

El suport informàtic en els robots industrials

Si hi ha un símbol *visible* de l'etapa tecnològica que neix en el present són els robots. Tots els gèneres literaris d'anticipació han especulat sobre les seves característiques i les seves possi-

bilitats: cinema, còmics, literatura de ciència-ficció, etc. Hem de conèixer, però, que els robots són ja una realitat aplicada a algun sector de la producció industrial i, també, els plantejaments

científics que faran realitat alguns dels somnis que la humanitat ha anat generant, encara que els termes concrets d'aquestes realitzacions decebin uns o meravellin d'altres...

En els darrers anys el nivell de presencions dels robots industrials, i per tant el seu nivell de complexitat, s'ha anat incrementant paral·lelament als avenços de l'automàtica i la informàtica. Els antecedents dels actuals robots són els telemanipuladors, elements que transmetien a certa distància o amplificaven els moviments efectuats manualment lluny del medi aders de treball (fig. 1). El nivell d'intel·ligència d'aquests telemanipuladors és evidentment el de l'operador. Quan en aquests dispositius mecànics es va poder afegir un computador (a partir de 1966), el manipulador va poder realitzar tasques repetitives prèviament programades. Les primeres aplicacions dels robots a la indústria es varen donar en el camp de la fabricació de l'automòbil, en soldadura per punts i en pintura, en què la precisió de posicionament no és necessari que arribi a ser de l'ordre d'un mm.

Per aconseguir realitzar altres tasques en què calgui una més gran precisió, com són la manipulació, la mecanització o fins el muntatge (fig. 2), ha estat necessari no sols un perfeccionament dels elements mecànics estructurals, sinó també augmentar la capacitat de la unitat de control —el computador— i augmentar la seva eficiència, desenvolupant llenguatges de programació, implementant millor tècniques de control i utilitzant els avenços de la intel·ligència artificial.

Diverses generacions de robots

Aquesta evolució experimentada pels robots fa que puguin considerar-se diverses "generacions". Una primera és la de robots sense capacitat sensorial *programats* per treballar punt a punt de forma repetitiva, sense cap possibilitat

d'adaptació a variacions del seu entorn. Aquests robots de primera generació són els de la dècada del 70 al 80 i constitueixen la quasi totalitat dels actualment en funcionament.

Una segona generació de robots s'esdevé en incorporar la capacitat sensorial, principalment la visió i el tacte, i els llenguatges d'alt nivell, com l'AL o el VAL. Aquests robots, que són una part dels actuals, poden ja buscar i triar els objectes sense haver d'estar necessàriament en llocs i posicions determinades, possibiliten la correcció de moviments que permet realitzar operacions de muntatge (insercions) amb toleràncies mínimes i, el que també és important, permeten programar-los amb més facilitat. Entre els robots de primera i segona generació, pot considerar-se una categoria intermèdia, que hi ha qui anomena generació 1.5 perquè ja incorporen certes capacitats sensorials de més baix ni-

Fig. 1: Telemanipulador

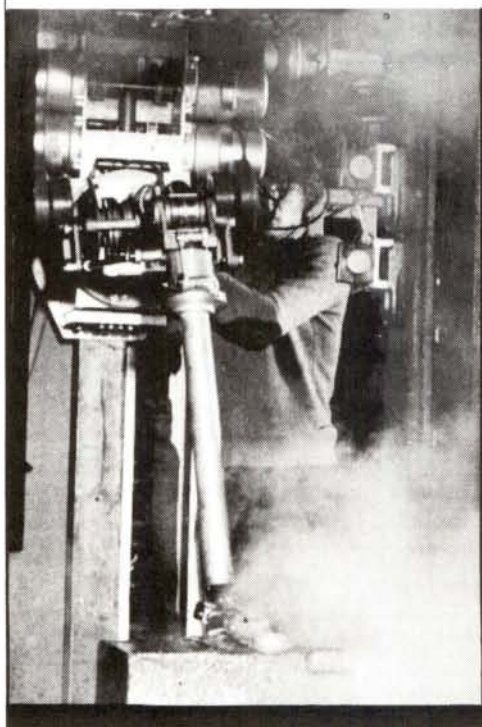
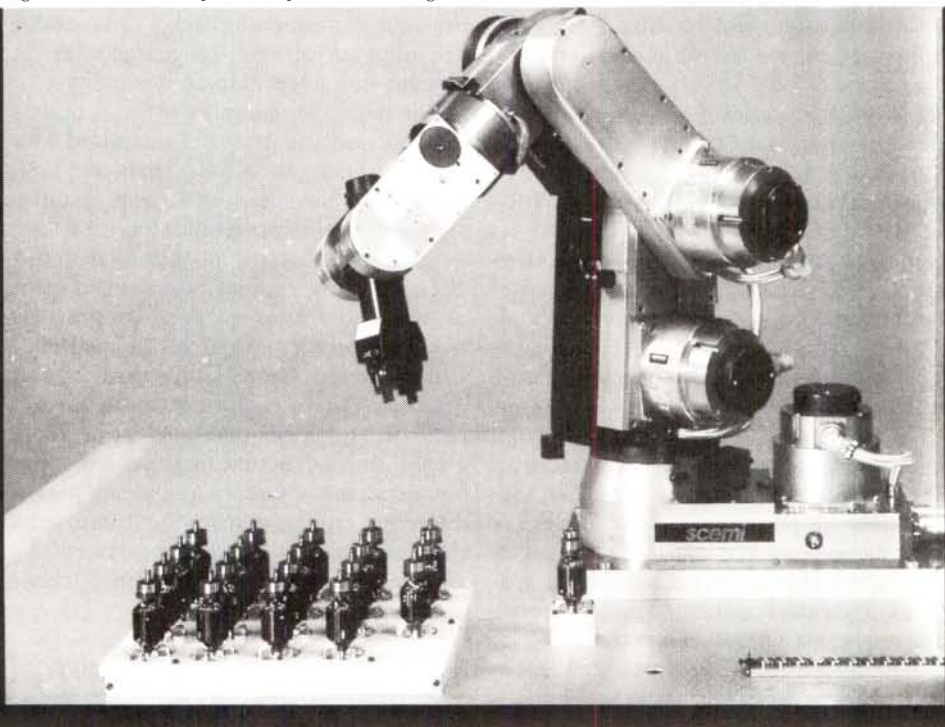
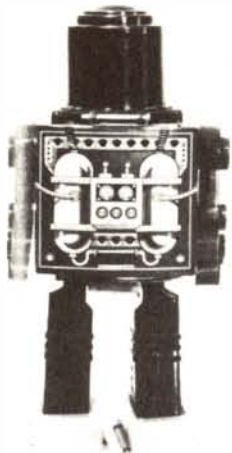


Fig. 2: Robot d'elevada precisió d'aplicació al muntatge





per Josep Amat i Girbau

Josep Amat i Girbau (Barcelona 1940), és enginyer industrial per l'ETSEIB (1967) i doctor l'any 1977. Ha estat professor d'electrònica a l'Escola d'Enginyers Industrials de Barcelona des de 1969 a 1978.

És col·laborador de l'Institut de Cibernètica i des del 1978 és director del departament de tecnologia de computadors de la Facultat d'Informàtica de Barcelona.

vell, com pot ser la detecció de presència o la mesura de forces, el que permet una certa adaptació a determinades variacions de l'entorn. En estar també ja dotats de capacitat de programació de trajectòries, els permet realitzar tasques més complexes.

Els robots de tercera generació seran els dotats de percepció multisensorial i elevat nivell d'intel·ligència, capaços de generar-se ells mateixos el pla de treball a partir d'instruccions més àmplies i podran estar dotats de mobilitat. Aquesta nova generació és encara en fase d'investigació, especialment als EUA, al Japó, a França, a l'URSS, a Gran Bretanya, ... i es basa especialment tant en els avenços de la microelectrònica i els microcomputadors (que constitueixen la unitat de control), com el de la informàtica en el sentit més ampli, comprnent els algorismes de control dels moviments, la interpretació de les dades ob-

tingudes dels sistemes de percepció, els llenguatges d'alt nivell que permetin programar fàcilment la tasca a realitzar i la intel·ligència artificial que permeti enfrontar les situacions imprevistes i prendre les decisions més adequades.

En els propers anys es preveu un gran desenvolupament d'aquestes tècniques informàtiques aplicades a la robòtica (especialitat que podria anomenar-se "robomàtica" amb el mateix criteri que s'ha adoptat la "telemàtica"), fruit dels esforços de recerca que s'estan duent a terme.

Control de moviments i trajectòries

Els sistemes utilitzats en el comandament dels moviments dels robots han anat evolucionant per aconseguir una millor precisió i una millor resposta dinàmica a mesura que s'han pogut anar

utilitzant les tècniques digitals de control.

La dificultat en el control de l'estructura d'un robot, per realitzar les trajectòries programades amb velocitat i precisió, és deguda fonamentalment a dues raons: Una és la modificació de la geometria al llarg d'una trajectòria que pot produir grans modificacions dels moments d'inèrcia, el que dificulta l'assoliment d'un control òptim. Un segon aspecte és la complexitat dels algorismes de càlcul dels moviments a efectuar per cada element del sistema articulat, moltes vegades acoblats cinemàticament entre si, per aconseguir que a la fi de la cadena, la grapa segueixi la trajectòria a l'espai desitjada. El temps de càlcul necessari condiona també notablement les possibilitats d'optimització del comportament dinàmic del robot.

En un primer nivell de complexitat es troben els clàssics reguladors analògics utilitzats en els robots de primera generació, en què el regulador varia la velocitat del motor en funció d'una consigna elaborada per la unitat de control (fig. 3), en funció de l'error de posició observat, i regula la potència aplicada al motor mitjançant dos anells analògics de realimentació externs a la unitat de control, el de velocitat i el de potència subministrada. Aquesta estructura té l'avantatge de la poca complexitat, però per contra té l'inconvenient que els paràmetres de la regulació de potència en aquests sistemes són fixos. Això fa que en haver d'assegurar l'estabilitat en "qualsevol condició de càrrega", el sistema no pugui ser òptim ni en precisió ni en temps de resposta.

Actualment, en no ser ja prohibitiva la utilització de diversos microprocessadors en una mateixa unitat de control, pot realitzar-se una realimentació totalment digital. En aquest cas un microprocessador genera el senyal de control del motor per aconseguir en cada moment se-

Fig. 3: Esquema clàssic del control d'un motor en un robot

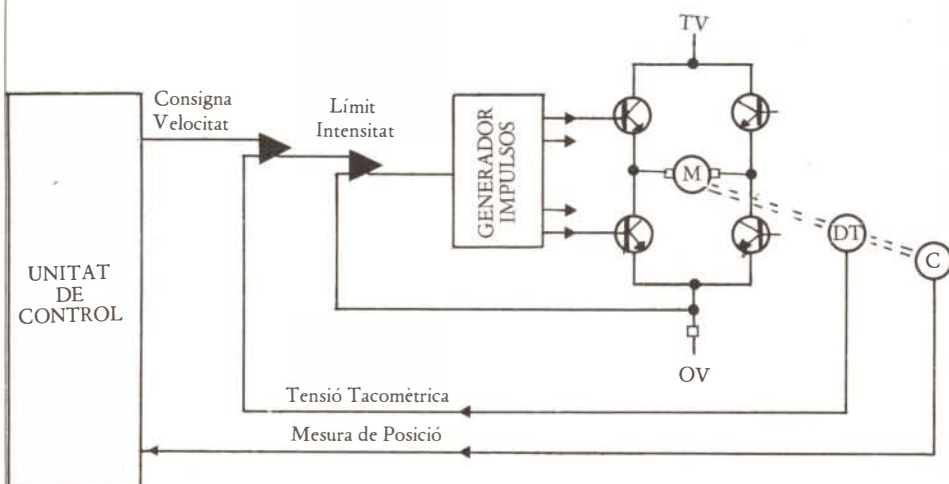


Fig. 4: Control digital mitjançant un sistema multimicro-computador

guir la trajectòria prefixada, en funció de la informació obtinguda del sensor d'intensitat i del transductor de posició, el que permet també calcular en cada moment els paràmetres propis de cada situació. És fins i tot freqüent que un microprocessador estigui dedicat exclusivament al control del moviment d'un eix i a calcular també els paràmetres de regulació més adequats en les condicions de treball al llarg de tota la trajectòria (control adaptatiu), aconseguint així un mínim error i un millor comportament dinàmic.

Molts dels actuals robots posseeixen, doncs, una unitat de control constituïda per un sistema multimicroprocessador (fig. 4), estructurada entorn d'un processador que coordina el conjunt dels moviments i executa el programa enregistrat.

L'augment del nivell d'intel·ligència del robot s'assolirà afegint altres microprocessadors especialitzats i destinats, per exemple, a altres sistemes de percepció, en el càlcul i correcció d'errors, o en l'obtenció del model de l'entorn i planificació dels moviments.

La percepció sensorial

Els robots sense capacitats sensorials només poden realitzar tasques repetitives en entorns sense possibilitats de variació i amb l'ajut de posicionadors externs dels elements que haurà de manipular. Per poder acceptar determinades variacions de l'entorn o per realitzar tasques més complexes, ha calgut proveir els robots d'una certa capacitat d'adquirir informació externa, per localitzar objectes que apareixen en posició i orientació variables, reconèixer-los, classificar-los, o detectar i poder salvar obstacles, per exemple. Aquesta capacitat de percepció, pot anar

des de disposar de detectors de presència i proximitat, o detectors de força, fins a sistemes de percepció tàctil i sistemes de percepció visual capaços de subministrar molta més informació sobre l'entorn. Actualment ja s'han desenvolupat sistemes de percepció tàctil miniaturitzats, capaços de ser utilitzats a la mateixa pinça del robot per detectar la presència i forma de l'objecte manipulat i sistemes de percepció visual de gran resolució, basats en la utilització de càmeres de TV. Però els sistemes de percepció visual realitzats fins ara no han arribat a assolir el nivell d'eficàcia que seria de desitjar, -atesa la complexitat del procés d'interpretació de les imatges captades. Els sistemes de percepció, especialment els visuals, requereixen un notable suport informàtic per poder destriar la informació útil sobre l'entorn que cal a la unitat de control per generar les trajectòries més adequades per a la realització d'una tasca.

Els ultrasons són una altra de les tècniques emprades a dotar de capacitat sensorial els robots, però la seva utilització actualment queda limitada a la detecció d'obstacles per evitar col·lisions o accidents.

La percepció tàctil

En el camp de la robòtica hi ha una certa tendència a l'antropomor-

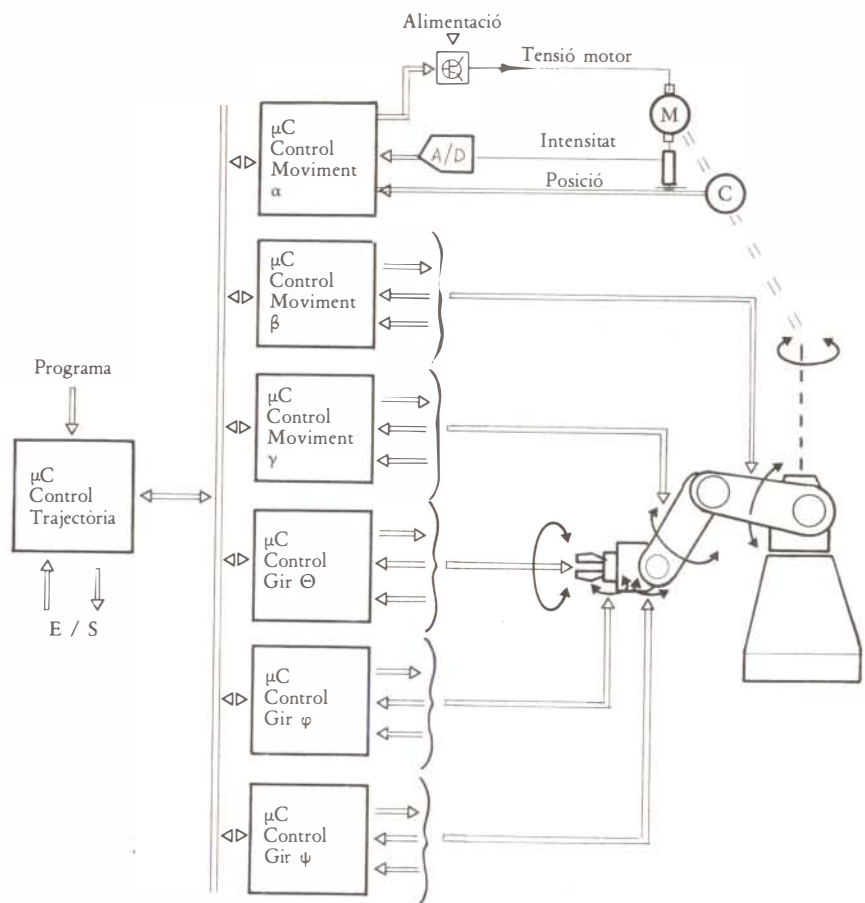
fisme, tant en el disseny de les estructures, com en els termes utilitzats. Així, l'estructura mecànica s'anomena braços, els punts d'enllaç, colzes -excepte l'últim, que s'anomena puny- i les pinces, dits. No és estrany, doncs, que la capacitat de mesurar la força efectuada sobre una peça en diferents punts per l'òrgan d'aprehensió utilitzat s'anomeni percepció tàctil, i fins i tot l'element sensible format pel conjunt de captadors, pell artificial.

Una de les primeres pells artificials va ser desenvolupada al L.A.A.S. de Tolosa i es basa en la utilització d'un suport rígid (circuit imprès) que conté un conjunt d'electrodes, sobre el qual es disposa un material elàstic, cautxú per exemple, en què s'ha afegit pols conductora de manera que la resistència puntual obtinguda sigui funció de la pressió suportada (Fig. 5). Per poder mesurar cada resistència delimitada pels electrodes de la placa suport, es metalitza la capa protectora superior, constituint l'altre electrode comú.

Les resistències de cada cèl·lula són mesurades mitjançant un circuit multiplexor, que permet d'obtenir un senyal corresponent al valor de la pressió de cada punt de la matriu sensible continguda sota la pell artificial.

A partir d'aquest senyal es pot extreure tres nivells d'informació:

- Una mesura de la força de retenció efectuada;
- Una informació sobre la forma de l'ob-



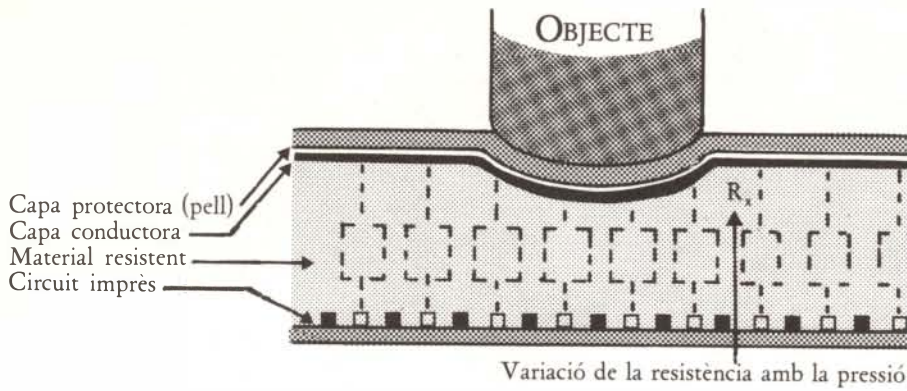
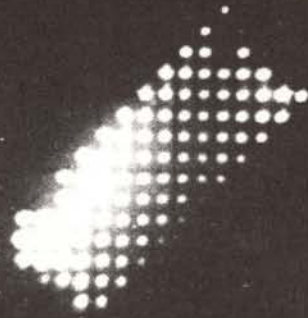


Fig. 6: Empremses obtingudes a partir d'un sensor tàctil instal·lat en unes pinces, quan agafa un objecte correctament (a), o defectuosament (b).



jecte a partir de l'empremta produïda; -La posició dins les pinces de l'objecte retingut.

A partir d'aquesta informació el robot pot millorar notablement la seva eficiència, ja que la unitat de control podrà saber si ha aconseguit retenir un objecte, la qual cosa estalviarà la realització de cicles en buit en cas d'interrupcions al sistema d'alimentació de peces. Podrà distingir entre peces de dos o més tipus diferents, el que permetrà seleccionar-les. Podrà conèixer la posició de l'objecte retingut (Fig. 6), el que permet rectificar les aprehensions incorrectes, o incrementar la força de retenció en cas d'esmunyir-se l'objecte dels dits que el contenen.

La possibilitat d'incorporació de percepció tàctil als robots serà facilitada per la utilització de circuits integrats VLSI/MOS que incorporen una matriu sensible, d'elevada resolució, actualment ja en procés de desenvolupament.

La percepció visual

La utilització de la percepció visual en robòtica permet d'adquirir infor-

mació d'un ampli entorn amb l'avançatge d'utilitzar un sensor remot, i per tant sense contacte físic amb els elements de l'entorn.

Per a l'obtenció de les imatges s'utilitzen generalment càmeres de TV, llevat d'alguns casos en què s'utilitzen càmeres lineals, és a dir, sensors formats per una sola filera d'elements fotosensibles. Les càmeres de TV utilitzades en robòtica són encara en B/N i de característiques semblants a les convencionals, però de tecnologia d'estat sòlid, més miniaturitzades i de vida pràcticament il·limitada. El senyal obtingut de la càmera, després de digitalitzar és processat en un sistema dissenyant del tot o en part específicament per a aquesta finalitat, i la informació sobre el tipus i posició dels objectes és donada al computador que realitza les funcions bàsiques de control.

Els sistemes de visió realitzats fins ara no han arribat a assolir els nivells d'eficiència que els faci aptes per a qualsevol aplicació. Actualment només són disponibles sistemes d'utilització limitats al reconeixement d'objectes sobre el pla i sense superposicions, prou diferenciats i amb bones condicions d'il·luminació. Això resulta de la dificultat d'interpreta-

ció de l'escena captada. En primer lloc és necessari destriar la falsa informació obtinguda deguda principalment a les ombres, problema que es procura minimitzar utilitzant sistemes d'il·luminació adequats. En segon lloc, la informació obtinguda és molt parcial, ja que normalment es prescindeix del color i del relleu, la qual cosa elimina molta informació útil. Si considerem ara que una imatge de TV consta de 600 línies, i si de cada línia s'obtenen 512 punts, representa un volum d'informació de 307.200 paraules. Per tenir en memòria aquest elevat volum d'informació seria necessari un computador de gran capacitat, però a més el temps de processat d'aquesta informació seria excessiu. Es per això que cal disposar de processadors ràpids especialitzats, capaços de separar la imatge de l'objecte observat del fons, i condensar la informació resultant a un mínim que permeti reconèixer els objectes i determinar la seva posició i orientació, en un temps molt més curt (fig. 7). La condensació de la informació consisteix bàsicament en una disminució del nombre de punts considerats de cada imatge, i en la intensificació de contrastos que permeti obtenir les arestes i contorns. Aquesta operació no pot ser realitzada per anàlisi punt a punt de la imatge digitalitzada, sinó que cal una anàlisi per zones més àmplies i a vegades una contínua comparació amb les formes més significatives dels models prèviament memoritzats durant la fase d'aprenentatge. Obtinguts aquests punts, el processador pot extrapolar les arestes detectades fins a configurar tot l'objecte visualitzat, encara que amb les condicions d'il·luminació existents no s'hagi pogut detectar inicialment tots aquests punts (Fig. 8).

També estan en fase de desenvolupament sistemes de percepció visuals tridimensionals. Uns es basen en la utilització de sistemes de temesura, punt a

Fig. 7: Perfil reconstruït d'una imatge.



punt, que proporcionen una bona precisió, però resulten excessivament lents si es desitja obtenir un nombre elevat de punts. Altres es basen en l'anàlisi dels nivells de grisos d'una imatge plana obtinguda mitjançant una càmera de TV convencional, el que permet apreciar qualitativament formes tridimensionals de les superfícies i deduir la seva posició relativa a l'espai, però no permet, en canvi, obtenir informació quantitativa. Un altre dels sistemes de percepció tridimensional es basa en l'anàlisi de les imatges obtingudes d'escenes il·luminades amb sistemes especials d'il·luminació, com poden ser franges lluminoses o quadrícules (Fig. 9), el que permet apreciar i fins i tot mesurar l'alçada dels objectes sobre el pla de referència.

Finalment, també són objecte d'experimentació els sistemes estereoscòpics de visió, a partir de dues càmeres de TV. El càlcul de la profunditat és un problema geomètric senzill a partir de punts homòlegs de les dues imatges, en canvi no resulta senzill localitzar els punts homòlegs de les dues imatges. Per facilitar-ho són utilitzades fonts puntuals d'il·luminació.

Llenguatges de programació

La programació de les tasques a realitzar és un dels aspectes de la informàtica aplicada a la robòtica en forta evolució, tenint com a objectiu fonamental aconseguir llenguatges de més alt nivell que permetin facilitar les operacions de programació i que aquestes puguin ser realitzades per personal menys qualificat.

La programació dels robots pot ser realitzada per diàleg entre la unitat de control del robot i l'operador, a través de la consola de programació, o pot ser gestual, utilitzant dispositius de telecoman-

dament manual per generar les trajectòries desitjades.

Per realitzar aquestes tasques són necessaris llenguatges d'alt nivell, ja siguin d'aplicació general ampliat amb instruccions específiques adequades, com poden ser els basats en el Basic, o desenvolupats directament per aplicació en robòtica.

L'aspecte de la programació és tractat de forma més àmplia en un altre treball d'aquest mateix número.

La intel·ligència artificial

Perquè un robot pugui millorar les prestacions d'una màquina automàtica de funcionament seqüencial no és suficient que sigui fàcilment programable, cal que tingui, a més, un cert grau d'intel·ligència. Aquest grau d'intel·ligència es pot avaluar per la capacitat de realitzar les funcions següents:

- generar plans d'acció per assolir uns objectius prefixats;
- comparar diferents plans d'acció i deci-

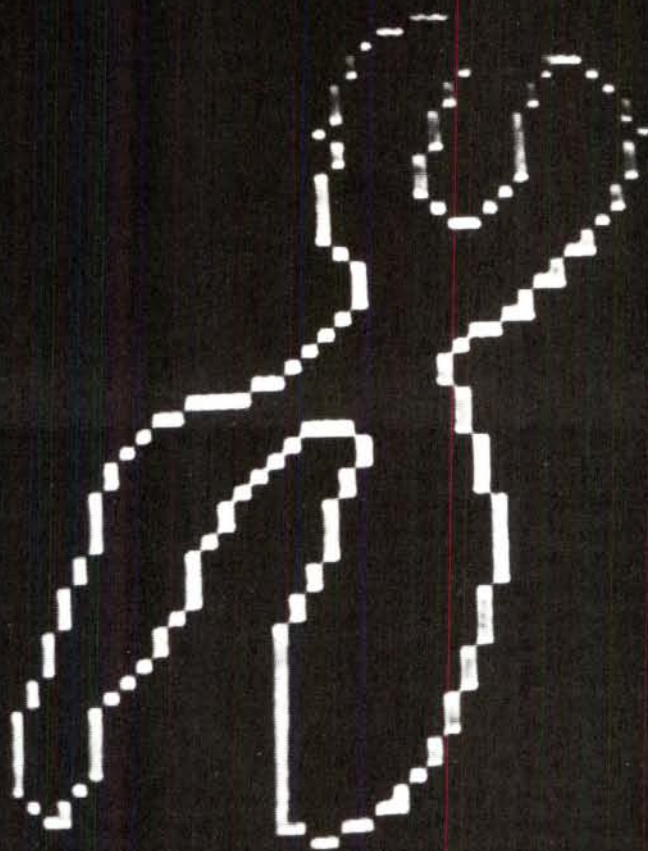
dir-se pel que resulti òptim;

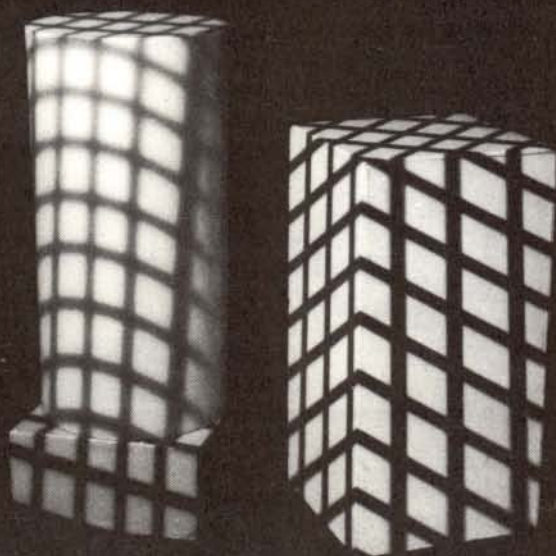
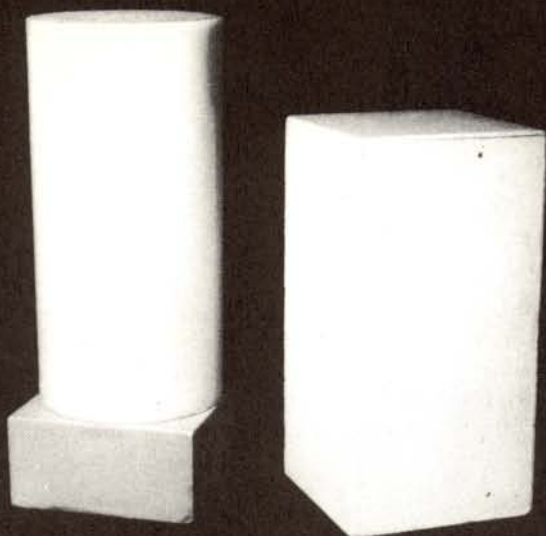
-capacitat d'aprenentatge, per millorar la seva estratègia en funció dels resultats obtinguts;

-capacitat d'enfrontar situacions imprevistes.

Per poder realitzar en més o menys grau aquestes funcions cal en primer lloc disposar de l'equip electrònic que li proporcionen les dades sobre el seu entorn, com pot ser un sistema de visió, però ha de complementar-se amb l'equip informàtic que li permeti interpretar aquestes dades, generar un model de l'entorn, que juntament amb el model disponible del mateix robot permet de generar els plans d'acció, i implementar els algorismes de control i aprenentatge. Els baixos nivells d'intel·ligència dels robots actuals es deuen al cost dels mitjans informàtics que són necessaris per realitzar aquestes funcions i als excessivament llargs temps de càlcul que actualment s'aconsegueixen, que fan difícil encara la seva aplicació industrial.

Per generar els plans d'acció, el primer que cal és disposar d'un model de l'entorn i una forma de representar-lo.





Aquesta representació pot ser feta mitjançant un fitxer de cada objecte detectat sobre l'escena que contingui: tipus d'objecte, posició i orientació sobre el pla de treball, i posició relativa respecte d'altres objectes (ja que pot obstaculitzar o estar obstaculitzat).

El problema de la generació de plans consisteix en la recerca de totes les seqüències d'accions i trajectòries possibles (estratègies) que aconseguen la realització d'una tasca prefixada, ja que normalment la solució no és única, i elegir la de cost mínim utilitzant les tècniques de grafos. La funció cost en robòtica és normalment el temps d'execució d'una operació.

El temps de càlcul del camí òptim en un grafo podrà no ser crític si el treball a realitzar posteriorment és repetitiu, però sí que ho serà si ha de poder enfrontar situacions imprevisibles, el que l'obligarà a recalcular un camí òptim a partir d'un punt intermedi de l'arbre d'accions que constitueixen una tasca, en el moment en què es produeix un canvi de situació de l'entorn. Aquest temps de reacció davant d'un imprevist podrà reduir-se

mitjançant estratègies subòptimes, com poden ser restringir les solucions a un conjunt elegit heurísticament i fer ús de les d'aprenentatge.

La capacitat d'aprenentatge ve donada per la possibilitat de memorització dels camins que condueixen a situacions sense sortida en el càlcul d'estratègies d'actuació davant de situacions imprevisibles, la qual cosa farà que no siguin ja considerades en un futur. Per aprenentatge també es podrà aconseguir el canvi d'estratègia si es produeixen determinades freqüències d'errors o d'incidències, ja que pot donar-se que una estratègia no òptima en temps d'execució sense errors esdevingui en temps mitjana millor que l'òptima amb un nivell d'errors determinat.

El futur

És fàcilment previsible que el progrés iniciat en el camí de la robòtica, especialment motivat pels avenços de la microelectrònica i la informàtica, no sols



Fig. 8: Aspecte d'una escena il·luminada amb llum estructurada per obtenir informació tridimensional.

segueixi el ritme actual, sinó que en un futur molt pròxim pugui fer passos cada vegada més llargs.

Aquestes millores provindrien dels avenços fets tant en aspectes *hardware*, com de *software*, que convergiran en la millora de: sistemes de percepció, mobilitat, anàlisi de l'entorn, comunicacions amb l'entorn, control de l'acció, capacitat d'aprenentatge i correcció d'errors.

Per aconseguir-ho, els països més avançats concentren en aquest camp esforços i recursos molt apreciables, essent també motiu de recerca des de ja fa alguns anys a la Universitat Politècnica de Barcelona en centres com l'Institut de Cibernètica i la Facultat d'Informàtica.

La inexorable implantació dels robots i la informàtica en els processos productius produirà una necessària readaptació de moltes indústries, actualment amb *sistemes rígids de fabricació*, és a dir, d'elevat cost i dificultat per efectuar canvis en el producte a fabricar, per sistemes de *fabricació flexible*, és a dir, amb automatització completa i utilització de robots i amb control global per computador, la qual cosa permet fàcilment introduir canvis en els objectes a fabricar, modificar els ritmes de producció o fins i tot utilitzar una mateixa instal·lació per a la fabricació alternada o simultània d'una certa gamma de productes.

Cal esperar que aquesta evolució sigui, en definitiva, per a la millora de les condicions de vida de l'home.

Josep Amat

Material de lectura

"Revista de Robòtica. Tecnología y aplicaciones de los Robots Industriales". Trimestral.
 Revista: "Robotics Research". Trimestral.
 "Los Robots Industriales". J.F. Engelberger
 "Robòtica Industrial". G. Ferratè i altres autors.
 Ed. Boixareu.