició incremental de bases de coneixements, són:

- la *modularitat*, que permet estructurar un problema gran i complex (e.g. un filum sencer) i abordar-lo progressivament a base de solucionar cada subproblema dintre d'un mòdul de *Milord II* (e.g. cada tàxon es representa per un mòdul).
- l'ús d'una *lògica multivaluada* com a mecanisme per a la gestió de la incertesa, que permet expressar coneixements incerts o incomplets utilitzant un nombre finit de graus de certesa (entre el màxim *seguri* el mínim *impossible*) i propagar la certesa al llarg del procès d'inferència.
- la capacitat de *meta-raonament*, que mitjançant un mecanisme de reificació/reflexió permet raonar sobre les deduccions del propi sistema i així fer models de raonament complex.

Aquestes característiques són interessants per fer models de l'expertesa en sistemàtica i emular les capacitats dels experts.

127

En aquesta tesi, com a aportació al camp de la Intel.ligència Artificial, hem proposat una interpretació clara i concreta de les idees abstractes del nivell de coneixements utilitzant objectes computacionals del llenguatge *Milord II*. D'aquesta manera, havent definit i codificat les idees del Nivell dels Coneixements de tasca, model del domini i mètode, es contribueix a omplir el buit que queda entre disseny i programació en el camp de la construcció de SE.

Utilitzant aquesta interpretació del Nivell dels Coneixements en *Milord II* i havent estudiat els dominis taxonòmics al Nivell dels Coneixements, vam idear una *arquitectura per a la construcció de sistemes experts en l'àmbit dels dominis taxonòmics*. Aquesta arquitectura és adreçada als experts en sistemàtica (no necessàriament destres en tècniques de programació) que vulguin construir una aplicació de SE en l'àmbit del domini taxonòmic en el qual ells són especialistes. L'arquitectura proporciona una metodologia per a l'adquisició i la representació dels coneixements en taxonomia. Així, l'ús de l'arquitectura com a base per a la construcció d'un nou SE en taxonomia, redueix al mínim l'esforç de disseny de la base de coneixements i estalvia gran part de l'esforç de programació.

Cal entendre l'arquitectura com un "esquelet de base de coneixements taxonòmica" format per tres components principals: la *tasca* que cal realitzar, és a dir, *classificació/identificació*, el *model del domini* que reuneix els coneixements, és a dir una *teoria taxonòmica*, i el *mètode* que, utilitzant aquests coneixements, acompleix la tasca (e.g. *mètode de refinament*, *mètode de proposar i revisar*,...). Aquests components de la base de coneixements han estat codificats en forma de mòduls de *Milord II*.

L'arquitectura mateixa és un *model* del procediment d'identificació en taxonomia. Algunes de les peces de l'arquitectura són enterament reutilitzables, és a dir, poden utilitzar-se en diverses aplicacions de SE independentment del tàxon que hi tractem. D'altres s'han de completar amb coneixements propis del domini taxonòmic estudiat. Concretament, els mòduls que codifiquen els mètodes són reutilitzables en

## Sistemes basats en coneixements

qualsevol aplicació en el context taxonòmic. Ja que són coneixements genèrics són aplicables a qualsevol domini taxonòmic. A la vegada, els diversos mètodes són aplicables per la tasca d'identificació sobre un mateix model de domini, segons l'ús del SE que vol obtenir l'usuari del sistema. El mòdul tasca és també reutilitzable, excepte pel que fa als valors de la variable tàxon en cada domini taxonòmic. Es a dir, únicament cal incorporar-hi una llista dels noms concrets dels tàxons que estudiem. L'arquitectura proporciona també un esquelet del model del domini seguint les estructures esmentades en l'estudi al Nivell dels Coneixements. No obstant, els coneixements de cada tàxon s'han de programar dintre d'aquest esquelet en cada nou SE.

L'esquelet de model del domini taxonòmic consta de dues jerarquies de mòduls de *Milord II* que es corresponen al *model estructural*, que conté els coneixements que fan referència a les característiques dels espècimens, i al *model classificatori*, que conté els coneixements que estableixen la pertinença d'un espècimen desconegut a un tàxon.

D'aquesta manera, per desenvolupar una aplicació que tracti d'un domini taxonòmic en particular hem de completar aquest model amb el coneixement expert sobre aquest tàxon. Això representa un volum considerable de treball en la mesura que el domini sigui complex i extens.

Aquesta arquitectura ha estat utilitzada per desenvolupar *Spongia*, un SE per ajudar a la identificació d'esponges de l'àrea biogeogràfica atlantomediterrània. *Spongia* és capaç d'identificar els ordres i famílies de la classe Demospongiae. Els espècimens de la família Geodiidae (Demospongiae: Astrophorida) s'identifiquen fins al nivell d'espècie. Els espècimens de les classes Hexactinellida i Calcarea són detectats, però el sistema no està programat per continuar la seva identificació a nivells taxonòmics més baixos. El total de tàxons abarcats pel SE és al voltant dels 100 i el seu desenvolupament ha suposat tres anys d'interacció periòdica amb un expert en sistemàtica de Porífera.

En el model classificatori de *Spongia*, cada tàxon ha estat representat en un mòdul dintre del qual es raona en base a un conjunt de regles i meta-regles per tal d'identificar els subtàxons. Per exemple, dintre del mòdul Demospongiae hi ha regles i meta-regles que expresen els coneixements necessaris per identificar cada un dels ordres de les Porífera, e.g. Astrophorida, Axinellida, Hadromerida, Poecilosclerida, Dendroceratida, etc. D'altra banda, en el model estructural cada mòdul conté un conjunt de caràcters. Tenim els mòduls Extern, Anatomia, Ecologia i Esquelet; i dintre del mòdul Esquelet hi ha els mòduls Espícula, Fibra, Feixos, etc. Dintre de cada mòdul, s'especifiquen relacions entre els caràcters del tipus dependència, incompatibilitat, etc. Aquesta estructura compartimentada dels coneixements en diferents mòduls ens permet un desenvolupament incremental del sistema i contribueix al manteniment de la consistència en les bases de regles.

Les regles i meta-regles permeten expressar coneixements incomplets i incertesa de manera que es pot fer un model dels coneixements taxonòmics en relació a les esponges tot i que molts dels coneixements són heurístiques d'un expert humà. Es a dir, són coneixements adquirits per l'experiència, que no han estat establerts formalment. Ja que en el domini de les Porífera molta part dels coneixements són d'aquest tipus, aquest estil de representació de coneixements proporciona un mecanisme potent i natural per expressar els coneixements que té un expert del domini.

Les regles i meta-regles segueixen la sintaxi de *Milord II*. Els diferents operadors que proporciona aquest llenguatge i.e. conjunció, disjunció, identitat, negació i desigualtat, permeten l'expressió rica dels coneixements taxonòmics. Per exemple, l'expressió de les combinacions de caràcters amb certs valors o intervals de valors que determinen la possible pertinença a un tàxon. A més, la combinació de regles i meta-regles permet emular models de raonament complex similars als que fa l'expert humà, e.g. assumptius o raonament no monòton.

Un llistat dels noms dels tàxons que *Spongia* pot identificar és incorporat al mòdul Tasca Classificació proporcionat per l'arquitectura. El mètode que vàrem escollir per efectuar la identificació en *Spongia* és

## Sistemes basats en coneixements

el Mètode Refinament amb una restricció que anomenem de *preservació de consistència*. Es a dir, el procés d'identificació és un recorregut descendent per l'arbre taxonòmic, donant un (o més) valor a la variable tàxon a cada nivell taxonòmic, però restringint la resposta a un sol valor per nivell taxonòmic si aquest valor té el valor màxim de certesa (*segur*).

Aquest mètode és un dels que proporciona l'arquitectura. Cada mètode és implantat en un mòdul de manera que pel mateix model del domini podríem utilitzar un altre mètode només intercanviant el mòdul mètode.

El desenvolupament de *Spongia* demostra la utilitat de l'arquitectura per a la construcció de SE en l'àmbit de la taxonomia i contribueix a la solució de la necessitat d'eines d'identificació acurada en el domini de les Porífera. Com a contribució original, *Spongia* dedueix un valor de tàxon a *cada* nivell taxonòmic, mentre que els SE en taxonomia (que són molt escasos), identifiquen només el nivell d'espècie. Aquest tret de *Spongia* és molt important ja que permet un aprofitament més eficient de les dades sobre un espècimen. Es a dir, tot i que disposem de dades incompltes o incertes (cosa corrent a la pràctica) *Spongia* pot donar una identificació acurada a nivells taxonòmics més alts que espècie.

Un segon aspecte original de *Spongia* és que abarca un filum sencer, de manera que un usuari pot utilitzar-lo només sabent que l'espècimen que vol estudiar és una esponja. En canvi, els SE en taxonomia que es troben a la bibliografia tracten un tàxon de nivell més baix e.g. gènere o família, de manera que només aquells usuaris capaços d'identificar els membres d'aquell gènere o família poden estar interessats en el sistema. Aquest tret fa de *Spongia* un veritable SE en el sentit que s'adressa realment als no experts.

Per comprobar la correctesa de les identificacions donades per *Spongia* vam endegar un projecte de validació. Intuitivament és clar que la validació es podria fer comparant la identificació donada per *Spongia* a diversos espècimens amb les identificacions correctes per aquests. A la pràctica ens trobem que, ja que el problema que resol el SE és complex, no és clar quina és la solució correcta per cada cas. Es a dir, per identificar un espècimen concret no disposem d'una prova inequívoca que ens doni la solució, sinó que ens cal consultar l'opinió d'un expert. Per evitar el biaix que suposaria l'opinió d'un sol expert vam proposar-nos comparar les identificacions de diversos experts independents amb les de *Spongia* per tal d'avaluar el comportament del SE.

La validació de *Spongia* s'ha dut a terme utilitzant 82 descripcions d'esponges obtingudes de fonts bibliogràfiques ja que era del tot impracticable utilitzar mostres fresques per a l'estudi de validació. Entre les descripcions n'hi havia de completes i incomplites (manca de dades a la descripció), i cobrien tots els ordres de la classe Demospongiae, les famílies de l'ordre Astrophorida, i la família Geodiidae (Demospongiae: Astrophorida) fins el nivell d'espècie.

*Spongia* va ser consultat per identificar cada descripció i les dades que demanava se li subministraren sempre que fóssin disponibles a la descripció bibliogràfica. En cas contrari es va respondre *desconegut*. Amb la mateixa informació que se li va donar al SE vam obtenir un informe de cada cas. El conjunt de casos va ser facilitat a cinc experts en sistemàtica d'esponges, reconeguts internacionalment, que van emetre una identificació per cada cas.

Tant els experts com *Spongia* van donar una identificació per cada un dels 82 casos. Una identificació consistia en la qualificació de cada possible tàxon amb un dels 8 valors de certesa o amb un interval de valors. Així, cada identificació de cada expert corresponia a un vector de valors de certesa i amb tots els valors vam obtenir una matriu de dimensions 6 experts, 45 tàxons i 82 casos.

A partir d'aquesta matriu es van estudiar 3 distàncies i un índex de similaritat:

## Sistemes basats en coneixements

- distància Euclídea, que resalta l'existeixència de diferències grans entre dos experts malgrat sigui en pocs components.
- distància City-Block, que resalta l'existència de diferències petites entre dos experts en un nombre elevat de components.
- distància Mahalanobis, que té en compte les correlacions entre variables, és a dir, entre els tàxons possibles, gràcies a la introducció de la inversa de la matriu variància-covariància.
- índex Kappa, que corregeix l'efecte de la concordança per atzar en el valor donat a una variable per dos experts.

Les identificacions taxonòmiques proporcionades per *Spongia* han estat comparades amb les identificacions estableties per aquests cinc experts en sistemàtica d'esponges mitjançant una anàlisi de grups (*cluster analysis*). Es va obtenir una classificació per cada una de les anteriors mesures mitjançant un clustering jeràrquic i utilitzant el criteri de l'*average linkage*. A més, es va demanar als experts que puntuessin anònimament l'expertesa dels participants en la validació (inclosos ells mateixos). La mitjana de les puntuacions va donar una ordenació que ens va ajudar a interpretar la posició del SE entre els experts humans en el clustering.

Els resultats han mostrat que les identificacions donades per *Spongia* tenen una qualitat similar a les proporcionades pels experts millor considerats en les puntuacions donades per ells mateixos.

### Referències

- DOMINGO, M., 1995. *An expert system architecture for taxonomic domains. An application in Porifera: the development of SPONGIA*. PhD Thesis, Universitat de Barcelona, January 1995.  
PUYOL, J. 1994. *Modularization, Uncertainty, Reflective Control and Deduction by Specialization in MILORD II, a Language for Knowledge-Based Systems*. PhD Thesis, Universitat Autònoma Barcelona, Abril 1994.

# Sistemes basats en coneixements

## Representación y generación de planes con incertidumbre

Enrique Paniagua Arís

Dep. Projectes d'Enginyeria de la UPC  
e-mail: paniagua@pe.upc.es

### **Introducción.**

El objeto de estudio de la tesis es el desarrollo de un sistema orientado a objeto para representar y generar planes en contextos de incertidumbre. Se trata de diseñar e implementar un sistema que sea independiente del dominio de aplicación, en el que el planificador pueda definir y desarrollar sus planes, disponiendo de los elementos que definen un plan y de los métodos de control y búsqueda.

Los antecedentes principales de dicho sistema los podemos encontrar en los métodos de representación del razonamiento impreciso y cualitativo en el manejo del tiempo y las acciones, las estrategias de búsqueda basadas en entropía, y los sistemas de simulación orientados a objeto que disponen de mecanismo de autocontrol basados en la metaprogramación.

La motivación principal de la tesis es conseguir implementar un sistema que genere planes en contextos de incertidumbre, consiguiendo predecir desviaciones para así intervenir con planes alternativos, en vez de realizar la típica táctica de la "navaja de O'ckam", basada en multar, mutilar o indemnizar a los distintos agentes del plan, cuando en la realidad el error ya ha sucedido. Un segundo motivo es el implementar dicho sistema con costes relativamente pequeños, basándonos en una red de ordenadores personales trabajando en cooperación (acoplada devilmente, según los pro-palalelos), en contra de la estrategia de "ir sobrados de recursos", con máquinas potentísimas de paralelización y/o vectorización.

### **Objetivos principales.**

Los objetivos principales de la tesis son:

- El primer punto de estudio es el de la **representación**, este punto está basado principalmente en los trabajos de Haddaway "Representing plans under uncertainty" y la normativa del ARPA referente a los metaobjetos aplicados en planes. Elementos de un plan.
  - Agente, Grupo, Acción, Objetivo, Evento, etc...
  - Representación de la dinámica en el tiempo.
  - Tiempo/relaciones con acciones, restricciones temporales, teoría de los mundos posibles.
  - Representación de la incertidumbre.
  - Intento, Probabilidad, Posibilidad, Lógica difusa y entropía.
  - Representación jerárquica.
  - Gramática independiente del dominio.
- El segundo punto es el de los métodos matemáticos para la **evaluación** de la certeza, riesgo e incertidumbre en nuestro contexto de aplicación.

# Sistemes basats en coneixements

Lógica causal (para la descomposición determinista de acciones).  
Medición del riesgo mediante las Probabilidades.  
Medición de la incertidumbre mediante las Posibilidades.  
Métodos mixtos (utilización de la lógica difusa y la entropía no probabilística).

- El tercer punto es el de las diferentes **estrategias** de heurística y generación del plan.
  - Estrategias blandas, medias y audaces, que manipulen el riesgo y la incertidumbre.
  - La idea en este punto es que el sistema pueda cambiar de estrategia cuando se imponga ciertas restricciones (basado en el SOAR).
  - Estrategias basadas en la evolución de la entropía entropía.
- El cuarto punto es el de las posibles metodologías de **implementación** del sistema de IA.
  - Implementación en la representación.
    - Sistemas Orientados a Objeto.
    - Implementación del control.
    - Control en los objetos.
    - Paralelización de los procesos y evaluaciones.
    - Interface con el usuario.

## *Resultados obtenidos hasta el presente.*

Hasta el presente, el estudio se ha dividido en los puntos mencionados en el apartado anterior, entre ellos, los puntos más estudiados han sido:

132

- La evaluación de la incertidumbre y el riesgo.
- El sistema de generación del plan.
- La implementación de la paralelización de las evaluaciones.

El punto de la representación de los distintos elementos del plan están basados en los antecedentes de Haddaway y la normativa del ARPA.

Los resultados obtenidos hasta ahora, aunque provisionales, son:

- Cuando disponemos de conocimiento preciso utilizamos métodos deterministas mediante la inferencia lógica, este es el caso de buscar el orden de los operadores (acciones) para generar el camino del plan. Cuando existe riesgo añadimos el cálculo de probabilidades.
- Evaluación de la incertidumbre: Basándonos en la teoría de los subconjuntos borrosos y la lógica trivalente de Lukasiewicz, definimos una “lógica de credibilidad”, que utiliza el mismo rango que el MYCIN. En esta lógica (llamada *LC*), utilizamos como operador de negación el opuesto, y no la complementación respecto a 1, dicha lógica no niega los principios del tercio excluido y de la no contradicción, pero si plasma el nivel de incertidumbre en las fronteras de las diferentes proposiciones, es algo parecido a un nivel subjetivo de percepción de la certeza por parte del evaluador.

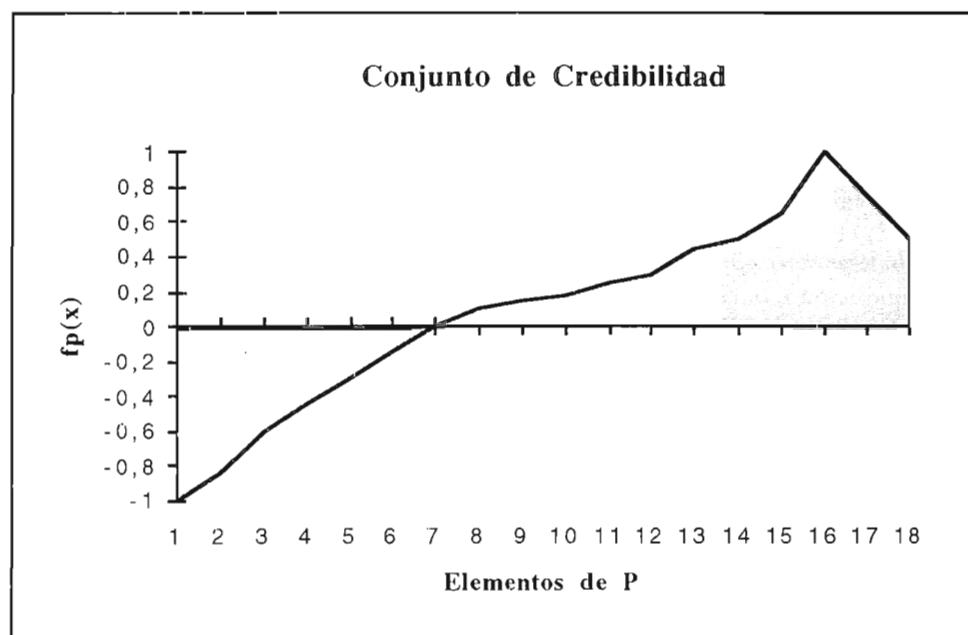
La valuación se realiza en el dominio de R, dentro del rango [-1,1]. Dentro de la valuación de una proposición incluimos la valuación de su negación, de esta manera representamos el grado de certidumbre al afirmar y al negar dicha proposición.

Si el conjunto de valuación está en el intervalo [-1,1], *P* es una proposición de la lógica de credibilidad, en donde  $f_p(x)$  es el nivel de credibilidad de la proposición *P* sobre *x*, perteneciente al conjunto referencial *U*.

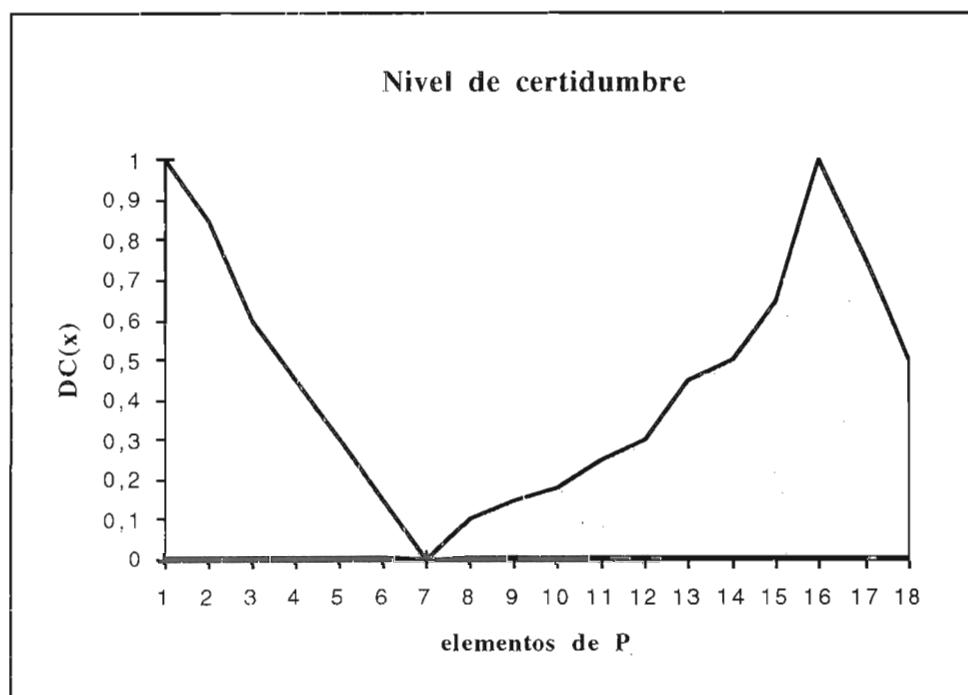
$$P = \{(x, f_p(x)), x \in U\}$$

# Sistemes basats en coneixements

El operador interno  $DC(x)$  nos muestra el nivel de certidumbre de la proposición  $P$  sobre el elemento  $X$ , y que, cuando dicho nivel es muy cercano al 0, es tan incierto afirmar dicha proposición, como negarla.



133



Posteriormente ampliamos dicha lógica, con la utilización de intervalos de confianza, como en los subconjuntos  $\Phi$ -borrosos de Sambug. Con la lógica ampliada podemos trabajar con fronteras y percepciones borrosas, utilizando las mismas reglas que en la lógica  $LC$ .

# Sistemes basats en coneixements

Una proposición de  $\Phi\text{-LC}$  está definida de la siguiente manera:

$$\mathcal{P} = \{(x, (\bar{f}_l(x), \bar{f}_s(x))), x \in U\}$$

donde

$$\bar{f}_p : U \rightarrow (-1, 1)$$

$$(\forall x \in U, \forall \bar{f}_l, \bar{f}_s \in [-1, 1]) [(\bar{f}_l(x), \bar{f}_s(x)) \geq 0 \vee \bar{f}_l(x), \bar{f}_s(x) \leq 0]$$

*Principio de coherencia en el nivel de credibilidad:* cuando se realiza una valuación del nivel de credibilidad de un proposición  $\ell$  sobre un elemento  $x$  del conjunto referencial  $U$ , y dicha valoración pertenece a un segmento de confianza, ambos límites del intervalo deben pertenecer al grado afirmativo o al grado negativo, pero no a ambos.

Es decir, a medida que nos acercamos al nivel mínimo de credibilidad (máximo de incertidumbre), tan incierta es la valoración de un límite como la del otro, y ambos pertenecen, en todo caso, a la misma posición subjetiva del valuador (afirmativa o negativa).

En el caso de que la proposición realice un corte en el nivel de credibilidad 0, éste es el punto de máxima incertidumbre al que convergen ambos límites del conjunto. Y a medida que obtenemos un mayor nivel de credibilidad, y por lo tanto, mayor conocimiento subjetivo de la proposición, éstos pueden diverger en el grado de libertad que queramos dar.

Con la lógica presentada hemos realizado pruebas en árboles de propagación de incertidumbre, con resultados muy positivos, plasmando de forma clara el nivel de credibilidad que el valuador asume en cada proposición (en la línea de Sugeno), y con interpretaciones muy intuitivas de los resultados.

- En el punto de la estrategia de control en la generación del plan hemos partido del algoritmo de ramificación y cota uniéndolo a la valoración de la entropía en la información.

El concepto de entropía encaja perfectamente en la lógica  $\Phi\text{-LC}$  que hemos definido. En ella, la entropía máxima se encuentra cuando los elementos de la proposición tienen valuaciones cercanas al 0, sin embargo, cuando las valuaciones son cercanas al 1 o al -1, estamos en un nivel de entropía mínimo, puesto que estamos cercanos a la certidumbre en la afirmación o negación de dicha proposición respectivamente. Hay que comentar que el cálculo se realiza, no con la valuación directa, sino con la distancia a la incertidumbre total, el operador  $DC(x)$ .

En este punto también hemos hecho simulaciones con el índice de borrosidad de Kauffman, obteniendo resultados favorables. De esta manera podemos realizar la búsqueda evaluando el crecimiento o decrecimiento de la entropía como limitante del método de ramificación y cota.

- El tercer punto, es el de la implementación de la paralelización de la evaluación. Este punto ha sido dividido en dos partes:

Realización de un intérprete de código Lisp que genera el código paralelizado.  
El sistema de control de comunicaciones entre los diferentes  $\mu$ Ps virtuales.

En este tema hay que comentar que nosotros estamos trabajando actualmente en el entorno Macintosh con el MCL.

# Sistemes basats en coneixements

En el tema del intérprete primero realizamos pruebas con una única aplicación que simulaba los diferentes  $\mu$ Ps con objetos, descomponiendo cálculos extensos con listas, asignaciones de variables no dependientes, y evaluación de condiciones.

El siguiente paso fue diseñar un sistema compuesto por:

Una aplicación cliente y controladora principal.

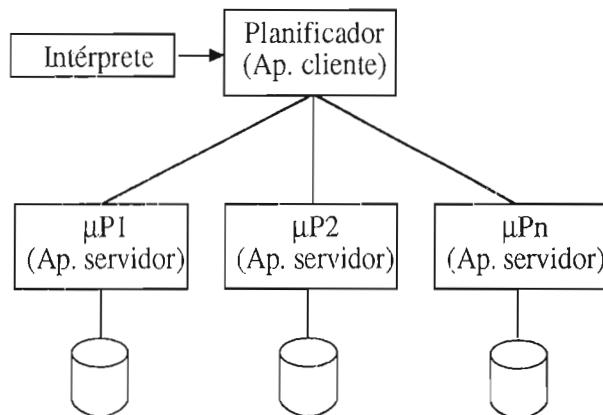
Una serie de aplicaciones servidoras de cálculos a la aplicación cliente.

Se diseñaron los métodos propios de cada aplicación, que se comportaba como un  $\mu$ Ps: envío y recepción de código Lisp.

Hasta el momento hemos conseguido enviar funciones que sólo necesitaban los  $\mu$ Ps servidores de los cálculos, retornar cálculos y tratarlos en la aplicación cliente. Aprovechando los tiempos eliminando esperas de los resultados, lincando los resultados a la función que la invocaba. Tardando de esta manera, el tiempo del  $\mu$ P más saturado.

La aplicación cliente va ejecutando el código paralelizado, y en el momento que necesita cálculos de varios servidores que son dependientes, aplica una barrera de espera para asegurarse de la disponibilidad de todos los resultados invocados.

Hasta el momento tan sólo hemos elegido los cálculos con listas extensas, asignación paralela y evaluación de condiciones, pero está presente la idea de ir ampliando la parallelización a formas. Otro tema es el de unir el intérprete al sistema de control para que él decida en tiempo de ejecución cuando parallelizar, dependiendo de la magnitud de los datos a evaluar, repartición de los datos a las unidades de almacenamiento de los  $\mu$ Ps que trabajarán con ellos (data-stripping), asignación de las funciones principales que cada  $\mu$ P utilizará, sustitución de formas por el código original (Inlining), y de la disponibilidad de los diferentes  $\mu$ Ps virtuales (carga de cada procesador)



# ASPECTES FORMALS

W. Marco Schorlemmer  
Jordi Puigsegur i Figueres  
Javier Larrosa

# Aspectes formals

## Theorem Proving with Transitive Relations from a Practical Point of View\*

W. MARCO SCHORLEMMER

Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

### 1 Introduction

Rewrite techniques have been typically applied to reason with the equality relation and have turned out to be among the more successful approaches to equational theorem proving. They implicitly capture the transitivity and congruence properties of the equality relation in a natural way, and avoid the explicit use of the equality axioms, which pose severe problems in the design of efficient automated theorem provers. Recently an effort has been made to apply these techniques in theorem proving for first-order clauses with equality.

But, since rewrite rules rewrite terms in one direction, it is not only in reasoning with the equality relation where these techniques naturally apply, but in reasoning with arbitrary, probably *non-symmetric*, transitive relations. Symmetry is not a property captured by rewriting. The equality relation is just a special case of monotone transitive relation, which is also symmetric. So the generalization of rewrite systems is not considering rewriting on equivalence classes of terms but even further considering rewrite systems as a logic itself, or considering them as a deduction mechanism for theories with non-symmetric relations, the so called bi-rewriting systems of Levy and Agustí [LA93].

The work done so far in applying rewrite techniques to arbitrary transitive relations showed several important differences with the equational case, due to the lack of symmetry, which difficults notably the deduction mechanism in theories with this kind of relations. New problems appear which must be solved in a quite different way. In this paper we review the use of rewrite techniques for reasoning with arbitrary possibly non-symmetric transitive relations, presenting reasoning with the equality relation as a special case, and we analyse the reasons why an efficient treatment of this generalization to non-symmetric transitive relations is not yet achieved. We also point to the future work which needs to be done in order to come up with these difficulties.

### 2 Reasoning with arbitrary transitive relations

Slagle [Sla72] was the first to propose an inference system for theories with equality, orderings and sets, based on the *chaining* inference rule, which essentially is the equivalent of the paramodulation rule for arbitrary transitive relations.

But in the same manner as ordering restrictions on the paramodulation rule have led to the superposition calculus which avoids the generation of the whole congruence closure of equality, ordering restrictions on the chaining inference rule also avoid the generation of such transitive closure. Therefore rewrite systems may also be used in order to provide decision procedures for the word problems in theories expressed with arbitrary transitive relations. This has been done for the first time by Levy and Agustí [LA93], who developed the so called *bi-rewriting systems*. The generalization of bi-rewriting systems to theorem proving with full first-order clauses with arbitrary transitive relations has been made by Bachmair and Ganzinger [BG94b], who introduced the *ordered chaining calculus*, which generalizes the superposition calculus to arbitrary transitive relations.

\*This work was supported by the project DISCOR (TIC 94-0847-C02-01) funded by the CICYT, and a research fellowship funded by the CSIC

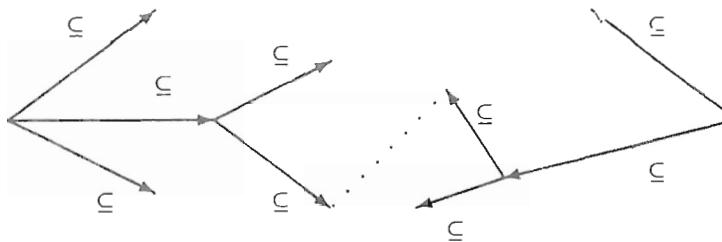
# Aspectes formals

## 2.1 Bi-rewriting systems

Bi-rewriting systems attempt to provide a decision procedure for theories with inclusions (reflexive, transitive, monotonic, *non-symmetric* relations). By orienting a set of inclusions, following an ordering on terms, we get *two* independent rewrite systems, one containing those rewrite rules which rewrite terms into “bigger” ones (with respect to the inclusion relation), and the other one containing rewrite rules which rewrite terms into “smaller” ones. We will distinguish the two separate rewrite relations by denoting the first one with  $\stackrel{\subseteq}{\rightarrow}$  and the second one with  $\stackrel{\supseteq}{\rightarrow}$ . In such a system a *bi-rewrite proof* consists of two paths which join together in a common term:

$$s \stackrel{\subseteq}{\rightarrow} \dots \stackrel{\subseteq}{\rightarrow} u \stackrel{\supseteq}{\leftarrow} \dots \stackrel{\supseteq}{\leftarrow} t$$

In order to have a decision procedure for the word problem of an inclusional theory we need the bi-rewriting system to be *convergent*, i.e. it has to satisfy two properties: *Church-Rosser* and *termination*. The decision procedure for the word problem is then straightforward: To check if  $s \subseteq t$  we reduce  $s$  and  $t$  applying rewrite rules of each rewrite system until a common term is reached. Since the bi-rewriting system is terminating, no infinite branch will be explored:



In the same manner as convergent rewrite systems are a finite representation of the congruence closure of equality, convergent bi-rewriting systems finitely encode the reflexive, transitive and monotone closure of  $\subseteq$ .

An arbitrary bi-rewriting system is non-convergent in general. But, like in the equational case, there exist necessary and sufficient conditions for a terminating bi-rewriting systems to be Church-Rosser, which were stated by Levy and Agustí [LA93].

One can attempt to complete a non-convergent terminating bi-rewriting system, by means of adding divergent critical pairs as new rewrite rules to the system, but unfortunately among two rules of a bi-rewriting system there may be infinite many critical pairs. This is one of the major drawbacks for the tractability of the generalization of rewrite techniques to arbitrary transitive relations.

Obviously, like in equational theories, there may be theories for which the completion procedure will keep generating new critical pairs and therefore will not stop. Completion also can terminate unsuccessfully. This happens when it finds a critical pair which cannot be oriented with the given reduction ordering: There exists pairs, which are non-orientable by any reduction ordering.

## 2.2 The role of symmetry in bi-rewriting systems

If the arbitrary transitive relation we need to reason with is, besides reflexive and monotonic, also symmetric, then we are dealing with a congruence relation. Bi-rewriting systems based on equality appear simply to be rewrite systems as known from the equational case, because when orienting equations following a given reduction ordering no two distinct rewrite systems are obtained.

The symmetry of the equality relation makes an equality to be equivalent to two inclusions (since the relation defined by the two inclusions is also an equivalence relation). Due to symmetry the case of infinitely many critical pairs among two rules can be avoided.

Symmetry plays an important role, because when reasoning with equivalence relations, we can deal with the notion of equivalence class. Each term not only has an irreducible term, the *normal form*, but this normal form is also unique for each term. Rewriting is done within an equivalence class, and all the members of this class share the same normal form. A decision procedure for the word problem in equational theories, based on convergent rewrite systems, is much simpler than with arbitrary transitive relations. Just the normal forms of the two terms of the equation we want to validate are computed and checked for identity.

# Aspectes formals

## 3 Theorem proving with rewrite techniques

In order to avoid failure during the completion process, completion itself could be used as a semi-decision procedure. Unfortunately the completion procedure may fail to orient a critical pair as a rewrite rule and the process is prone to abort. This makes standard Knuth-Bendix completion unappropriate for theorem proving purposes. This situation is avoided with a variant of completion, the so called *unfailing completion*, which is refutationally complete for equational theories. This can be generalized for the unfailing completion of bi-rewriting systems.

### 3.1 Ordered chaining

As paramodulation, chaining has the drawback that it explicitly generates the transitive closure of the binary relation. There is an extra cost in this generalization, since chaining through variables is now needed in general, unlike in paramodulation.

But like ordering restrictions on the paramodulation inference have led to the superposition calculus, so ordering restrictions on the chaining inference rule take the advantages of rewrite techniques resulting from bi-rewriting systems, and avoid generating the whole closure using bi-rewrite proofs to prove the validity of a transitive relation. So *ordered chaining*, introduced by Bachmair and Ganzinger [BG94b], is chaining with additional ordering restrictions.

In this context, as in the equational case, the process of completion is known as *saturation*. In analogy to a completion procedure which attempts to produce a convergent bi-rewriting system, in which all critical pairs are convergent (have a bi-rewrite proof), the saturation process attempts to provide us a set of clauses in which all inferences are *redundant*. The redundancy notion generalizes the idea of convergent critical pairs, i.e. those pairs that have already a bi-rewrite proof and need not to be added as a new inclusions to the set of inclusions. We say that the set of clauses is saturated, i.e. *closed up to redundancy*. In the same manner as during the completion process rewrite rules are kept as irreduced as possible, during saturation redundant clauses are deleted, and redundant inferences avoided.

## 4 Putting it into practice

Theorem provers typically consist of two components: On one hand we require a deductive inference system that is used to generate new formulas, such as the chaining inference rule. On the other hand we need also techniques for simplifying formulas and eliminating redundancies, because we would like a theorem prover to be as efficient as possible, avoiding it to generate superfluous clauses, or to explore blind alleys of the search space.

In the context of the saturation of a set of full first-order clauses the theorem prover needs to have implemented powerful *redundancy provers*, which allow to drastically cut down the search space of the theorem prover, by maintaining only the minimum number of necessary clauses, keeping them as small as possible with respect to the ordering on clauses, and by avoiding those inferences which do not contribute to the saturation of the set.

These redundancy provers are supposed to detect for example, tautologies, subsumption and condensment within clauses, and they simplify clauses as much as possible, for example by demodulation. Redundancy provers also should notice when a set is yet saturated and no more inferences need to be performed. Without the use of powerful redundancy provers the saturation of a set of clauses is practically impossible. We will see that the most important drawbacks when handling arbitrary transitive relations appear at this point.

Instead of dealing with a single rewrite relation we have to manage a bi-rewriting system. No rewriting within equivalence classes is done, which invalidates the notion of unique normal form on which equational rewrite systems are based. The order of the application of the rewrite rules is now significant for a bi-rewrite proof to be found. We also pointed out that for the completion of bi-rewriting systems an infinite number of critical pairs may appear between rules.

Though Levy and Agustí, and Bachmair and Ganzinger proved the completeness of their respective inference systems, all the differences with respect to the equational case appear to be problematic for an efficient application of these rewrite techniques.

# Aspectes formals

## 4.1 Redundancy provers and rewrite proofs

Though it is possible to define a powerful abstract notion of redundancy, which is indispensable for the implementation of efficient theorem provers, without a corresponding efficient decision procedure which gives a bi-rewrite proof for transitive relations, we will not be able to have efficient redundancy provers.

The notion of redundancy is also applicable to clauses and inferences with arbitrary transitive relations. But all existing techniques for redundancy proving in the equational case are based on rewrite proofs. Since in order to find bi-rewrite proofs based on a bi-rewriting system we need to search among all possible paths which can be build starting from either term, this is an important drawback for efficient redundancy provers and hence for efficient theorem proving in these kind of theories. It appears to be necessary to find an efficient treatment of this search space first.

Unfortunately, the techniques of rewriting applied to theories with arbitrary transitive relations have been treated only in an abstract level, without giving a procedure which provides such bi-rewrite proofs. In the equational case, once a convergent rewrite system is given, the validity of an equation can be determined efficiently. But, how can this done in the arbitrary case?

Furthermore, in the equality case, theorem provers make use of very powerful redundancy provers like demodulation, which in practice drastically reduces the number of clauses that need to be managed. Such simplification techniques have no equivalent for theories with arbitrary transitive relations, which means that for the refutation of clauses with such relations much more clauses need to be inferred. We need new redundancy proving techniques to come up with this situation.

## 4.2 Variable chaining

Important refinements to the paramodulation inference have been done, by proving that no paramodulation through variable positions is required for completeness. Unfortunately this is not yet true with chaining. Chaining through variables is necessary for completeness. This is an important drawback, because unification with variables always succeeds, and therefore the inference is very prolific. So in order to make the theorem proving derivation efficient, we have to avoid as much variable chainings as possible. Fortunately the ordering restrictions of ordered chaining avoid many of them. In addition the redundancy notion makes inferences redundant [BG94b].

A way to restrict the prolific variable chaining is by studying special theories, for which these kind of chainings are redundant. In dense total orderings without endpoints, for example, Bachmair and Ganzinger [BG94a] showed that the variable elimination technique in these theories is a simplification rule captured by the notion of redundancy.

## 4.3 Chaining below variables

A quite problematic case, in the sense of practicability, is when we handle functions which are monotonic or antimonotonic with respect to the transitive relation, but are not symmetric. In these cases variable *subterm chaining* is necessary which leads to a lot of problems if completeness results are wanted.

We pointed out that computing the critical pairs between rules of each rewrite relation, as in the Knuth-Bendix completion, was not sufficient in order to guarantee the bi-rewriting system to be Church-Rosser. Levy and Agustí [LA93] proved that *extended* critical pairs need to be computed. They extended the notion Church-Rosser known of equational rewrite systems to bi-rewriting systems intended in order to give a completion procedure for bi-rewriting systems based on theories of reflexive and monotonic transitive relations (inclusions).

Generation of extended critical pairs can also be seen as the conclusion of an inference which chains below variables:

$$\frac{b \subseteq a \quad f(x, x) \subseteq x}{f(c[b], c[a]) \subseteq c[a]}$$

Note that  $a$  is unified with some term *below* variable  $x$ , and therefore context  $c[ ]$  may be arbitrary.

Computation of extended critical pairs can be avoided by using only left-linear rewrite system, but this is a too strong restriction. Though it is impossible in practice to add infinite many new rewrite rules to a rewrite systems, Levy and Agustí [LA93] attempt to build a completion procedure based on rule schemes, which encode the infinite number of new rewrite rules. In this way they were able to give canonical bi-rewriting systems for the inclusion theory of the union, and of non-distributive and distributive lattices. Based on this idea of handling extended critical pairs with rule schemes, Levy proposed in [Lev93] to

# Aspectes formals

attack this problem by means of using second-order bi-rewriting systems in order to handle the contexts mentioned above as second-order variables.

## 5 Conclusions

Unfortunately, for transitive relations which do not fulfill the symmetry property, several important problems arise, which put difficulties on an efficient treatment of these kind of relations. Major problems appear when the relation is also monotonic. But we have seen that, though the need of dealing with contexts forces us to handle with second-order terms, in some theories this can be overcome by the use of some kind of rules schemes. Therefore it seems that by studying special theories the second-order case may be avoided. Also it may be reasonable to focus special attention on the generation of rewrite proofs for transitive relations in an efficient way, by studying techniques for exploring the rewrite tree. Finally, it is also necessary to find new simplification techniques which restrict the search space in a similar way as demodulation does for theorem provers with equality.

## References

- [BG94a] Leo Bachmair and Harald Ganzinger. Ordered chaining for total orderings. In Alan Bundy, editor, *Automated Deduction — CADE'12*, volume 814 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 435–450, Nancy, 1994. Springer-Verlag.
- [BG94b] Leo Bachmair and Harald Ganzinger. Rewrite techniques for transitive relations. In *Proceedings, Ninth Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, pages 384–393, 1994.
- [LA93] Jordi Levy and Jaume Agustí. Bi-rewriting, a term rewriting technique for monotonic order relations. In Claude Kirchner, editor, *Rewriting Techniques and Applications*, volume 690 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 17–31, Montreal, 1993. Springer-Verlag.
- [Lev93] Jordi Levy. Second-order bi-rewriting systems. Technical Report IIIA 93/ 23, Institut d’Investigació en Intel·ligència Artificial (CSIC), Blanes, 1993.
- [Sla72] J. R. Slagle. Automated theorem proving for theories with built-in theories including equality, partial orderings and sets. *Journal of the ACM*, 19:120–135, 1972.

# Aspectes formals

## GRASP: Un Apropament Visual a la Captura de Requeriments

Jordi PUIGSEGUR i FIGUERAS (E-mail: jpf@iiia.csic.es)

Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial (CSIC)

Campus UAB, 08193 Bellaterra, CATALUNYA

### 1 Introducció

Les especificacions formals s'utilitzen en l'enginyeria del software com una eina per apropar les primeres descripcions informals d'un problema a la seva implementació en un llenguatge de programació, ja sigui imperatiu o declaratiu. La major part del treball portat a terme en aquesta àrea s'ha concentrat en la definició de llenguatges formals d'especificació així com en la construcció de programes correctes a partir d'aquestes especificacions formals. En canvi hi ha menys treballs que tractin d'escurçar la distància entre la primera especificació formal i les descripcions informals del problema, és a dir, el que es coneix com a *captura de requeriments*.

La *captura de requeriments* presenta un problema clau: la validesa de les especificacions, és a dir, l'adequació de les mateixes als problemes del món real que pretenen representar. És fàcil veure que no es pot demostrar la correctesa de la primera especificació formal que obtenim d'un problema. Tan sols podem comprovar l'adequació a la realitat d'aquesta especificació quan:

- l'especificació és comprensible pels experts en el domini del problema, llavors aquests experts poden contrastar l'especificació amb els coneixements que tenen del problema,
- o bé quan el llenguatge d'especificació és executable i podem comprovar l'adequació de l'especificació veient que els resultats de l'execució són els esperats.

En aquesta presentació es proposa<sup>1</sup> GRASP, un llenguatge d'especificació formal d'alt nivell i independent del domini, l'objectiu principal del qual és permetre als usuaris capturar els trets fonamentals d'un problema de forma senzilla, és a dir, construir especificacions preliminars o dit d'una altra forma, obtenir especificacions de les especificacions. GRASP és un llenguatge visual que té com a fonament teòric el llenguatge funcional basat en inclusions de conjunts anomenat Calculus of Refinements (COR) desenvolupat al IIIA per en Jordi Levy a la seva tesi doctoral (veure [2]).

Les principals característiques del disseny de GRASP són les següents:

1. GRASP és un llenguatge completament formal, on el significat de les expressions és independent del domini en que treballem. En aquest aspecte, tot i tractar-se d'un llenguatge no textual presenta totes les característiques necessàries per considerar-lo completament formal: sintàxi, semàntica, etc. però que en aquesta exposició obviarem per motius de brevetat.
2. GRASP és proper a la Lògica de Primer Ordre (LPO) però més senzill. Utilitza conceptes de la teoria de conjunts que ens són familiars i que a més ens són presents de forma visual, permetent per tant amagar molts dels detalls formals de la LPO.
3. GRASP permet portar a terme el procés de l'especificació de forma incremental a base de successius refinaments, desde presentacions diagramàtiques fins a LPO. A més hi ha previst automatitzar la comprovació de la correctesa dels passos de refinament amb l'ajuda d'un demostrador automàtic (per més informació sobre demostració automàtica utilitzant relacions transitives podeu veure el treball que porta a terme en Marco Schorlemmer a [3]).

En el proper apartat es presenta la sintaxi i semàntica del llenguatge mitjançant un exemple. En l'apartat 3 s'introduceix la utilització d'aquest llenguatge dins del procés de captura de requeriments i construcció d'especificacions executables mostrant dues aproximacions diferents, totes dues en desenvolupament en aquests moments.

<sup>1</sup>Aquest treball s'està portant a terme conjuntament amb en Jaume Agustí (Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial, CSIC) i en Dave Robertson (Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh).

# Aspectes formals

## 2 El llenguatge GRASP

GRASP és un llenguatge basat en conjunts. Tot i que parlarem de constants, funcions i variables, en realitat qualsevol diagrama de GRASP es pot veure com una representació visual d'uns conjunts i les propietats que els caracteritzen i els relacionen, com la inclusió de conjunts i la dependència funcional entre d'altres.

A GRASP els conjunts es poden representar com a rectangles o com a cercles. Els rectangles representen conjunts constants o el resultat d'aplicar una funció a un o més conjunts, mentres que els cercles representen conjunts variables. Cal dir que a COR, totes les funcions s'apliquen a conjunts i donen com a resultat conjunts, cosa que ens facilita aquesta extensió gràfica d'un formalisme textual.

L'exemple que utilitzarem per presentar el llenguatge consisteix en formalitzar el concepte d'avantpassat en un conjunt de persones. Per tal de portar a terme aquesta formalització, primer s'ha de definir el conjunt *persones*, sobre el qual treballarem, i la funció *pares* que utilitzarem com a base per a definir *avantpassats*, l'objectiu del problema. En la figura 1 introduïm ambdós elements, definint el conjunt *persones* com a subconjunt del conjunt universal i la funció *pares* restringint els possibles valors del resultat d'aplicar-la a qualsevol conjunt de persones (el que en programació tradicional s'entén com a tipificació).

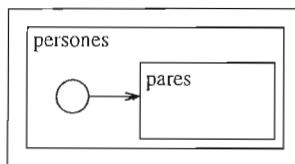


Figura 1: Funció *pares*

146

En la propera figura (num. 2) introduïm la funció *avantpassats*, que és el que es vol especificar en aquest exemple, de forma similar a com s'ha fet amb la funció *pares* en la figura 1:

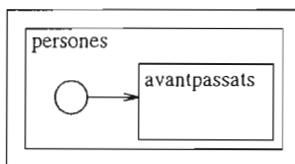


Figura 2: Funció *avantpassats*

Tots els diagrames de GRASP es poden traduir al llenguatge d'inclusions (COR) de forma automàtica. Els termes es construeixen a partir dels grafs acíclics formats per els rectangles i els cercles com a nodes i les fletxes com a arcs. Les fòrmules atòmiques s'obtenen de la inclusió gràfica dels rectangles i cercles. Cal remarcar que només s'estreu dels diagrames la informació positiva de les inclusions, és a dir, si en un diagrama dos rectangles no tenen cap punt en comú això no voldrà dir que no puguin tenir elements comuns. Seguint aquest procés, de les figures 1 i 2 obtenim les següents fòrmules:

$$\begin{aligned} & \text{persones} \subseteq \text{everything} \\ & \text{pares}(X) \subseteq \text{persones} \Leftarrow X \subseteq \text{persones} \\ & \text{avantpassats}(X) \subseteq \text{persones} \Leftarrow X \subseteq \text{persones} \end{aligned}$$

En la figura que ve a continuació establim la relació entre *avantpassats* i *pares*, utilitzant un esquema recursiu. El diagrama (b) és el cas base i ens mostra que els pares d'un conjunt qualsevol de persones són *avantpassats* d'aquest conjunt de persones. El diagrama (b) és el cas recursiu, mostrant que els *avantpassats* dels pares d'un conjunt qualsevol de persones també són *avantpassats* d'aquest conjunt de persones. La utilització de repositoris d'esquemes d'especificació genèrics, en aquest cas l'esquema recursiu, és un altre dels temes en què actualment s'investiga.

# Aspectes formals

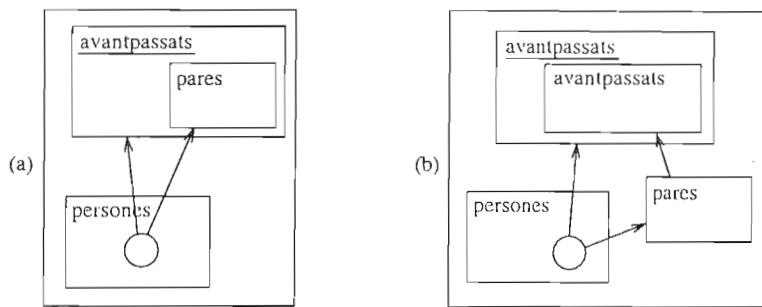


Figura 3: Refinament de la funció *avantpassats*

La traducció dels diagrames de la figura 3 a llenguatge d'inclusions és la següent:

$$\begin{aligned} \text{avantpassats}(X) \supseteq \text{pares}(X) &\Leftarrow X \subseteq \text{persones} \\ \text{avantpassats}(X) \supseteq \text{avantpassats}(\text{pares}(X)) &\Leftarrow X \subseteq \text{persones} \end{aligned}$$

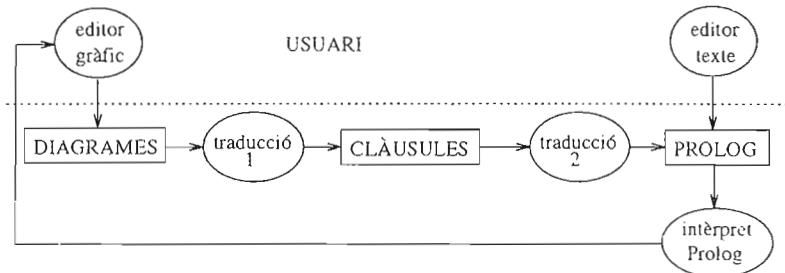
L'exemple desenvolupat en aquest apartat és molt senzill, és un “toy problem” allunyat dels problemes que es troben en el món real. La motivació i la utilitat d'aquest exemple són tan sols mostrar abreujadament les característiques més importants de GRASP. Es pot trobar un exemple del desenvolupament d'un problema més complexe a [1], concretament un sistema de planificació d'horaris.

## 3 GRASP en la construcció d'especificacions en Prolog

En els capítols anteriors hem introduït la sintaxi de GRASP i hem desenvolupat l'exemple dels avantpassats. En aquest capítol veurem com es pot obtenir una especificació executable en Prolog a partir dels esquemes de la figura 3.

Estudiarem dues alternatives, la primera consistirà en traduir GRASP a Prolog i després completar la especificació directament en Prolog<sup>2</sup>, mentres que en la segona no traduirem les fòrmules de GRASP sinó que definirem una interfície entre les fòrmules i Prolog per a completar després l'especificació en Prolog.

### 3.1 Traducció de GRASP a Prolog



Les següents fòrmules obtingudes a partir de la figura 3:

$$\begin{aligned} \text{avantpassats}(X) \supseteq \text{pares}(X) &\Leftarrow X \subseteq \text{persones} \\ \text{avantpassats}(X) \supseteq \text{avantpassats}(\text{pares}(X)) &\Leftarrow X \subseteq \text{persones} \end{aligned}$$

són les que traduirem a Prolog. Primer de tot, el conjunt *persones*, el representarem en Prolog com un predicat unari *persona*, que ens determinarà la pertinença d'un element al conjunt *persones* ( $X \in \text{persones} \Leftrightarrow \text{persona}(X)$ ). Les dues funcions que utilitzem en l'exemple, *pares* i *avantpassats*, són additives ( $f$  és additiva ssi  $f(X) = \bigcup_{x \in X} f(x)$ ), i la traducció es fa introduint dos predicats binaris

<sup>2</sup>Un sistema que segueix aquesta filosofia ha estat implementat en LPA Mac Prolog per en Dave Robertson

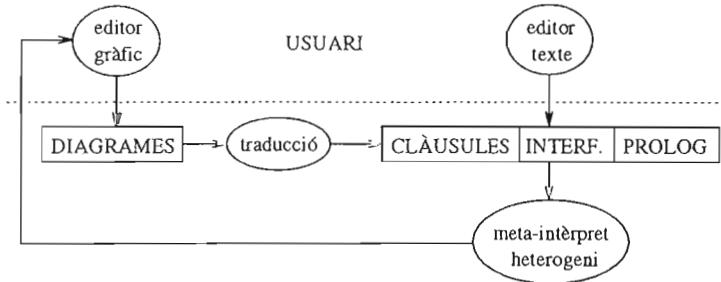
# Aspectes formals

progenitor i avantpassat, de forma que compleixin  $X \in pares(\{Y\}) \Leftrightarrow progenitor(Y, X)$  i  $X \in avantpassat(\{Y\}) \Leftrightarrow avantpassat(Y, X)$ . A continuació només falta trobar la traducció a Prolog de les fórmules anteriors i la completació del codi obtingut definint els predicats progenitor i persona:

```
avantpassat(X,Y) :- persona(X), progenitor(X,Y).  
avantpassat(X,Y) :- persona(X), progenitor(X,Z), avantpassat(Z,Y).  
  
progenitor(jaume,josep).  
progenitor(maria,josep).  
...  
  
persona(jaume).  
persona(josep).  
...
```

Seguint aquest procés hem arribat a una especificació en Prolog que té un subconjunt dels models de l'especificació inicial en GRASP obtinguda en la secció anterior. Aquesta especificació es pot executar i comprovar si es correspon al concepte d'avantpassat que nosaltres coneixem i voliem capturar en aquesta especificació.

## 3.2 META-GRASP: Una filosofia diferent



En aquest cas les dues clàusules provinents de la figura 3 són transformades a unes altres equivalents però més senzilles, aptes per a ser interpretades. Aquesta forma simplificada per a les clàusules de GRASP l'anomenarem canònica i consisteix en clàusules on totes les fórmules són del tipus  $X \subseteq t$  o bé  $X = t$ , on  $X$  és una variable i  $t$  és un terme sense anellaments, és a dir, un terme 'planer'. A continuació veiem com queden les clàusules de la figura 3 després d'aquesta transformació:

$$\begin{aligned} Y \subseteq avantpassats(X) &\Leftarrow Y \subseteq pares(X) \wedge X \subseteq persones \\ Y \subseteq avantpassats(X) &\Leftarrow Z \subseteq pares(X) \wedge Y \subseteq avantpassats(Z) \wedge X \subseteq persones \end{aligned}$$

El pas següent consisteix en definir la interfície entre les clàusules de GRASP i el reste de l'especificació en Prolog, associant la pertanyença a la imatge d'una funció amb un predicat Prolog:

```
avantpassat(X,Y) :- Y in avantpassats(X).
```

```
X in persones :- persona(X).  
X in pares([Y]) :- pare(Y,X).  
X in pares([Y]) :- mare(Y,X).
```

Tot seguit es completa l'especificació en Prolog introduint els detalls concrets necessaris per a obtenir una especificació executable, que en el nostre exemple només són les dades del problema:

```
persona(jaume).  
persona(maria).
```

# Aspectes formals

```
...  
pare(jaume,josep).  
pare(maria,josep).
```

```
...
```

```
mare(pere,maria).
```

```
...
```

Amb aquesta informació el meta-intèrpret és capaç d'obtenir correctament la relació `avantpassat` a través de la meta-interpretació del predicat "in", utilitzant directament les clàusules GRASP en forma canònica descrites anteriorment.

## 4 Treball en curs

Actualment s'està portant a terme recerca en diversos aspectes relacionats amb GRASP :

- La millora i ampliació del llenguatge, revisant la definició actual en un intent de millorar l'expressivitat i la facilitat d'ús i comprensió. S'estudien quin són els altres elements necessaris per fer de GRASP una eina realment útil, com ara funcions predefinides, tipus de dades, etc.
- També s'estudia la utilització de GRASP en la construcció d'especificacions executables, en concret s'estudia la integració del formalisme dins d'un sistema que englobi tot el procés de l'especificació d'un problema, de la captura de requeriments fins a l'execució de l'especificació. Un altre aspecte important en aquest punt és el desenvolupament de nous problemes complexos, que permetint avaluar els avantatges i/o inconvenients que comporta la utilització d'aquest nou formalisme.
- Finalment, es contempla la possibilitat d'utilitzar GRASP en la construcció d'especificacions executables en altres paradigmes diferents de la programació lògica, com per exemple especificacions basades en llenguatges funcionals.

## References

- [1] Jaume Agustí, Dave Robertson, and Jordi Puigsegur. GRASP: A GRAphical SPecification Lan-guage for the Preliminary Specification of Logic Programs. Technical Report IIIA 95/13, Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial, Bellaterra, Catalonia, 1995.
- [2] Jordi Levy. *The Calculus of Refinements: a Formal Specification Model Based on Inclusions*. PhD thesis, Departament de Llenguatges i Sistemes Informàtics, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1994.
- [3] W. Marco Schorlemmer and Jaume Agustí. Theorem Proving with Transitive Relations from a Practical Point of View. Technical Report IIIA 95/12, Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial, Bellaterra, Catalonia, 1995.

# Aspectes formals

## Técnicas basadas en optimización para la solución de problemas de satisfacción de restricciones.

Javier Larrosa

Universitat Politècnica de Catalunya  
Dep. Llenguatges i Sistemes Informàtics  
Pau Gargallo 5 08028 Barcelona, SPAIN larrosa@lsi.upc.es

### 1. Introducción

Un problema de satisfacción de restricciones (*o constraint satisfaction problem, CSP*) se define como un conjunto de variables ( $\{X_i\}$   $i=1..n$ ), un dominio discreto y finito para cada una de ellas ( $\{D_i\}$ ) y un conjunto de restricciones booleanas indicando qué combinaciones de valores son permitidas. Por simplicidad, supondremos un dominio común para todas las variables ( $D=\{l_k\}$ ,  $k=1..m$ ) y restricciones binarias  $\{R_{ij}\}$ . Una asignación de valores a variables es *solución* del CSP si satisface todas las restricciones. Si el problema no tiene solución, la mejor solución es aquella asignación que satisface el máximo de restricciones.

Un amplio abanico de problemas tratados por la IA se pueden ver como casos especiales de CSP. Algunos ejemplos se encuentran en la *visión artificial, mantenimiento de creencias, razonamiento temporal, planificación, distribución de recursos, satisfacibilidad*, etc. (para referencias de cada aplicación ver [1]). Para todos ellos se han desarrollado diversas estrategias de resolución, en muchos casos valiéndose de características inherentes al problema.

En general los CSP son problemas *NP-completos (NP-difíciles si buscamos la mejor solución)*, por lo que los algoritmos conocidos que los resuelven pueden ser extremadamente ineficientes. Se ha observado que determinadas instancias de problemas pueden ser muy difíciles de resolver para algunos algoritmos y fáciles para otros, sin embargo ciertas instancias resultan difíciles en todos los casos. En los últimos años se ha hecho un esfuerzo importante para caracterizar estos problemas especialmente difíciles [2].

En este trabajo presentamos algunos resultados que nos permiten ver los CSP como problemas de *optimización global*. En la sección 2 indicamos los trabajos relacionados y las líneas de investigación en las que se puede situar nuestro trabajo. La sección 3 introduce algunas definiciones de conceptos utilizados en el campo de la *visión artificial* que nosotros utilizamos en nuestra aproximación. La sección 4 presenta los resultados teóricos y en la sección 5 se ven algunos resultados prácticos. Finalmente, las líneas abiertas de trabajo se presentan en la sección 6.

### 2. Trabajo Relacionado

Los algoritmos que resuelven CSP realizan una búsqueda en el espacio de estados definidos por las variables del problema y sus valores posibles. La mayor parte de ellos efectúan una *búsqueda sistemática* basada en una *estrategia de backtracking*. En un momento dado de la ejecución del algoritmo se tiene un subconjunto de las variables del problema con un valor asignado (*variables pasadas*) de forma que se satisfacen las restricciones que involucran a estas variables. Cada paso del algoritmo consiste en escoger una variable sin valor (*variable futura*) y asignarle un valor consistente con las variables pasadas, pasando así a

## Aspectos formales

formar parte de estas. Cuando esto no es posible se toma una de las variables pasadas y se modifica su valor asignado(*backtracking*). Cuando no quedan variables por asignar se tiene una solución del problema.

Para mejorar el rendimiento de este algoritmo se pueden hacer algunas modificaciones, éstas se pueden englobar en dos grupos [1]:

a) *Pre-procesar el problema de forma que quede simplificado*. Este es el propósito que se persigue con los algoritmos de *consistencia de arcos* y *consistencia de caminos* que consisten en detectar (y eliminar) valores que no pueden aparecer en las soluciones del problema.

Una modificación de esta idea consiste en no hacerlo como un pre-proceso, sino dinámicamente. Cuando se asigna un valor a una variable se elimina del dominio de las variables no asignadas los valores incompatibles con este. A estas estrategias se las llama de *anticipación*.

b) *Heurísticas que guíen la búsqueda*. La búsqueda sistemática debe resolver dos indeterminaciones: *qué variable* se toma para una nueva asignación, y *qué valor* se le asigna a la variable. En función de cómo las resolvemos encontraremos la solución antes o después. Un conjunto de estrategias que ha dado buen resultado en la selección de variable se basa en tratar de provocar los backtrackings lo antes posible (*fail first*). Estas estrategias consiguen anticipar la detección de los caminos que no llevan a ninguna solución evitando el recorrido innecesario de subárboles del espacio de búsqueda.

La incorporación de estas técnicas proporciona mejoras sustanciales en el rendimiento de los algoritmos, gracias a que se reduce drásticamente el espacio de búsqueda. Cabe destacar que los algoritmos basados en búsqueda sistemática son exhaustivos y por ello completos, es decir, está garantizado que si el problema tiene solución el algoritmo la encontrará.

152

En los últimos años han aparecido nuevos algoritmos para la resolución de CSP con una estrategia diferente de búsqueda. En líneas generales esta estrategia es la siguiente: *Asignar valores a todas las variables; mientras esta asignación no sea consistente (incumpla restricciones) hacer modificaciones que disminuyan el número de restricciones insatisfactables*. El inconveniente principal de esta aproximación es que no es completa y por lo tanto no garantiza que se encuentre la solución. Se puede llegar a estados no consistentes en los que no se puede (o no se sabe) hacer ninguna modificación que mejore la calidad de la asignación. Ante estas situaciones es habitual hacer un poco de *búsqueda local*, es decir, probar algunas modificaciones que, aunque no disminuyan el número de inconsistencias, nos permitan salir de esta situación de *impasse*. Si esto no funciona, se reinicia a partir de una asignación inicial diferente, con la esperanza de que ésta sí nos lleve a una solución. Este esquema algorítmico se puede ver como la *minimización* de la función definida sobre las posibles asignaciones de valores a las variables que devuelve el número de inconsistencias que ésta causa, donde el método usado en la minimización es el del *descenso* (*o hill climbing*). Con esta perspectiva, los estados en los que el algoritmo no puede seguir avanzando serían *mínimos locales* de la función. Estos algoritmos han resultado ser muy útiles para algunos problemas. Cabe destacar el alto rendimiento de *min-conflicts* en problemas de distribución de recursos [3], la efectividad de la heurística de Lin-Kernighan en el *problema del viajante de comercio* y los buenos resultados que está dando *GSAT* en problemas de satisfacibilidad lógica [4]. Nuestro trabajo se puede englobar dentro de esta línea de investigación, pues como se verá, tratamos de beneficiarnos de la estrecha relación que hay entre los CSP y la optimización de funciones, a pesar de que en los resultados prácticos que presentamos no seguimos totalmente el esquema algorítmico descrito. Por otra parte, nosotros trabajamos con funciones más sofisticadas, en el sentido de que consideran más información sobre la estructura del problema, con la intención de que esto facilite su resolución.

Nuestro trabajo también se podría incluir dentro de una corriente que ha tomado una gran fuerza dentro de la IA en los últimos años, y que recoge las diferentes *técnicas subsimbólicas* utilizadas en la resolución de problemas. A diferencia de los métodos clásicos desarrollados por la IA, estas nuevas estrategias no se basan en símbolos como representación del mundo, más *reglas* como representación de la inferencia seguida en la

# Aspectos formales

resolución de los problemas. Claros ejemplos de esta línea de trabajo son las técnicas de *simulated annealing* [5] y *algoritmos genéticos* [6] donde las reglas que manipulan los símbolos, en vez de tratar de capturar la inferencia seguida en la resolución del problema, se basan en modelos físicos que nada tienen que ver con la semántica del problema, como es la *mecánica estadística* en el primer caso y la *evolución biológica* en el segundo. La línea más radicalmente diferente a la IA simbólica sería la que trata los modelos *conexionistas* [7].

### 3. Técnicas de relajación

Las técnicas de relajación [8] son una familia de métodos desarrollados en el campo de la visión artificial que han dado buenos resultados en problemas de interpretación de imágenes a bajo nivel. Estas técnicas se aplican en *problemas de etiquetado* (LP) que definimos a continuación. La relación de estos con los CSP se verá en la próxima sección.

Un LP se caracteriza con un conjunto de *unidades* ( $\{U_i\}$   $i=1..n$ , por ejemplo los *pixels* de una imagen), un conjunto de *etiquetas* (p.e. posibles interpretaciones de los *pixels*) que asumiremos común para todas ellas ( $\{l_k\}$   $k=1..m$ ) y un conjunto de *relaciones de vecindad* (que asumiremos binarias y simétricas) entre unidades ( $r_{ij}$ ). Las relaciones de vecindad son funciones definidas sobre las etiquetas de las unidades y miden la compatibilidad de estas etiquetas para estas unidades vecinas. Valores positivos se interpretan como que las etiquetas son compatibles, mientras que valores negativos indican incompatibilidad. Solucionar el problema consiste en asignar etiquetas a las unidades de forma que se maximice su *compatibilidad* respecto a las unidades vecinas. Estas asignaciones no tienen que ser unívocas, es decir, una unidad puede tener asignadas distintas etiquetas con diferentes pesos asociados. Una *solución* para un LP es un *etiquetado consistente*. El conjunto de etiquetados ( $K$ ) se define de la siguiente manera:

**Def:**

$$K = \{P \in R^{nm} \mid P = [p_1, \dots, p_n]; p_i = [p_i[\lambda_1], \dots, p_i[\lambda_m]] \in R^m; \\ 0 \leq p_i[\lambda_k] \leq 1; \sum_{k=1}^m p_i[\lambda_k] = 1, i=1, \dots, n\}$$

En otras palabras, un etiquetado  $P$  es una asignación de pesos a las etiquetas de las unidades.

**Def:**

El conjunto de los *etiquetados no ambiguos* ( $K^*$ ) es:

$$K^* = \{P \in R^{nm} \mid P = [p_1, \dots, p_n]; p_i = [p_i[\lambda_1], \dots, p_i[\lambda_m]] \in R^m; \\ p_i[\lambda_k] = 0 \text{ or } 1; \sum_{k=1}^m p_i[\lambda_k] = 1, i=1, \dots, n\}$$

es decir, un etiquetado no ambiguo es una asignación unívoca de etiquetas a las unidades

**Def:**

$P$  es *consistente* [9] si y solo si es un máximo local de (función de consistencia local media)

$$A(P) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m r_{ij}(l_k, l_l) p_i[l_k] p_j[l_l]$$

# Aspectos formales

## 4. Relación entre LP y CSP

Se puede ver que los CSP son casos particulares de LP y que es fácil transformar un CSP en un LP. El LP asociado a un CSP se obtiene de la siguiente manera

```
para cada par de variables (i,j), i,j=1,...,n  
para cada par de valores ( $\lambda_k, \lambda_{k'}$ ), k,k'=1,...,m  
  si  $R_{ij}(\lambda_k, \lambda_{k'})$  es cierto (valores permitidos)  
    entonces  $r_{ij}(\lambda_k, \lambda_{k'})=1$   
    sino  $r_{ij}(\lambda_k, \lambda_{k'})=-1$   
  finsi  
finpara  
finpara
```

Sin embargo no todas las soluciones del LP asociado son soluciones para el CSP, pues hace falta exigir algunas condiciones suplementarias que indicamos a continuación

### Teorema [10]:

Un etiquetado P se podrá interpretar como la *mejor solución* de un CSP si cumple las siguientes condiciones:

- es solución del LP asociado al CSP
- es no ambiguo
- es el máximo global de  $A(P)$

154

Este teorema nos caracteriza los CSP como un problema de optimización global de una función continua. Notese que c) implica a), y por lo tanto resolver un CSP consiste en maximizar  $A(P)$ . Si el máximo encontrado no cumpliera b), se puede encontrar otro máximo que sí lo cumpla a partir de éste [11]. En problemas con solución es fácil ver que el máximo global de  $A(P)$  toma un valor conocido a priori [10].

## 5. Resultados prácticos obtenidos

Usando los resultados de la sección anterior, se pueden solucionar los CSP optimizando la función  $A(P)$  asociada. Un método de optimización muy conocido es el del gradiente, que consiste en moverse por el dominio de la función a partir de un punto inicial siguiendo la dirección del *gradiente*. Cuando la función que se quiere optimizar tiene el dominio restringido, el gradiente se proyecta previamente sobre el dominio para garantizar que el nuevo punto cumpla las restricciones. Aplicando este método a la función  $A(P)$  la fórmula que se utiliza para calcular el siguiente punto es:

$$p_{new} = p_{old} + \alpha \text{Pr}(Grad(A(p_{old})))$$

donde  $\text{Pr}$  es el operador proyección,  $Grad$  es el gradiente y  $\alpha$  es el paso.

Así se hizo con el problema de las *n-reinas* ( $n < 50$ ), utilizando el algoritmo *del gradiente proyectado* y reinicializando si el máximo obtenido no era global. El algoritmo llegaba a un extremo en aproximadamente n iteraciones y necesitaba entre 2 y 4 reinicios para llegar a un extremo que fuera global. Los máximos locales a los que se llegaba tenían un número de conflictos bajo (1 ó 2 pares de reinas atacándose). Estos resultados parecen buenos, pero en realidad el cálculo del gradiente es demasiado costoso para competir con otros algoritmos que, si bien realizan más búsqueda para encontrar la solución, la encuentran antes debido a que buscan más rápido.

## Aspectos formales

A pesar de que el método anterior no resulta competitivo respecto a algoritmos de búsqueda sistemática, la interpretación de los CSP como funciones a optimizar puede ser todavía útil. Otra idea que hemos desarrollado ha sido incorporar información sobre la función  $A(P)$  en algoritmos de búsqueda sistemática. La idea es la siguiente: en un momento dado de la ejecución de un algoritmo de backtracking, generar un etiquetado que sea acorde con la instancia parcial hecha hasta ese momento y utilizar la información local de la función  $A(P)$  en ese punto para tomar las próximas decisiones en la búsqueda. De esta manera nos beneficiamos de la completitud de los algoritmos que efectúan una búsqueda sistemática en el espacio del problema, aprovechando la información obtenida de la interpretación del problema en términos de optimización para podar este espacio y para guiarnos hacia la solución.

Esta idea se ha desarrollado en un algoritmo de *forward-checking* de la siguiente manera [10]: en un estado de la búsqueda del algoritmo de forward-checking tenemos un conjunto de variables pasadas y un conjunto de variables futuras con su dominio podado dinámicamente. A partir de este estado generamos el etiquetado  $P$  de la siguiente manera: para variables pasadas asignamos peso 1 a la etiqueta del valor asignado y 0 para el resto; para variables futuras asignamos 0 a las etiquetas de valores no posibles y  $1/m_i$  a las posibles (siendo  $m_i$  el número de valores posibles para la variable futura  $X_i$ ). En otras palabras el etiquetado de las variables pasadas es no ambiguo y el de las futuras es ambiguo con una distribución de pesos uniforme entre sus valores posibles. Se puede ver que el gradiente de la función en  $P$  es  $Q(P)$  definido de la siguiente manera:

$$q_i[\lambda_k] = 2 \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m r_{ij}(\lambda_k, \lambda_l) p_j[\lambda_l]$$

En un algoritmo de forward-checking hay que tomar dos decisiones: cuál es la siguiente variable a asignar y en qué orden se consideran sus valores. Hemos visto que una estrategia que da buen resultado en la elección de variable es escoger aquella que anticipe los backtrackings (*fail first*). En términos de  $A(P)$ , seleccionar la variable que anticipe el backtracking quiere decir explorar primero el subespacio de  $K^*$  asociado a la variable que tenga direcciones de poco ascenso (es decir, que difícilmente conduzcan a un máximo). Siguiendo esta idea nuestra heurística escogerá la variable cuyo sumatorio de gradientes sea mínimo.

$$X_i \text{ tal que } \min \left\{ \sum_{l \in \text{feasible}} q_i[\lambda_l] \right\}$$

Para la selección de valor es fácil ver que una buena estrategia es considerar primero los valores que puedan llevarnos a una solución. En nuestro caso, estos serán los valores que tengan asociadas las direcciones de mayor ascenso. Es decir, escogeremos los valores en orden decreciente de gradiente.

Este algoritmo se ha probado en problemas difíciles de 3-Coloreado de grafos y en CSP aleatorios generados de forma que su dificultad fuese alta para todo tipo de algoritmos [2]. En ambos casos el número de backtrackings necesarios antes de encontrar la solución resultó ser muy inferior al que requerían las heurísticas que habían demostrado el mejor rendimiento en estos problemas. En un intento de disminuir el tiempo de CPU, se hicieron algunas aproximaciones que empeoraron la calidad de la búsqueda pero mejoraron el tiempo de cómputo global.

La misma idea se ha desarrollado para encontrar soluciones maximales en CSP sin solución [12]. En este caso el algoritmo de búsqueda sistemática que se utiliza es un *branch and bound*. El algoritmo se ha probado en CSP aleatorios difíciles y los resultados fueron aún mejores que en el caso anterior, con ahorros sustanciales en el tiempo de CPU respecto a otros algoritmos.

# Aspectes formals

## 6. Líneas abiertas

Las ideas presentadas en la sección anterior tienen una extensión inmediata a casos más generales de CSP, como por ejemplo:

- i) Restricciones no necesariamente binarias. De esta forma podríamos probar nuestras ideas en un amplio abanico de problemas clásicos de la IA que no pueden modelizarse como CSP binarios (por ejemplo SAT)
- ii) Restricciones con grado de preferencia: En muchos casos reales, cuando no es posible encontrar soluciones que satisfagan todas las restricciones, es posible que se tengan preferencias sobre qué restricciones se está dispuesto a incumplir.
- iii) Problemas dinámicos: hay situaciones en las que las restricciones pueden aparecer y desaparecer dinámicamente. Ante estos casos es posible tratar de *reparar* una antigua solución para obtener otra que se adapte a la situación actual (en nuestra aproximación esto es recuperar el máximo global ante modificaciones de la función).

Por otra parte, esta nueva interpretación de los CSP como funciones a optimizar nos permite considerar los siguientes problemas:

- i) Caracterizar la dificultad de los problemas en función de la topología de su función  $A(P)$  y aprovechar el estudio de esta función para desarrollar métodos más efectivos para su resolución.
- ii) Considerar nuevas funciones objetivo u otras fórmulas de relajación para realizar estudios similares.
- iii) Buscar alternativas al algoritmo del gradiente proyectado como métodos de optimización global. Se podrían utilizar métodos estocásticos (*i.e.* Simulated Annealing) para escapar de los extremos locales u otras técnicas especialmente diseñadas para optimizar este tipo de funciones

156

## 7. Bibliografía

- [1] MESEGUR P. *Constraint Satisfaction Problems: An Overview* AI Communications. Vol.2 N.1 (1989)
- [2] PROSSER P. *Binary constraint satisfaction problems: Some are harder than others* Proceedings of ECAI-94 (1994)
- [3] MINTON S., JOHNSTON M. D., PHILIPS A. B. AND LAIRD P. *MINIMIZING CONFLICTS: a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems* Artificial Intelligence, 58 (1992)
- [4] BINGER A., ASCHENMANN G., HOOS H.H., METZGER M. AND WEIS A. *GSAT versus Simulated Annealing* Proceedings of ECAI-94 (1994)
- [5] AARST E. AND KORST, J. *Simulated Annealing and Boltzmann Machines* John Wiley & Sons (1989)
- [6] GOLDBERG D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* Addison-Wesley Pub. Co. (1989)
- [7] HERTZ J., KROGH A. AND PALMER R. *Introduction to the theory of Neural Computation* Addison-Wesley Pub. Co. (1991)
- [8] TORRAS C. *Relaxation and neural learning: points of convergence and divergence* Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol 6 (1989)
- [9] HUMMEL R. AND ZUCKER S. W. *On the foundations of Relaxation Labeling Processes* IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, Vol 5 N.3 (1983)
- [10] MESEGUR P. AND LARROSA J. *Constraint Satisfaction as Global Optimization* Proceedings of IJCAI-95 (1995)
- [11] SASTRY P. S. AND THATHACHAR M. A. *Analysis of Stochastic Automata Algorithm for Relaxation Labeling* IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, Vol 16 N.5 (1994)
- [12] LARROSA J. AND MESEGUR P. *An Optimization-based Heuristic for Maximal Constraint Satisfaction* Proceedings of the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (1995)

# ASSOCIACIÓ CATALANA D'INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL

## Adhesió Particular

Nom:

Cognoms:

Afiliació:

Adreça:

Nº de Telèfon:

Nº de fax:

Adreça electrònica:

- Adhesió simple: ..... 5.000 Pts.  
 Adhesió estudiant: ..... 2.000 Pts.

## Adhesió Entitat

Organisme:

Nom del representant:

Cognoms:

Funció:

Adreça:

Nº de telèfon:

Nº de fax

Adreça electrònica:

- Adhesió: ..... 20.000 Pts.

## Presentat pels socis

Nom soci 1:

Signatura:

Nom soci 2:

Signatura:

- Accepto que les meves dades apareguin en el butlletí de l'ACIA  
 Accepto que les meves dades siguin comunicades a l'ECCAI per a la constitució d'una base de dades europea d'Intel·ligència Artificial.  
 M'oquivo a qualsevol difusió de les meves dades personals.

Enviar aquest full a: Miquel Sànchez, Tresorer de l'ACIA, LSI, UPC, Pau Gargallo, 5. 08028 Barcelona,  
Tf.: (93) 401 7334, Fax.: (93) 401 7014.

### Dades bancàries

Autoritzo l'Associació Catalana d'Intel·ligència Artificial a presentar rebuls amb càrrec al meu compte bancari.

Banc/Caixa:

Adreça:

Entitat:

Oficina:

Codi control:

N Compte:

Signatura: