

Els robots industrials (I)

Característiques

Carles Riba i Romeva

**Professor del
Departament d'Enginyeria Mecànica
ETSEIB - UPC**

Desembre de 1992

ÍNDIX

Presentació

1 Introducció

- 1.1 El concepte de robot industrial
- 1.2 El robot industrial i el seu entorn
- 1.3 Robòtica industrial i automatització
- 1.4 Evolució històrica

2 Estructura mecànica

- 2.1 Referència d'un cos a l'espai: posa
- 2.2 Elements i articulacions
- 2.3 Estructura articulada
- 2.4 Mobilitat i redundància
- 2.5 Accionaments

3. Característiques i prestacions

- 3.1 Sistemes de coordenades
- 3.2 Espai de treball i accessibilitat
- 3.3 Càrrega nominal i càrrega límit
- 3.4 Repetibilitat i precisió
- 3.5 Velocitat i acceleració
- 3.6 Programació i control

Bibliografia

Presentació

L'obra que teniu a les mans té l'origen en uns apunts destinats a diverses lliçons impartides per l'autor sobre robòtica, que sovint han constituït les primeres sessions de cursos més extensos.

Aquesta activitat docent s'ha emmarcat fonamentalment en els cursos impulsats per l'Asociación Española de Robótica (AER) i en els màsters compartits entre la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i l'Institut Català de Tecnologia (ICT).

De l'experiència, l'autor n'ha extret una doble constatació: 1a) la conveniència d'introduir el concepte de robot industrial, les seves parts i les seves característiques, atesa la diversitat de procedències curriculars de les persones interessades per aquesta matèria; i 2a) l'interès prioritari de moltes d'aquestes persones per temes relacionats amb les aplicacions dels robots industrials.

Els apunts originaris, doncs, han estat reforçats, d'una banda, en el sentit d'enllaçar els conceptes bàsics de la ciència robòtica a les característiques i prestacions enunciades pels fabricants i, de l'altra banda, en l'aproximació d'aquestes característiques i prestacions a les solucions adoptades pels enginyers en la seva aplicació.

Això ha fet inclinar l'autor vers el contingut actual dels dos volums, *Els robots industrials. Característiques i Els robots industrials. Aplicacions*", que formen una mateixa obra, de la qual aquest text n'és la primera part.

1 Introducció

1.1 El concepte de robot industrial

Robot industrial

No a tot arreu s'entén el mateix per *robot industrial*, fet que dificulta l'establiment de classificacions, les recollides de dades i els estudis comparatius. La creació de la International Federation of Robotics (IFR) ha forçat a establir acords sobre terminologia, conceptes i definicions, amb l'objectiu de facilitar el diàleg entre diferents països i la recollida de dades més o menys coherents dins l'àmbit mundial. Això ha estat l'objecte de diferents treballs normatius, entre els quals destaca l'informe tècnic ISO/TR 8373, de 1988, sobre terminologia i definicions.

A continuació es comenten les definicions de *robot industrial* adoptades per alguns dels països més desenvolupats, així com la solució adoptada per l'organització internacional de normalització ISO.

a) La definició de RIA (EUA)

La més clàssica de les definicions és l'adoptada per l'associació dels EUA, Robot Industry Association (RIA), que estableix:

"Un *robot industrial* és un manipulador reprogramable multi-funcional dissenyat per moure peces, eines o dispositius especials mitjançant moviments variats, programats per a l'execució de tasques diverses"

b) Les definicions d'AFNOR (França)

Més explicativa és la definició adoptada el 1983 a França per l'organització francesa de normalització, AFNOR, que fa una distinció entre *manipulador* i *robot industrial*:

"Un *manipulador* és un mecanisme compost generalment per elements en sèrie, articulats o lliscants entre ells, l'objectiu del qual és la premsió i el desplaçament d'objectes seguint diversos graus de llibertat. És multifuncional i pot ser comandat directament per un operador humà o per qualsevol sistema lògic (llevés, lògica pneumàtica, lògica elèctrica cablada, o bé programada).

Un *robot industrial* és un manipulador automàtic, amb servosistemes de posició, reprogramable, polivalent, capaç de posicionar i orientar materials, peces, eines o dispositius especials al llarg de moviments variables i programables per a l'execució de tasques variades.

Sovint es presenta sota la forma d'un o diversos braços acabats en un puny. La seva unitat de control utilitza, essencialment, un dispositiu de memòria i, eventualment de percepció i adaptació a l'entorn i a les circumstàncies.

Aquestes màquines polivalents són generalment concebudes per a efectuar la mateixa funció de forma cíclica i poden ser adaptades a d'altres funcions sense modificació permanent del material".

c) Les definicions de les JIS (Japó)

La definició i classificació de robots industrials segons la norma japonesa (JIS, Japanese Industrial Standard) B-134-1986, revisada el maig de 1987, inclou els cinc tipus que es descriuen a continuació, funció de les característiques i complexitat del seu sistema de control i programació:

- 1 *Telerobot*. Robot, directament governat per un operador humà, que pot realitzar en part o totalment una tasca.

- 2 *Robot de seqüència.* Robot que opera seqüencialment d'acord amb la informació de cada moment (seqüència, condicions i posició). Aquest segon grup presenta una subdivisió en: *Robot de seqüència fixa* i *Robot de seqüència variable*.
- 3 *Robot de guiatge.* Robot que és capaç de reproduir una operació, que es basa en el guiatge previ per un operador humà que fa referència a la seqüència, les condicions, posició i altres informacions corresponents al moviment del robot.
- 4 *Robot controlat numèricament.* Robot que pot executar una operació comandada d'acord amb la informació sobre la seqüència, condicions i posicions, introduïda de forma numèrica, o per un programa, sense realitzar els moviments.
- 5 *Robot intel·ligent.* Robot que pot determinar les seves mateixes accions per mitjà de la intel·ligència artificial. Aquest darrer grup presenta una subdivisió en *robot controlat per sensors*, *robot amb control adaptatiu* i *robot amb control d'aprenentatge*.

Tot i que a Europa i a EUA s'adopta un concepte més restringit de robot industrial (definicions 3, 4 i 5 de la JIS), aquest fet no treu el lideratge mundial del Japó en aquesta activitat, ja que més del 80% dels nous robots industrial instal·lats en aquell país en els darrers anys corresponen a aquests tres darrers tipus.

d) La definició d'ISO

A l'informe tècnic ISO/TR 8373 (inicialment en anglès i francès) elaborat pel subcomitè tècnic ISO/TC 1984/SC2 el 1988 sobre vocabulari i definicions, i del qual l'Asociación Española de Robótica (AER) va promoure les versions castellana i catalana, s'estableixen les definicions següents sobre manipulador i robot industrial:

"Manipulador. Màquina, amb el mecanisme compost generalment per una sèrie de segments, articulats o lliscants un respecte a l'altre, que té per finalitat la premsió i/o el desplaça-

ment d'objectes (peces o eines), generalment, segons diversos graus de llibertat. Pot ser controlat per un operador, un autòmat programable o qualsevol sistema lògic (per exemple, un sistema de lleves, lògica cablada, etc.).

Manipulador de seqüència fixa. Manipulador que efectua cada etapa d'una operació concreta segons un esquema de moviments predeterminat, que no pot ser canviat sense modificació física.

Robot manipulador industrial. Manipulador de diversos graus de llibertat, controlat automàticament, reprogramable i multifuncional, mòbil o no, destinat a ser utilitzat en aplicacions d'automatització industrial.

Reprogramable: els moviments programats o les funcions auxiliars del qual poder ser canviades sense modificació física.

Multifuncional: pot ser adaptat a una aplicació diferent sense modificació física.

Modificació física significa modificació de l'estructura mecànica o del sistema de control, amb l'excepció del canvi de *cassette*, de memòria ROM, etc.

Per tant, la distinció que l'informe d'ISO estableix entre els conceptes de *manipulador* i de *robot industrial* passa per la combinació dels conceptes de *reprogramable* i *multifuncional*, que es combinen en la *no modificació física* de l'estructura mecànica ni del sistema de control.

Dit en altres paraules, el *manipulador* és una màquina que entraria dintre de l'*automatització rígida*, mentre que el *robot industrial* entraria en l'*automatització programable* i derivades.

Parts del robot industrial

En el robot industrial es poden distingir dues parts molt diferenciades que, generalment, constitueixen unitats físiques separades. Aquestes són:

a) Estructura mecànica.

L'*estructura mecànica* (Fig. 1.1) és el que en termes col·loquials es designa per *braç*, o també per *manipulador*, i està formada per l'*estructura articulada* (elements i articulacions) i la part dels *accionaments* físicament lligada a l'estructura articulada (motors, transmissions, i sensors de posició i velocitat; no inclou, però, el sistema de control dels motors).

S'ha acordat definir les delimitacions següents de l'*estructura mecànica*: la *interfície mecànica de la base* (Fig. 1.1), superfície materialitzada sobre la base del robot industrial, i que en delimita l'estructura mecànica respecte a l'element sobre el qual es fixa; i la *interfície mecànica del puny* (Fig. 1.1), superfície materialitzada sobre el darrer element del robot industrial (en el puny), i que en delimita l'estructura mecànica respecte al *terminal*. Alhora, aquestes dues superfícies presenten dispositius de fixació.

Per tant, l'*estructura mecànica* exclou tant una possible *base mòbil*, com el *terminal*.

b) Sistema de control

El *sistema de control*, que generalment s'agrupa físicament en una *unitat de control* (Fig. 1.1), conté el conjunt de dispositius electrònics i informàtics que realitzen les funcions de control i d'execució de les tasques encomanades al *robot industrial* i al *sistema robòtic*.

En general s'organitza de forma jeràrquica, i inclou des dels nivells més bàsics, com ara el control dels *accionaments* i la coordinació de moviments per generar trajectòries, fins a nivells de complexitat molt més gran en què, a partir d'una informació inicial i de sistemes de percepció, coordina les tasques, i fins i tot és capaç de generar-les.

Jugant amb un símil antropomòrfic, es pot establir que l'*estructura articulada* és l'"esquelet" del robot industrial, que els *accionaments* (la part lligada a l'estructura articulada) és la "musculatura", i que el *sistema de control* és el "sistema nerviós" i el "cervell" del robot industrial.

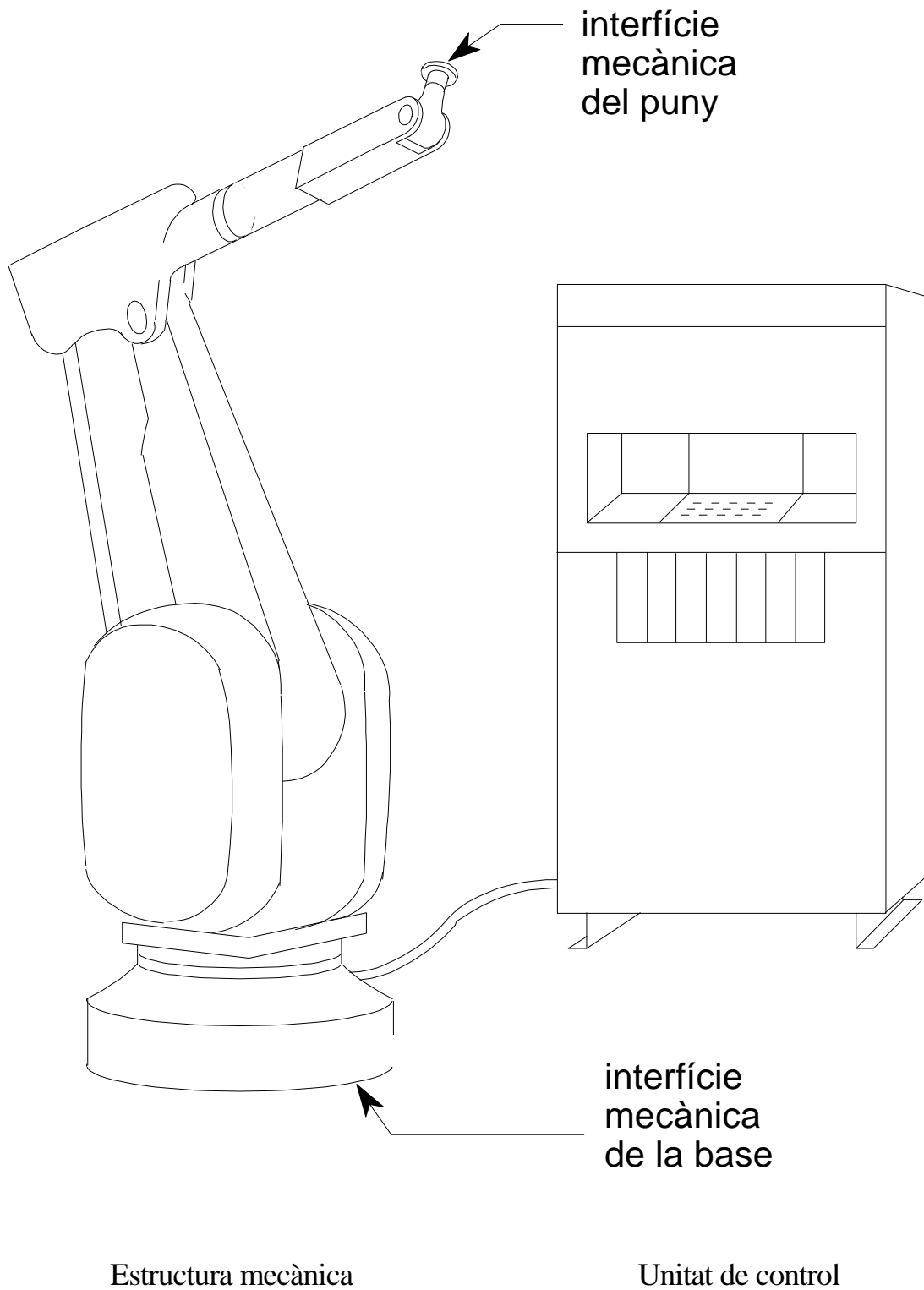


Figura 1.1

1.2 El robot industrial i el seu entorn

El robot industrial és un element d'automatització *flexible*, gràcies al seu caràcter multifuncional i reprogramable; però també és una màquina que demana la *integració* de la seva acció amb la d'altres màquines i sistemes de l'entorn. En molts casos, la seva introducció en una fàbrica o taller ha estat un impuls per a l'automatització flexible i la integració de sistemes.

A continuació s'exposen tres nivells de sistemes d'automatització on intervenen robots industrials, variant de més petita a més gran la complexitat del sistema global, i de més gran a més petita la importància de la intervenció del robot industrial:

a) *Sistema robòtic*

Unitat de fabricació automatitzada formada per un o més robots industrials, amb els corresponents terminals (prensors, eines), i dispositius i aparells complementaris (sensors i percepció, alimentadors de peces i eines, equip complementari, etc.) necessaris per a la realització de la tasca encomanada.

El sistema robòtic, on el robot industrial sol tenir el protagonisme principal (execució d'una paletització, d'un procés, d'un muntatge), funciona de forma integrada sota un sistema de control supervisor, que acostuma a ser el del mateix robot industrial.

El conjunt d'elements que forma part d'un sistema robòtic, però que no constitueixen el robot industrial pròpiament dit, prenen el nom de *peri-robòtica*.

Exemple: Un sistema robòtic, destinat a la soldadura per arc MIG, d'una roda dentada en el seu eix, constituït per un robot, el corresponent terminal i l'utilatge de soldadura per arc MIG, i una taula motoritzada de dues estacions (càrrega/descàrrega i treball).

b) *Cèl·lula de fabricació flexible*

Unitat de fabricació flexible, formada per una o més màquines-eina i altres sistemes auxiliars, generalment disposats en forma de cèl·lula, on el robot industrial realitza funcions de servidor del sistema (manipulació, càrrega/descàrrega, inspecció, etc.).

Per a la realització de les tasques, el robot industrial acostuma a disposar dels elements peri-robòtics necessaris. La cèl·lula de fabricació flexible funciona de forma integrada sota un control supervisor que, cada vegada menys, és el del robot industrial.

Exemple: Una cèl·lula de fabricació de rotors de motors elèctrics asíncrons, basada en una màquina d'injecció d'alumini. El robot industrial es troba en el centre de la cèl·lula i realitza la transferència i manipulació entre diverses màquines (màquina d'apilar rotors, màquina d'injectar, màquina de trencar colades i sistemes d'alimentació).

c) *Sistema de fabricació flexible*

Sistema de fabricació d'automatització flexible format per un conjunt complex de màquines-eina i sistemes auxiliars, generalment disposats en forma d'una o més línies de fabricació, que realitza, seguint una seqüència aleatòria, la fabricació d'una diversitat de variants d'una peça, o el muntatge de diverses variants d'un producte.

En un sistema de fabricació flexible el robot industrial hi intervé com una màquina més, o bé fent funcions de manipulació, o bé exe-cutant alguna fase del procés de la inspecció. El control supervisor del conjunt del sistema sempre està per damunt del control dels robots industrials que hi intervenen.

Exemple: Una línia flexible de muntatge de portes d'automòbil a partir de robots de soldadura per punts, apte per a qualsevol porta dels diferents models d'automòbil que fabrica la planta. (En sistemes de fabricació flexible de mecanització els robots solen tenir una intervenció més petita).

Robòtica industrial

La *robòtica industrial* és la ciència aplicada i la tecnologia que tracta de diferents aspectes del *robot industrial* i del seu entorn o *peri-robòtica*, tals com, per exemple, la seva concepció, fabricació i aplicació a la indústria.

Constitueix una forma avançada d'*automatització* (Sec. 1.3), bàsicament orientada a la fabricació de productes discrets, i és el resultat de la confluència i el desenvolupament de nombroses tecnologies aplicades sobre un braç manipulador. Entre aquests cal destacar el control numèric, inicialment desenvolupat per a les màquines-eina a partir de 1950, i el control per ordinador que pren el impuls en la robòtica a partir dels anys 1980.

1.3 Robòtica industrial i automatització

Evolució de l'automatització

A l'inici de la industrialització, després de la Revolució Industrial, els processos de fabricació es basaven majoritàriament en la *manufatura*, és a dir, la fabricació a mà, amb ajuda o sense d'eines i de maquinària.

La idea de l'*automatització* dels processos de fabricació, és a dir, el fet de deslligar-los progressivament de la intervenció directa de l'home, ha estat, mal-grat els conflictes socials, una de les línies de progrés tecnològic i social al llarg de la història, com ho testimonien l'automatització de la indústria tèxtil, l'automatització de les màquines-eina, o els sistemes transfer per a grans sèries, especialment a la indústria de l'automòbil.

La primera automatització adaptava físicament la maquinària al producte fabricat (*automatització rígida*), mentre que la robòtica industrial s'inscriu en formes més avançades d'automatització on la maquinària es pot adaptar a diferents necessitats de fabricació (*automatització programable*).

A continuació s'analitzen, tot prenent com a referència la *manufatura*, diversos aspectes tècnico-econòmics dels diferents sistemes d'automatització que, en ordre de complexitat creixent, són: *automatització rígida*, *automatització programable*, *automatització flexible* i *automatització intel·ligent*.

Manufactura

En un context de robòtica, la manufactura o sistema de producció basat en la fabricació a mà tan sols presenta interès com a terme de referència. Les principals característiques tècnico-econòmiques són:

- * Maquinària i utilatges senzills i poc sofisticats
- * Baixa inversió inicial en mitjans de producció
- * Facilitat de realitzar una ample varietat de productes o de variants del producte
- * Baixa productivitat
- * Costos unitaris molt alts en mà d'obra directa
- * Poca uniformitat de les característiques del producte
- * Control tècnicament senzill, però humanament complex, del sistema de producció

Exemple: Fabricació de calçat a mà

Automatització rígida

Fabricació automàtica basada en maquinària que s'ajusta físicament al producte fabricat i, per tant, les modificacions en el producte comporten modificacions, sempre llargues i costoses, de la maquinària. L'automatització rígida és prèvia a la robòtica, però n'obre les portes. Les principals característiques tècnico-econòmiques són:

- * Necessitat d'una maquinària i d'un equipament fets a mesura
- * Inversió inicial elevada en mitjans de producció (difícilment reutilitzable en un canvi de producte)
- * Capacitat de variació del producte que s'ha de fabricar molt escassa o nul·la (rigidesa)
- * Productivitat molt alta
- * Costos unitaris molt baixos en mà d'obra directa
- * Bona uniformitat de les característiques del producte
- * Posada a punt i manteniment del sistema de complexitat tècnica baixa

Exemple: Fabricació del bloc motor d'un vehicle produït en gran sèrie per mitjà d'un sistema transfer

Automatització programable

Fabricació automàtica per mitjà de maquinària que pot adaptar els moviments, seqüències i operacions per mitjà d'un *programa de tasca*. Les noves tasques no exigeixen, doncs, la modificació de l'estructura física de les màquines. Les principals característiques tècnico-econòmiques són:

- * Utilització de maquinària universal reutilitzable
- * Inversió inicial elevada en mitjans de producció
- * Possibilitat de fabricar diferents productes, en funció de diferents programes de tasca (programable)
- * Alta productivitat, però més petita que en l'automatització rígida
- * Costos unitaris molt baixos en mà d'obra directa
- * Bona uniformitat de les característiques del producte
- * Posada a punt i manteniment de complexitat tècnica mitjana

Exemple: Fabricació amb una màquina de control numèric

Automatització flexible

Forma d'automatització programable en què el sistema és capaç de fabricar simultàniament una certa varietat de productes o variants (*flexibilitat*), seguint una seqüència aleatòria, sense, virtualment, perdre temps en el canvi de programa gràcies a l'ajut d'un ordinador. Les principals característiques tècnico-econòmiques són:

- * Sistema de fabricació dissenyat específicament
- * Inversió inicial molt elevada en mitjans de producció
- * Possibilitat de programar simultàniament la fabricació d'una varietat de productes (flexibilitat)
- * Alta productivitat, en general, però, més petita que en l'automatització rígida
- * Costos unitaris molt baixos en mà d'obra directa
- * Bona uniformitat de les característiques del producte
- * Posada a punt i manteniment de complexitat tècnica alta

Exemple: Sistema de fabricació flexible per a la mecanització simultània dels arbres d'una varietat de motors de CA.

Automatització intel·ligent

Forma d'automatització flexible capaç, a partir de l'especificació d'uns objectius inicials, de *generar el programa de tasca* automàticament, en part o totalment, en funció del coneixement inicial que posseeix, o de *modificar el programa de tasca*, en funció de la informació sobre el seu entorn que obté mitjançant sensors.

L'*automatització intel·ligent* és el resultat del desenvolupament, la integració i l'aplicació en els sistemes de fabricació de tècniques noves i molt sofisticades en el camp de la *intel·ligència artificial* i dels sistemes de *percepció artificial* (visió artificial, tacte artificial, reconeixement de la veu, etc).

Les principals característiques tècnico-econòmiques són:

- * Sistema de fabricació dissenyat específicament
- * Inversió inicial molt elevada en mitjans de producció
- * Possibilitat de generar o adaptar automàticament el programa de tasca al producte (intel·ligència)
- * Noves possibilitats en l'automatització de la fabricació (manipulacions delicades, muntatges complexos, etc.)
- * Costos unitaris molt baixos en mà d'obra directa
- * Costos de programació relativament reduïts
- * Bona uniformitat de les característiques del producte
- * Posada a punt i manteniment de complexitat tècnica molt alta

Aplicació actual dels diferents sistemes de fabricació

La *manufactura* té avui dia la justificació tan sols en la fabricació de productes de poca demanda, on s'accepta una baixa productivitat i s'exigeix un gran nombre de variants (flexibilitat), quan no es vol o no es poden fer inversions importants en maquinària o equip.

Els sistemes d'*automatització rígida* tenen encara avui dia sentit en la fabricació de productes de gran demanda sotmesos a una gran competitivitat de preus i que, alhora, no presenten variants (rigidesa). Exigeix la realització d'una gran inversió inicial en mitjans de producció.

L'enorme abaratiment de la informàtica a partir dels anys 1980 ha donat lloc a la progressiva incorporació de microprocessadors en els sistemes d'*automatització programable*, amb la qual cosa els sistemes d'*automatització flexible* han experimentat una important transformació a la pràctica.

L'*automatització flexible*, en la qual cal incloure el control numèric per ordinador (CNC) i els actuals robots industrials, s'està convertint avui dia en el nucli dels actuals processos de fabricació, i cada vegada s'introdueix més en nous camps. La flexibilitat està comportant canvis molt importants en tots els ordres, des del *marketing* (productes personalitzats) fins a les formes d'*organització de la producció* (fabricació sense estocs), passant pel *disseny* i altres funcions.

L'*automatització intel·ligent* es troba avui dia encara més en una fase de laboratori que en una fase d'aplicació industrial; tanmateix, es comencen a trobar alguns productes comercialitzats (sistemes experts, sistemes de visió artificial, etc.) que han donat ja els primers resultats en els processos de fabricació. En tot cas, constitueix un camp on la investigació està en ple desenvolupament.

1.4 Evolució històrica

Els termes *robot* i *robòtica* procedeixen tots dos del gènere de la ficció i van néixer abans que es construïssin els primers *robots industrials*.

Robot

Terme creat per l'escriptor txec Karel Capek (1890-1938) a la novel·la curta *Opilec* (1917). Poc després, el terme va adquirir ressò universal per mitjà de la seva obra de teatre *Rossum's universal robots* (1920). Segons aquesta obra de final tràgic, el científic Rossum i el seu fill aconseguen fabricar uns éssers que anomenen *rabota* destinats a servir l'espècie humana i realitzar els treballs pesats. Però aquests acaben desobeint i destruint la vida humana.

El terme txec *rabota*", que significa treball forçat, treball servil, va ser traduït a l'anglès per *robot*.

Robòtica

El terme robòtica va ser establert pel prolífic autor de relats de ciència ficció, Isaac Asimov, en els primers anys 1940. Asimov va establir la seva visió sobre els robots, molt més optimista que la de Capek, per mitjà, de les *Tres lleis de la robòtica*:

Primera llei Un *robot* no pot actuar contra un ésser humà, ni tan sols per inacció, ni permetre que un ésser humà sofreixi danys.

Segona llei Un *robot* ha d'obeir les ordres donades pels éssers humans, llevat del cas que aquestes entrin en contradicció amb la primera llei.

Tercera Llei Un *robot* ha de protegir la seva mateixa existència, a no ser que entri en contradicció amb les dues primeres lleis.

El primer robot industrial

El *robot industrial* resulta, en els seus inicis, de la combinació del *control numèric* i dels dispositius de *telem manipulació*.

El principi del *control numèric*, o control dels moviments d'una màquina a partir d'una codificació i programació per números, aplicat inicialment a les màquines-eina vers els primers anys 1950, representa un pas molt important per al desenvolupament posterior de la *robòtica*.

El principi de la *telem manipulació*, per mitjà d'un manipulador controlat a distància per un ésser humà (objecte d'algunes patents als EUA en els anys 1950 relacionades amb la manipulació de materials radioactius), va ser una altra de les bases per al desenvolupament de la robòtica.

Una trobada fortuïta de G.C. Devol, inventor d'un dispositiu per a Transferència d'articles programat, amb J.F. Engelberger, considerat el creador del robot industrial, va originar una col·laboració de la qual en van sortir els prototip de robot industrial Unimate (*universal automation*) i de Versatran (*versatile transfer*). La primera aplicació industrial d'un robot Unimate va ser realitzada per Ford el 1961, i el 1962 van crear la Unimation Company.

Dates històriques significatives

(20 primers anys de la robòtica industrial)

- 1952 Primera demostració al Massachusetts Institut of Technology del primer prototip operatiu de Control Numèric (NC).
- 1951 Treballs desenvolupats amb telemanipuladors per operar a dis-tància sobre materials radioactius (diverses patents: Goertz, 1954; Bergland, 1958).
- 1954 G.C. Devol desenvolupa un dispositiu per a Transferència d'ar-ticles programat (patent del 1961), que posa les bases del futur robot industrial.
- 1961 Primera instal·lació industrial d'un robot Unimate a Ford Motor Company: atén una màquina de fosa injectada.
- 1966 L'empresa noruega Trallfa construeix i instal·la el primer robot de pintura per polvorització.
- 1971 Es desenvolupa l'Standford Arm, un braç de robot d'accionament elèctric, a la Universitat de Stanford.
- 1974 L'empresa sueca ASEA comercialitza el robot IRb6 d'accionament totalment elèctric.
- 1974 L'empresa americana Cincinnati Milacron comercialitza el robot T³ amb control per ordinador.
- 1976 Els laboratoris de Charles Stark Draper (americans) van desenvolupar un dispositiu d'acomodació de centre remot (RCC) per a l'inserció de peces en una línia de muntatge.
- 1979 La universitat japonesa de Yamanashi desenvolupa el robot de tipus SCARA (Selective Compliance Arm for Robotic Assembly), per a tasques de muntatge.
- 1981 La universitat americana de Rhode Island presenta un sistema robòtic amb visió artificial que permet prendre objectes situats en posicions i orientacions aleatòries.

Incidència tecnològica i social del robot industrial

Certament, el robot industrial no és l'únic sistema d'automatització avançada. Tanmateix, les seves característiques i aplicacions l'han convertit en un element de referència.

En efecte, d'una banda, aspectes com, per exemple, la gran mobilitat de la seva estructura, la flexibilitat en les tasques i la integració de funcions, el configuren com un potent motor de desenvolupament científic i tecnològic, fet que ha despertat l'atenció de centres d'investigació i d'universitats. I, d'altra banda, l'espectacularitat de moltes aplicacions, com ara la mani-pulació d'objectes, operacions amb eines, i certes formes de percepció i d'intel·ligència, han cridat l'atenció del gran públic i dels poders públics més enllà i tot de la seva implantació real.

La robòtica industrial presenta, doncs, un dels reptes del nostre temps, tant des del punt de vista intel·lectual com social. Entre els aspectes *científico-tècnics* de més relleu hi ha:

- * La gran *mobilitat* de l'*estructura articulada* amb el *terminal* que evoluciona en un *espai de poses* (posició i orientació) de 6 dimensions ha impulsat l'estudi de la cinemàtica i del control.
- * El disseny de l'*estructura mecànica* exigeix un difícil compromís entre la *lleugeresa* (per moure's amb agilitat) i la *rigidesa* tot evitant els *jocs* (per assegurar la precisió i la repetibilitat).
- * S'han desenvolupat *motors* amb *prestacions específiques* (lleugers, compactes, inèrcia baixa, parell impulsional elevat, velocitat màxima elevada, bona resolució) i *transmissions* amb *noves prestacions* (lleugeres, reduccions elevades, rendiment elevat, sense joc).
- * El *sistema de control* (de posició, de velocitat, en alguns casos de força) ha de coordinar un nombre elevat d'eixos segons diverses estratègies (*control punt a punt, control de trajectòria contínua, control híbrid*).
- * Els *llenguatges* han de fer possible la *programació de tasques* complexes que inclouen moviments i operacions pròpies i del sistema robòtic circumdant.

- * El desenvolupament de sistemes robòtics cada vegada més complexos i més flexibles fomenta el desenvolupament de sistemes de *percepció artificial* i de tècniques d'*intel·ligència artificial*.

Entre les transformacions *sòcio-econòmiques* més destacades hi ha les següents:

- * Eliminació de llocs de treball directe, alhora que foment i diversificació de tasques indirectes (dedicació més gran al disseny del producte, a l'organització de la producció, a la preparació i programació de tasques, al control de qualitat i a les noves funcions del manteniment).
- * Exigència d'una formació més gran i una millor qualificació professional, amb importants repercussions en el sistema educatiu.
- * Transformació de l'organització de l'empresa per incorporar els aspectes de flexibilitat i d'integració de sistemes.

Per acabar, cal dir que el terme de *robòtica industrial* ha estès el seu signi-ficat a tots aquells sistemes o màquines que presenten característiques i prestacions anàlogues a les dels robots industrials, com ara el *tall automàtic en la confecció*, el *montatge automàtic de components electrònics*, els *magatzems automatitzats*, els *vehicles guiats automàticament* (AGV), etc.

2 Estructura mecànica

2.1 Referència d'un cos a l'espai: posa

Concepte de posa

El *control numèric* (NC) per a una *màquina-eina* és capaç de situar un punt especificat d'una peça, o d'una eina, en un punt determinat de l'espai (*posició*, fins a 3 coordenades independents), o bé és capaç de fer seguir aquest punt especificat, amb aproximació suficient, una determinada seqüència de punts o *trajectòria*.

En general, el moviment per al tall és proporcionat per la rotació o des-plaçament de la peça respecte a una eina, o viceversa, i la forma de la peça mecanitzada vé donada pel moviment relatiu entre eina i peça. Per tant, el nombre de moviments independents que cal controlar acostuma a estar limitat a 3 (deixant a part el moviment de rotació de l'eina o de la peça).

El *sistema de control* d'un *robot industrial* presenta unes necessitats anàlogues a les de la *màquina-eina*, però en aquest cas, a més de de ser capaç de situar un punt de referència de l'element operatiu del robot (o *terminal*) en un punt de l'espai (*posició*), també ha de situar un sistema de referència lligat al terminal segons unes determinades direccions de l'espai (*orientació*, fins a tres coordenades independents més).

Per tant, el *terminal* d'un robot industrial evoluciona en un espai de 6 dimensions que exigeix sistemes de referència més complexos. Davant d'aquesta necessitat, l'Informe Tècnic ISO TR/8373 va introduir el 1988 el nou concepte de *posa* (anglès: *pose*; francès: *pose*; castellà: *pose*), que es defineix com la *posició* i l'*orientació* combinades que adopta un cos rígid qualsevol i en concret el *terminal* d'un robot industrial, a l'espai.

Coordenades de posició

Les principals formes de *coordenades de posició*, usades en diversos camps de la tecnologia de les màquines, entre aquests els robots industrials, són:

- * *Coordenades cartesianes* (o també *coordenades rectangulars*)
Consisteixen en tres mesures algèbriques, x , y i z , obtingudes a partir de rectes paral·leles als eixos de coordenades (Fig. 2.1a). És el sistema més simple i més utilitzat.
- * *Coordenades cilíndriques*
Consisteixen en dues mesures algèbriques, r i z , i una angular, Θ , obtingudes a partir de la projecció del punt P sobre el pla xy (Fig. 2.1b). Són útils per a moviments cilíndrics.
- * *Coordenades esfèriques* (o també *coordenades polars*)
Consisteixen en una mesura algèbrica, r (distància del punt al centre de coordenades), i dues mesures angulars, Θ i ϕ (Fig. 2.1c). Són útils per a moviments esfèrics.

Algunes de les estructures de robot industrial presenten una gran correspondència amb alguns d'aquests sistemes de coordenades de posició, amb la qual cosa el robot n'adopta la seva denominació (Sec. 2.3).

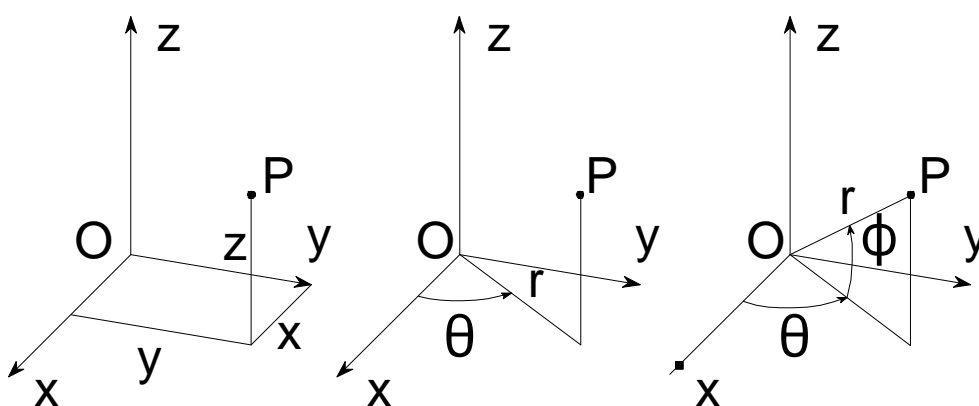


Figura 2.1

Coordenades d'orientació

Hi ha una multiplicitat de solucions per expressar l'*orientació* relativa entre dos sistemes de referència, un considerat fix i determinat pels tres vectors ortonormats, x_0 , y_0 i z_0 , i un altre lligat al sòlid format pels tres vectors ortonormats, x_1 , y_1 i z_1 . Alguns dels principals sistemes de *coordenades d'orientació* són:

Cosinus directors

Cada un dels 3 vectors unitaris de la referència fixa, x_1 , y_1 i z_1 es pot expressar en funció dels 3 vectors unitaris de la referència del sòlid, x_0 , y_0 i z_0 , mitjançant els cosinus directors (Fig. 2.2), fet que proporciona tres equacions lineals amb 9 coeficients.

Tanmateix, aquests 9 cosinus directors no són independents; en efecte, hi ha tres equacions escalars que asseguren que els vectors transformats són unitaris i dues més que asseguren que els tres vectors són normals; en total queden 3 coeficients independents.

La matriu definida pels 9 cosinus directors defineix la rotació del sòlid respecte a la base.

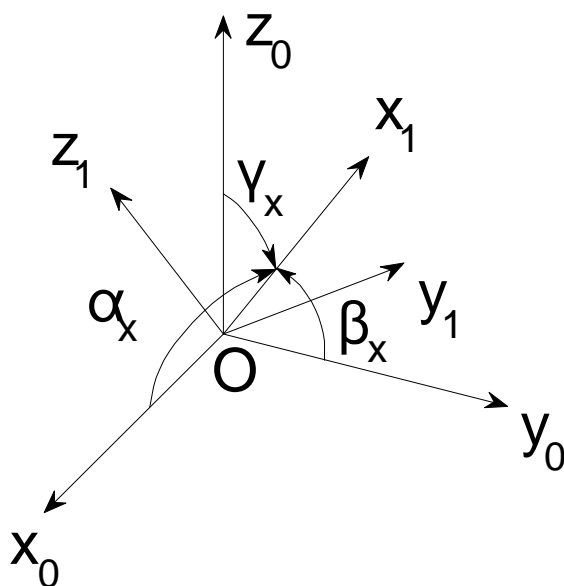


Figura 2.2

Angles d'Euler

El pas de la referència fixa determinada pels vectors x_1 , y_1 i z_1 a la referència del sòlid x_0 , y_0 i z_0 , es realitza a partir de les tres rotacions successives definides de la forma següent (Fig. 2.3):

- Una primera rotació, de valor ψ , al voltant de l'eix z_0 : x_0 passa a x' i y_0 a y' .
- Una segona rotació, de valor θ , al voltant de l'eix x' : y' passa a y'' , i z_0 passa a z_1 .
- Finalment, una tercera rotació, de valor ϕ , al voltant de z_1 : x'' passa a x_1 , i y'' passa a y_1 .

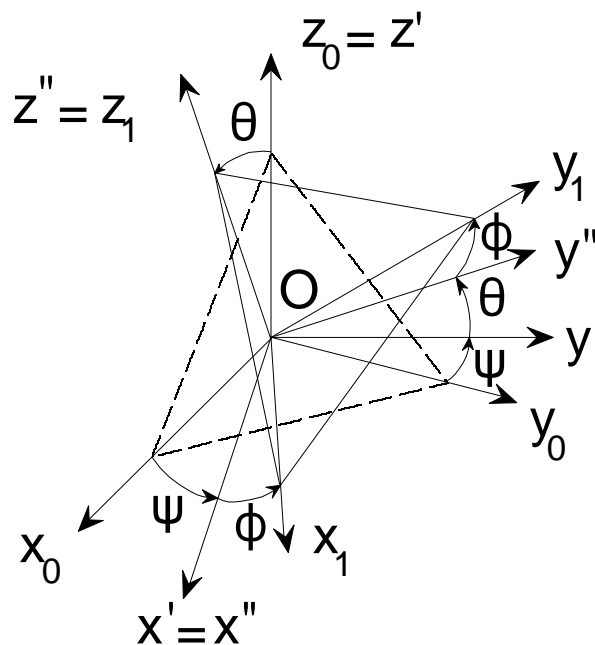


Figura 2.3

Hi ha, encara, altres sistemes de coordenades d'orientació, com, per exemple, *angles de Bryant*; *angles de guinyada*, *capcineig i balanceig*; *rotació al voltant d'un vector*, etc., que no es definiran aquí.

Coordenades de posa

Qualsevol conjunt de 6 paràmetres independents que determinin la *posició* i l'*orientació* del terminal constitueixen unes coordenades per *posa*.

2.2 Elements i articulacions

Element

Un *element* és, en la teoria de mecanismes, una peça o un conjunt de peces rígidament unides entre elles que té un moviment independent dins d'un mecanisme.

En comportar-se com un *cos rígid*, el moviment més general d'un *element* a l'espai té 6 *graus de llibertat*, això és, necessita 6 paràmetres per definir la seva posició, o 6 variables per determinar el seu moviment.

Articulació

En la teoria de mecanismes, un *parell cinemàtic* és una unió mòbil entre dos *elements*, el moviment relatiu dels quals és determinat per la geometria del contacte.

El moviment relatiu més general d'un element respecte a un altre (el segon fa de referència del primer) és de 6 graus de llibertat. Els parells cinemàtics poden restringir el moviment relatiu entre els dos elements que uneixen en 1, 2, 3, 4 o 5 graus de llibertat, i aleshores permeten, respectivament, 5, 4, 3, 2 o 1 *graus de mobilitat* (denominats *parells cinemàtics* de classe I, II, III, IV i V).

Els robots industrials utilitzen bàsicament parells cinemàtics de classe I (permeten 1 grau de mobilitat relatiu entre els dos elements), ja que proporcionen una construcció mecànica més fiable i un accionament del moviment més senzill i precís. En robòtica s'utilitzen prioritàriament els parells cinemàtics de classe I següents, que prenen el nom d'*articulacions*:

Articulació de revolució

Parell cinemàtic de grau de mobilitat 1 que permet el moviment relatiu de rotació entre dos elements al voltant d'un eix de rotació comú. L'articulació de revolució, que s'expressa amb una *R*, es materialitza per mitjà del contacte entre dues superfícies cilíndriques, amb retenció axial (Fig. 2.4a).

Articulació prismàtica

Parell cinemàtic de grau de mobilitat 1 que permet un moviment relatiu de translació entre dos elements al llarg d'una direcció de translació comuna. L'articulació prismàtica, que s'expressa per una P , es materialitza per mitjà del contacte entre dues superfícies prismàtiques (Fig. 2.4b).

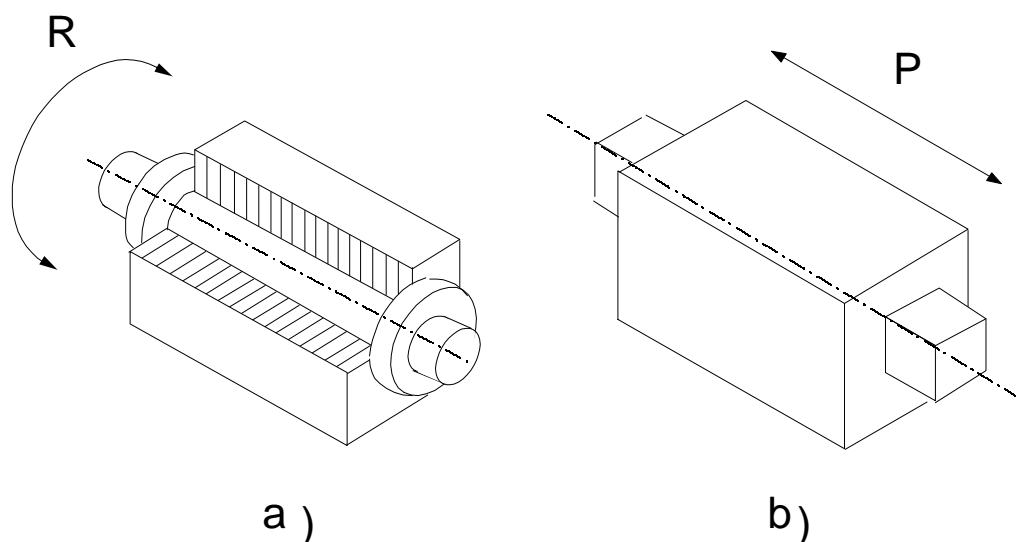


Figura 2.4

Cadena cinemàtica

En teoria de mecanismes, una *cadena cinemàtica* està constituïda per un conjunt d'*elements* units entre ells mitjançant *parells cinemàtics*, que confereixen una possibilitat de moviment al conjunt. Quan una cadena cinemàtica presenta un element immobilitzat que fa de *base*, aquesta pren el nom de *mecanisme*.

Cadena cinemàtica tancada, i oberta

Una *cadena cinemàtica tancada* és aquella en què cada un dels elements està articulat a l'element següent, fins que el darrer element s'articula novament sobre l'element de partida (Fig. 2.5a). Aquest tipus de cadenes cinemàtiques presenten un grau de mobilitat molt baix i són més pròpies de sistemes de transmissió que d'estructura per a un robot industrial.

Una *cadena cinemàtica oberta* és aquella en què cada un dels elements està articulat amb l'element anterior i posterior, però el darrer element només s'articula amb el seu element precedent (Fig. 2.5b). Aquest altre tipus de cadena cinemàtica presenta un grau de mobilitat molt alt (en general, tants com articulacions) i, per tant, és adequat per a robots industrials.

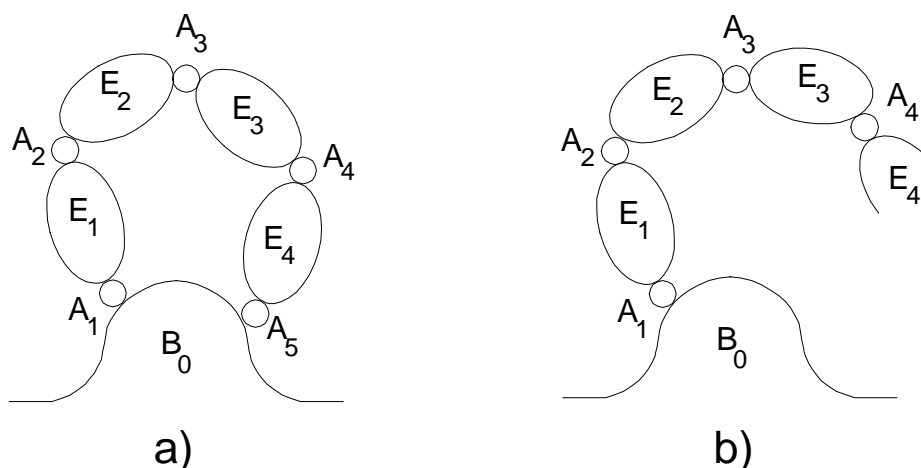


Figura 2.5

Cadena cinemàtica mixta

Alguns robots adopten l'estructura de cadenes cinemàtiques mixtes, que combinen una estructura bàsica en cadena cinemàtica oberta, que proporciona la mobilitat al robot industrial, amb diverses cadenes tancades complementàries, que faciliten o simplifiquen les transmissions del moviment i de les forces (Fig. 2.6).

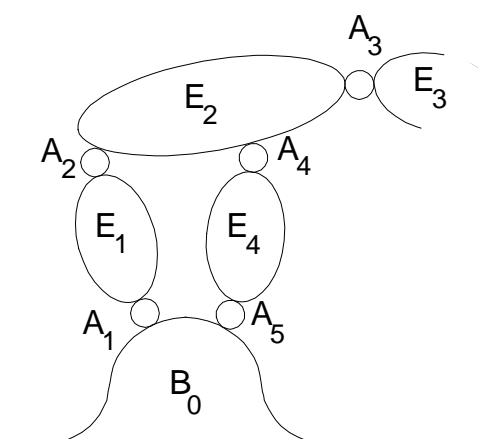


Figura 2.6

2.3 Estructura articulada

Parts de l'estructura articulada

S'anomena *estructura articulada* del robot industrial la cadena cinemàtica formada per diversos *elements* units entre ells per mitjà d'*articulacions*, i que constitueix l'"esquelet" de l'*estructura mecànica* del robot industrial. L'*estructura articulada* comprèn tots els elements i articulacions que van des de la *interfície mecànica de la base*, que la delimita respecte a l'en-torn, fins a la *interfície mecànica del puny*, que la delimita respecte al terminal i comprèn la *base*, el *braç* i el *puny*. A continuació es defineixen aquests conceptes:

Base

És l'element, generalment fix, on va articulat el primer element mòbil de l'estructura articulada del robot industrial (Fig. 2.7). Si la base es munta sobre un vehicle mòbil, la base passa a denominar-se *base mòbil*, i el robot, robot mòbil.

Braç

És la part de l'estructura articulada, situada entre la base i el puny, formada pels tres primers elements mòbils (E_1 , E_2 i E_3), enllaçats per les tres primeres articulacions del robot (A_1 , A_2 i A_3), que té com a funció bàsica el posicionament del terminal, però que també intervé en la seva orientació (Fig. 2.7).

Les tres articulacions del braç també prenen el nom d'*eixos primaris*.

Puny

És la part de l'estructura articulada, situada entre el puny i el terminal, formada pels tres darrers elements mòbils (E_4 , E_5 i E_6) (en alguns casos, tan sols un o dos elements), enllaçats per les tres darreres articulacions del robot (A_4 , A_5 i A_6) (en alguns casos, una o dues articulacions, respectivament), que té com a funció bàsica l'orientació del terminal, però que també intervé en el seu posicionament (Fig. 2.7).

Les tres articulacions del puny també prenen el nom d'*eixos secundaris*.

Per a exemplificar aquests conceptes es parteix d'un robot industrial amb una estructura articulada formada per 6 elements mòbils en forma de cade-na cinemàtica oberta, enllaçats entre ells per articulacions. La Figura 2.7 ofereix una representació del desglossament d'aquesta *estructura articulada* en *base*, *braç* i *puny*.

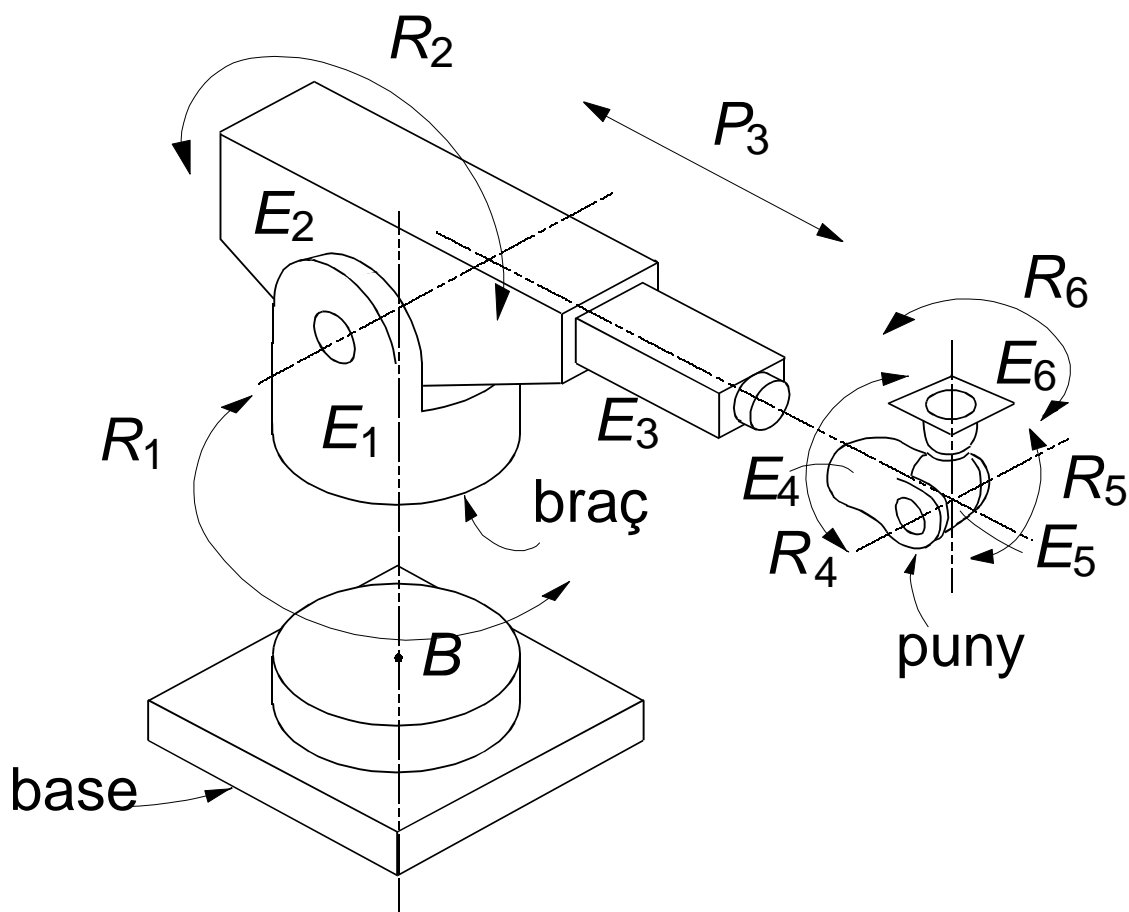


Figura 2.7

Punt de referència del puny

Es defineix com *punt de referència del puny* (punt P , Fig. 2.7) la intersecció de les dues primeres articulacions del puny, o eixos secundaris, punt que, més endavant, servirà per determinar l'*espai de treball* del robot (Sec. 3.2), aproximació de l'espai on es mourà el *terminal*.

Estructures del braç

S'acostuma a fer una primera classificació morfològica dels robots industrials en funció de l'*estructura articulada del braç*, és a dir, del conjunt dels tres primers elements i les tres primeres articulacions o eixos primaris. L'estructura articulada del braç estableix el tipus de coordenades que utilitzarà el robot industrial en el posicionament del *punt de referència del puny*, i la forma i dimensions de l'*espai de treball*.

S'han assajat un gran varietat d'estructures de braç per a robot industrial, però tan sols unes quantes configuracions bàsiques han obtingut una confirmació a la pràctica. Les solucions més consolidades són les següents:

- * Robot cartesià (o robot rectangular)
- * Robot cilíndric
- * Robot esfèric (o robot polar)
- * Robot angular (o robot *rotoïde*)
- * Robot Scara
- * Robot vertebrat

1. Robot cartesià (o robot rectangular)

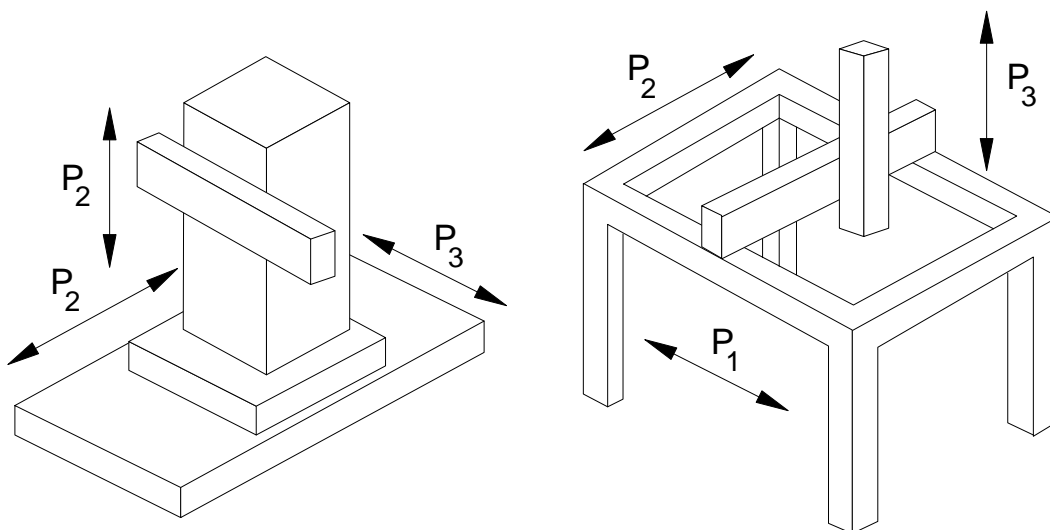
Robot industrial l'estructura del braç del qual comprèn 3 articulacions prismàtiques, P, amb les direccions de translació disposades segons un sistema de coordenades cartesianes (Fig. 2.8a).

N'existeix una varietat constructiva consistent en una estructura que adopta la forma d'un pòrtic, i aleshores es denomina *robot pòrtic* (Fig. 2.8b).

2. Robot cilíndric

Robot industrial l'estructura del braç del qual comprèn 1 *articulació de revolució*, R (generalment la primera), i 2 *articulacions prismàtiques*, P, amb l'eix de rotació i les direccions de translació disposades segons un sistema de coordenades cilíndriques (Fig. 2.9a).

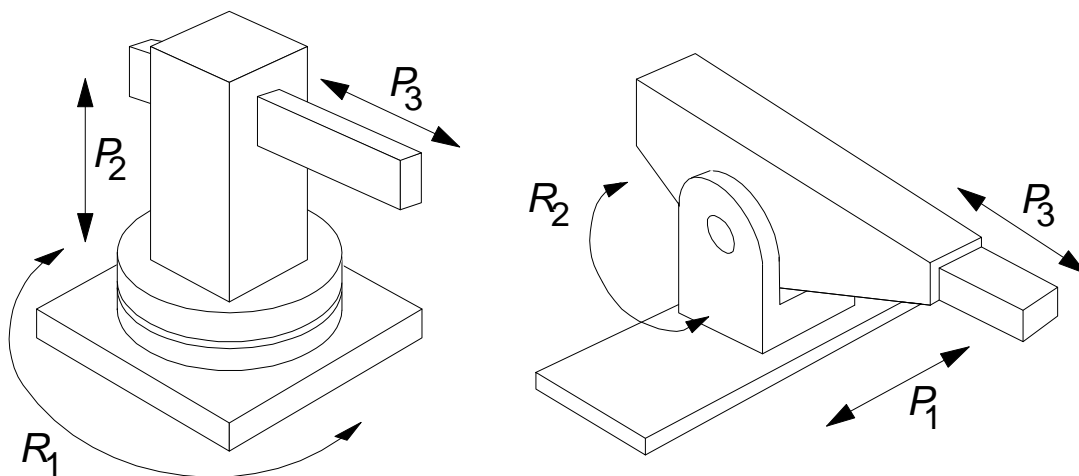
N'existeixen diverses variants, com ara la de la figura 2.9b, on l'eix de rotació figura com a segon eix i en posició horitzontal.



a) Robot cartesià
Estructura *PPP*

b) Robot pòrtic
Estructura *PPP*

Figura 2.8



a) Robot cilíndric
Estructura *RPP*

b) Robot cilíndric
Estructura *PRP*

Figura 2.9

3. *Robot esfèric (o robot polar)*

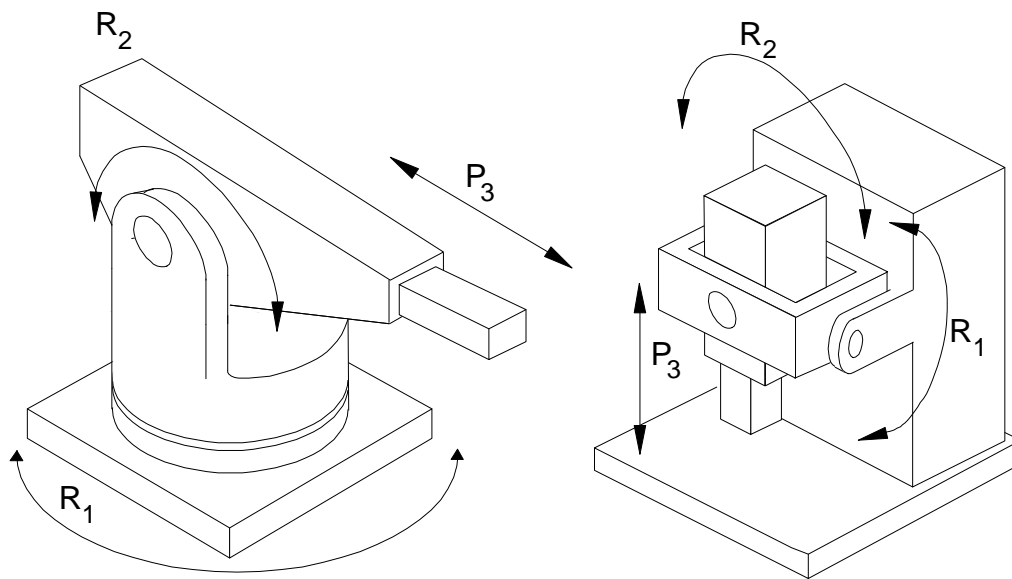
Robot industrial l'estructura del braç del qual comprèn 2 *primeres articulacions de revolució, R*, i 1 *tercera articulació prismàtica, P*, amb els eixos de rotació i la direcció de translació disposades segons un sistema de coordenades esfèric.

N'existeixen diverses variants segons l'orientació dels eixos de rotació. El més freqüent és que el primer d'ells adopti una posició vertical i el segon una posició horitzontal; llavors acostuma a prendre el nom de *robot polar* (Fig. 10a). Però també existeix una disposició en què els dos eixos de rotació es disposen horitzontalment en forma de suspensió de Cardan i, aleshores, pren el nom de *robot pendular* (Fig. 10b).

4. *Robot angular (o robot rotoïde; també robot poliarticulat)*

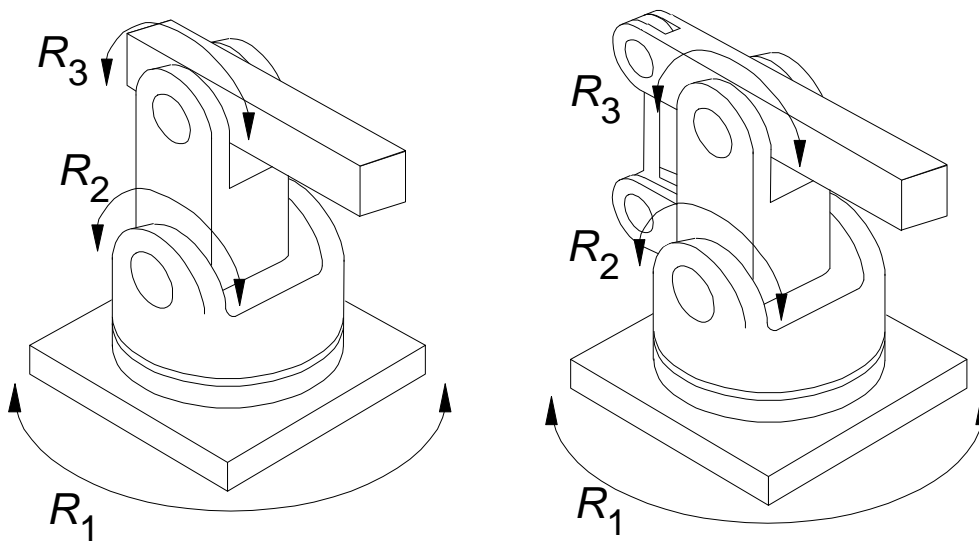
Robot industrial l'estructura del braç del qual comprèn 3 *articulacions de revolució, R*, amb els eixos de rotació disposats, el primer, en sentit vertical, i el segon i el tercer, paral·lels entre ells, en sentit horitzontal, essent el primer i el segon, en general, concurrents (Fig. 11a).

Existeixen moltes solucions constructives d'aquesta estructura. En algunes, l'estructura del braç adopta la forma d'una cadena cinemàtica complexa, en part tancada i en part oberta, cosa que facilita la transmissió dels moviments i dóna rigidesa al conjunt. (Fig. 11b).



a) Robot polar Estructura *RRP* b) Robot pendular Estructura *RRP*

Figura 2.10



a) Robot angular Estructura *RRR* b) Robot angular Estructura complexa

Figura 2.11

5 *Robot Scara*

Robot industrial l'estructura del braç del qual comprèn 2 *primeres articulacions de revolució, R*, i 1 *tercera articulació prismàtica, P*, amb els eixos de rotació i la direcció de translació de totes aquelles paral·leles (Fig. 12a).

SCARA és l'acrònim de Selective Compliance Assembly Robot Arm (braç de robot per a muntatge, amb acomodació selectiva). És una estructura que fou aplicada al robot industrial per la universitat japonesa de Yamanashi el 1979, i ofereix un acomodament horitzontal fàcil.

Una variant del robot Scara, utilitzada generalment en robots de grans dimensions, inverteix la posició de les articulacions, avantposant l'articulació prismàtica a les de revolució (Fig. 12b).

6. *Robot alimentador de màquina-eina (o manipulador)*

Robot industrial l'estructura articulada del qual està especialment adaptada als moviments de càrrega i descàrrega de màquines-eina i que en general no fa distinció de braç i puny (Fig. 13a).

Acostumen a ser robots industrials d'un grau baix de mobilitat (4 o 5), la base dels quals s'acostuma a unir a un lateral de la mateixa màquina-eina, i, per tant, la versatilitat fora d'aquesta aplicació és molt baixa.

No és una estructura articulada que hagi proliferat gaire, i més aviat tendeix a ser substituïda per altres estructures més versàtils i que permetin la reutilització de la màquina.

7. *Robot vertebrat*

Robot industrial l'estructura del braç del qual comprèn *un nombre elevat d'elements*, sempre superior a tres, cadascun dels quals pivota sobre l'element anterior. La mobilitat del braç dels robots vertebrats acostuma a ser molt més gran que la de les altres estructures de robot industrial (Fig. 13b). Els robots vertebrats tenen el seu camp d'aplicació en tasques que demanen accessibilitats molt difícils amb altres tipus d'estructura de braç.

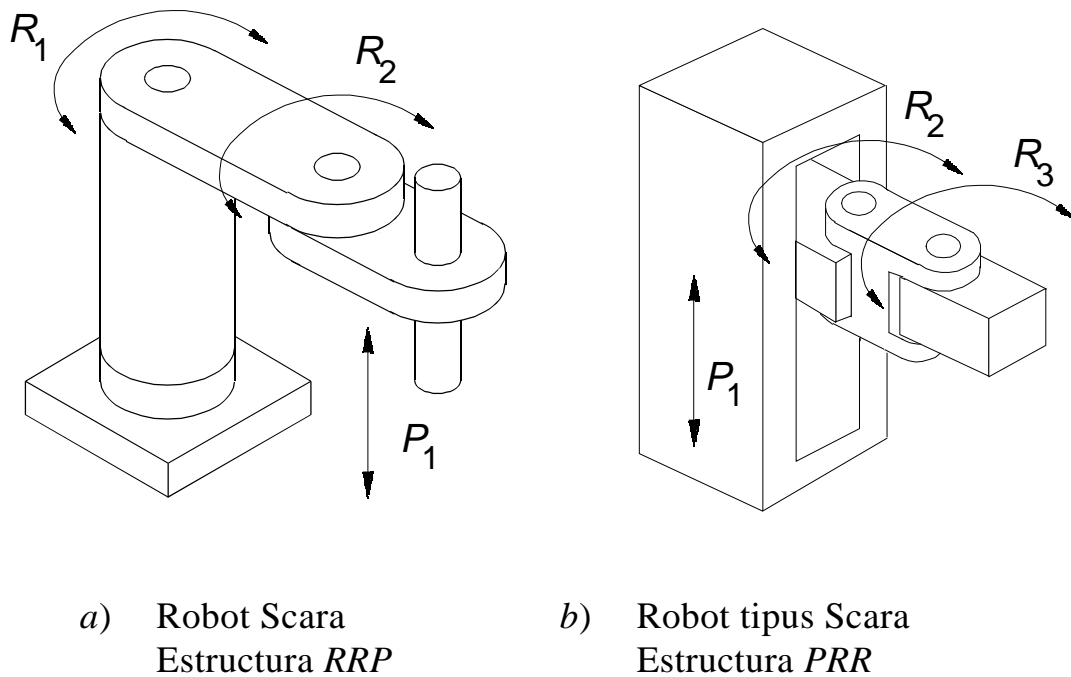


Figura 2.12

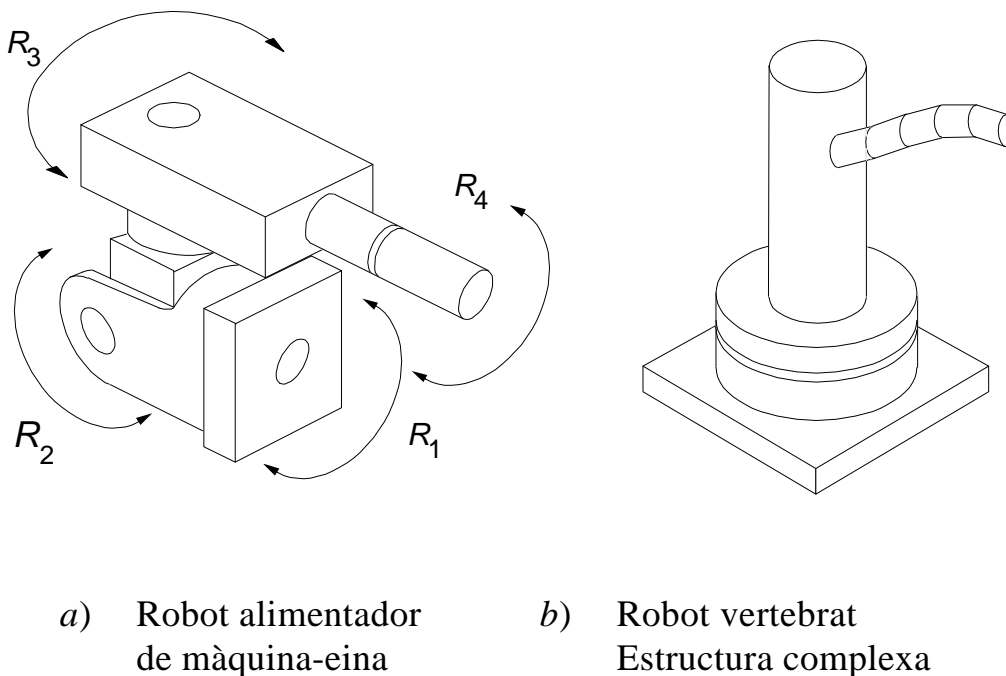


Figura 2.13

Estructures de punys

El puny és la part de l'estructura articulada del robot industrial més allunyada de la base (de la quarta articulació en endavant), que té per funció principal l'*orientació* del terminal, tot i que també intervé en el seu posicionament. L'últim element del puny acaba amb la *interfície mecànica del puny* on, per mitjà d'una platina cargolada o un altre element d'unió (*acoblament de terminal*), es fixa al terminal (Fig. 2.14). Així, doncs, les *poses* recorregudes per l'últim element del puny i pel terminal són les mateixes.

En funció del tipus i complexitat de la *tasca* que ha de realitzar el robot industrial, el puny té una estructura d'1 a 3 elements articulats (sempre amb articulacions de revolució), que li confereixen un grau de mobilitat també d'1 a 3 (Sec. 2.4). Quan el puny té més d'una articulació, els eixos (almenys els dos primers) acostumen a intersectar-se i determinen el *punt de referència del puny*.

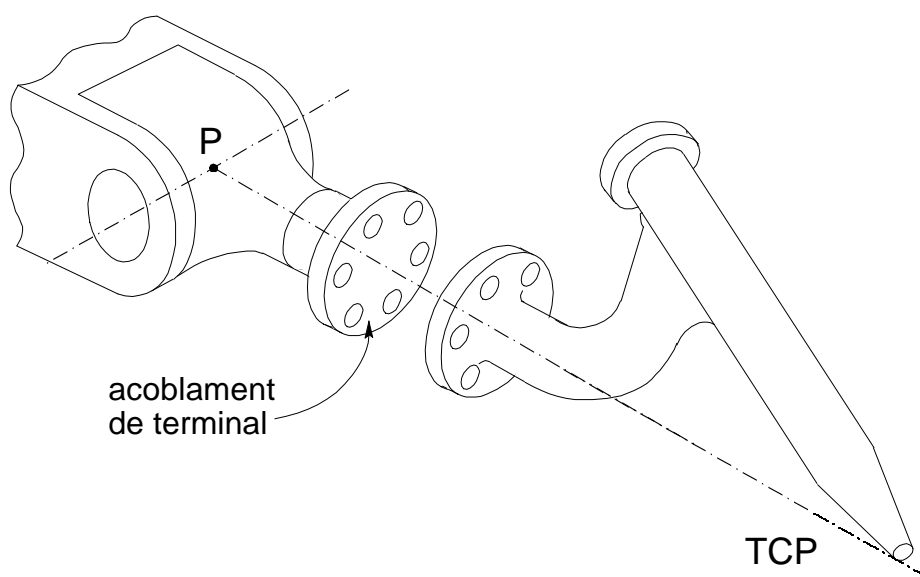


Figura 2.14

1 Punys de 1 eix

Són incorporats en robots de 4 eixos, destinats a aplicacions que exigeixen un grau de mobilitat relativament reduït (muntatge pla, aplicació de se-llants, paletització).

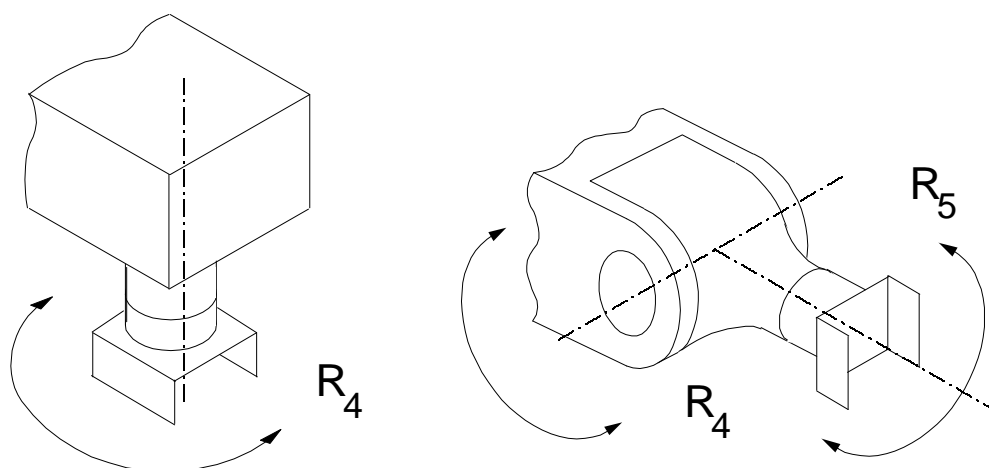
El cas més freqüent és el del puny del robot Scara, consistent en un 4t eix de rotació que coincideix amb el tercer eix prismàtic del braç; les peces, així, s'orienten paral·lelament al pla de treball (Fig. 2.15a).

2. Punys de 2 eixos

Són incorporats en robots de 5 eixos, per a aplicacions en què és necessari aquest grau de mobilitat (pintura, soldadura per arc, treballs senzills de soldadura per punts, inserció cilíndrica, totes són aplicacions en què es dóna una simetria de revolució).

Aquests punys han estat molt freqüents en els robots de la penúltima generació, però darrerament s'estan substituint per punys de 3 eixos, que confereixen una mobilitat completa al robot industrial.

La figura 2.15b mostra la solució més clàssica de punys de 2 eixos, sistema sovint accionat per mitjà d'un mecanisme diferencial. La necessitat de disposar d'una mobilitat superior es resol, en general, intercalant un nou eix motoritzat extern entre la interfície mecànica del puny i el terminal, solució que, sense ser òptima, resol la reutilització d'aquests robots.



a) Puny d'1 eix

b) Puny de 2 eixos

Figura 2.15

3. Punys de 3 eixos

Són incorporats en robots de 6 eixos, per aplicacions en què és necessària una gran mobilitat del terminal (manipulacions complexes, treballs de soldadura per punts en zones poc accessibles, etc.). És el tipus de puny que tendeixen a incorporar tots els robots de les darrers generacions, a excepció dels robots Scara.

La figura 2.16 mostra tres solucions clàssiques de puny de 3 eixos: *a)* a la primera (Fig. 2.16*a*), els eixos 1 i 3 del puny són coaxials quan l'eix 2 (perpendicular als anteriors) està en la seva posició de referència (per a aquesta configuració es presenta una redundància local, Sec. 2.4)); *b)* la segona solució (Fig. 2.16*b*) és anàloga a la primera, amb l'única diferència que l'eix 2 no és perpendicular als altres dos (generalment forma un angle de 45°), fet que possibilita que pugui donar voltes completes i augmenti la mobilitat del puny; *c)* a la tercera solució (Fig. 2.16*c*) es desplaça lateralment el tercer eix respecte al primer, fet que facilita la situació dels accionaments directament sobre els eixos i amplia l'angle de gir del segon eix.

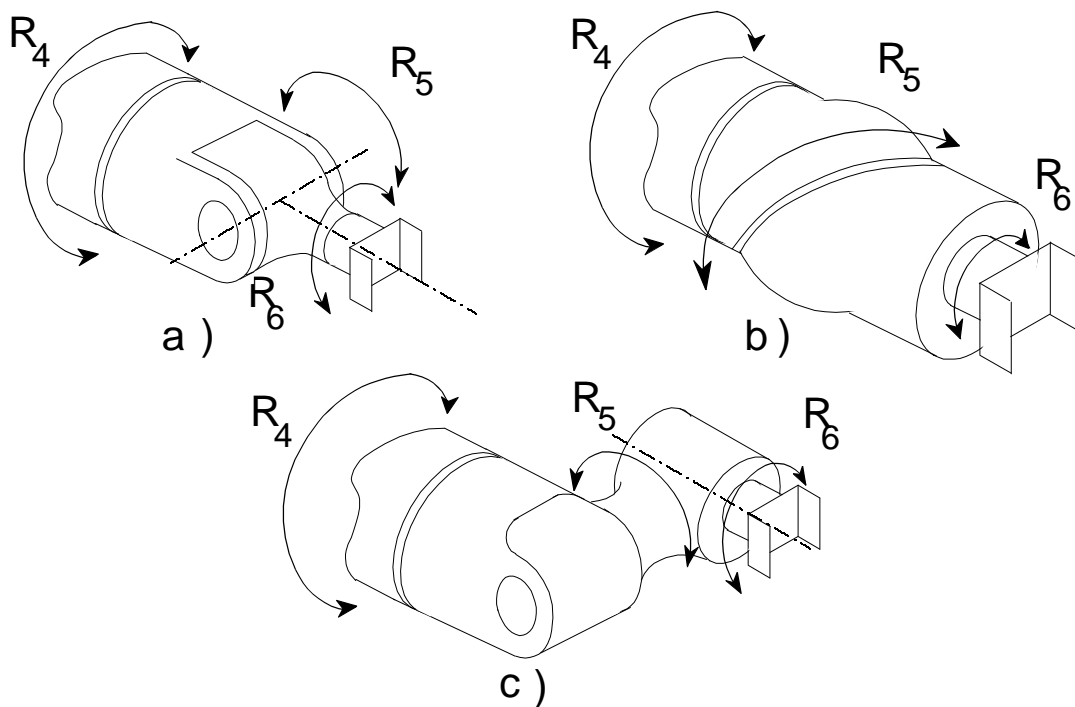


Figura 2.16

2.4 Mobilitat i redundància

Mobilitat i grau de mobilitat

Pren el nom de *configuració* de l'estructura articulada d'un robot industrial el conjunt de poses que adopten cadascun dels seus elements en un moment determinat. En base a aquesta definició, s'anomena *mobilitat* la capacitat de l'estructura articulada del robot industrial (o d'una part) per adoptar un gran nombre de configuracions. El concepte de mobilitat també es pot aplicar a una articulació.

La mobilitat és determinada per dos tipus de paràmetre:

- a) El *grau de mobilitat*, DM , o nombre de variables necessàries per definir una configuració de l'estructura articulada (o una part). En general el grau de mobilitat coincideix amb el nombre d'eixos.
- b) El *camp de mobilitat dels eixos*, és a dir, el camp d'existència d'aquestes variables delimitat per les posicions extremes a què poden arribar els eixos.

Avaluació del grau de mobilitat

Abans d'enllaçar els parells cinemàtics d'un mecanisme d' E elements mòbils, caldrà fixar $6 \cdot E$ variables per determinar totalment una configuració de tots, ara deslligats.

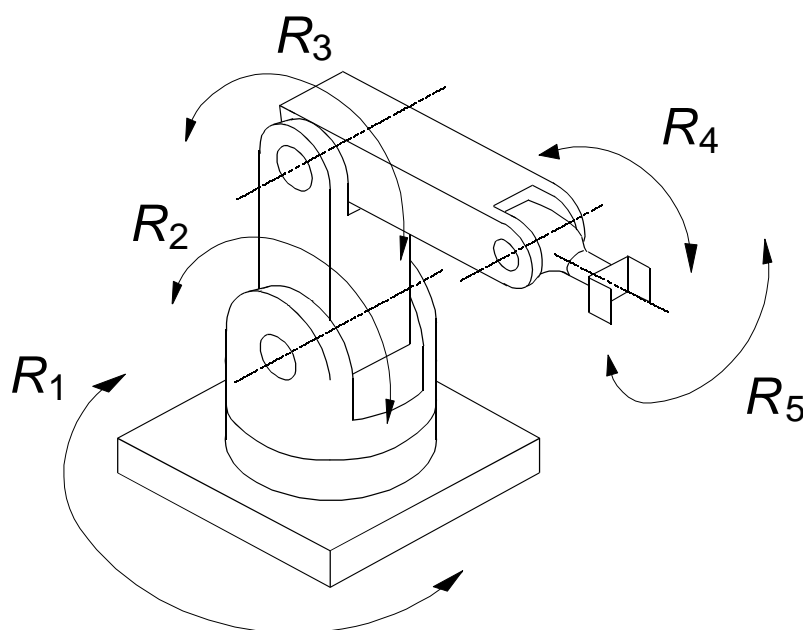
En enllaçar un determinat parell cinemàtic de grau de mobilitat I , aquest restringeix $(6 - I)$ graus de mobilitat en el conjunt del sistema. Si es detrauen els graus de mobilitat eliminats per cada un dels parells cinemàtics del mecanisme (PC_I és el nombre de parells cinemàtics de mobilitat I), restarà el *grau de mobilitat* del mecanisme:

$$DM = 6 \cdot N - \sum_{I=1}^5 ((6 - I) \cdot PC_I) \quad (1)$$

En el robot industrial les articulacions són de grau de mobilitat $I = 1$ i l'estructura articulada és oberta (o, en tot cas, l'estructura articulada equivalent a efectes cinemàtics). A més, el nombre d'elements, E , i el nombre d'articulacions, A , coincideix, amb la qual cosa la fórmula anterior es transforma en

$$DM = 6 \cdot E - (6 - I) \cdot A = E = A \quad (2)$$

Així, doncs, el grau de mobilitat d'un robot industrial d'estructura oberta enllaçada per articulacions és igual al nombre d'eixos, que coincideix amb el d'elements i amb el d'articulacions.



Robot industrial amb 5 elements mòbils i 5 articulacions. Grau de mobilitat: $DM = 5$; grau de llibertat del robot: $DF_R = 5$

Figura 2.17

Grau de llibertat del robot

Es defineix com a *grau de llibertat del robot*, DF_R , el nombre de variables que són necessàries per definir la posa del terminal i el seu moviment.

El grau de llibertat del terminal pot ser com a màxim 6 (màxim grau de llibertat d'un element a l'espai), però pot quedar restringit pel grau de mobilitat de l'estructura

ra articulada del robot. En tot cas, sempre es compleix la relació següent:

$$DF_R \leq DM \quad (3)$$

Si la disposició dels elements i les articulacions ha estat adequadament elegida, el grau de llibertat del robot, DF_R , i el grau de mobilitat de l'estructura articulada, DM , coincideixen.

Grau de llibertat d'una tasca

Es defineix com *grau de llibertat d'una tasca*, DF_T , el nombre de variables independents necessàries per realitzar els moviments del terminal en l'execució d'una tasca.

La *condició de compatibilitat* entre un determinat robot industrial i una determinada tasca s'expressa per mitjà d'establir que el grau de llibertat de la tasca, DF_T , ha de ser igual o més petit que el grau de llibertat del robot, DF_R :

$$DF_T \leq DF_R \quad (4)$$

L'exemple de la figura 2.17 mostra un robot industrial amb una estructura articulada de grau de mobilitat $DM = 5$, i també amb grau de llibertat del robot $DM_R = 5$. Per tant, pot executar, dintre d'un determinat espai de treball (Sec. 3.2) tasques de grau de llibertat $DM_R = 5$ (inserció cilíndrica, soldadura per arc, etc.).

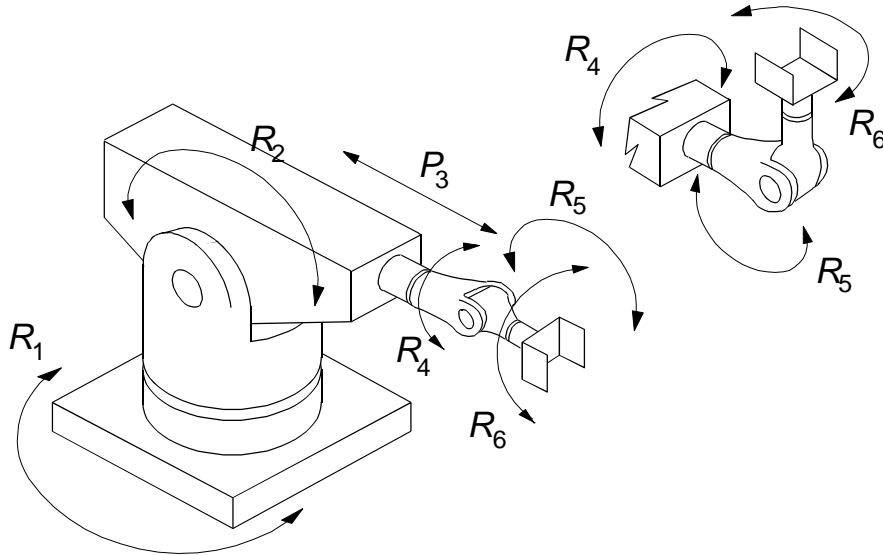
Redundància i grau de redundància

Si per a qualsevol possible configuració es compleix que el *grau de llibertat del robot* coincideix amb el *grau de mobilitat* de l'estructura articulada, $DF_R = DM$, aleshores es diu que l'estructura articulada no és redundant.

En cas contrari, és a dir, quan el grau de llibertat del terminal és més petit que la mobilitat de l'estructura articulada, $DF_R < DM$, es diu que l'estructura articulada és *redundant*.

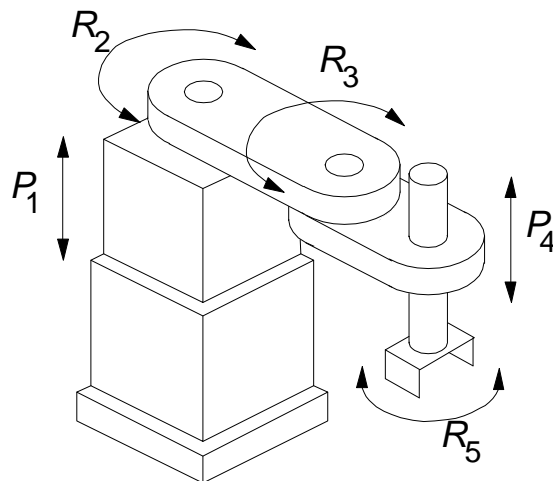
Es defineix com *grau de redundància*, DR , la diferència entre el *grau de mobilitat* i el *grau de llibertat del robot*: $DR = DM - DF_R$.

Es poden donar dos tipus de redundància: *a) redundància local*, quan el grau de mobilitat és més gran que el grau de llibertat del terminal per a determinades configuracions concretes (Fig. 2.18); *b) redundància* (pròpiament dita), quan el grau de mobilitat és sempre més gran que el grau de llibertat, fruit de determinats paral·lelismes entre eixos (Fig. 2.19).



Estructura localment redundant. Les articulacions R_4 i R_6 són o no són en la configuració *b*.
Grau de mobilitat: $M = 6$; grau de llibertat: (a): $DF_R = 5$; (b): $DF_R = 6$.

Figura 2.18



Estructura redundant. Les articulacions P_1 i P_4 són redundants per a qualsevol configuració. Grau de mobilitat: $M = 5$; grau de llibertat del robot: $DF_R = 4$

Figura 2.19

2.5 Accionaments

Un robot industrial té per missió fonamental l'execució de tasques que impliquen el moviment de l'estructura articulada. Per tant, cal un sistema d'accionament capaç de situar el terminal en una posa determinada amb la velocitat i precisió especificades. Reprenent el símil antropomòrfic ja utilitzat, mentre que l'estructura articulada seria l'esquelet del sistema, l'accionament seria la musculatura i el sistema neuro-vegetatiu.

L'*accionament* està constituït per un sistema complex, repartit en part a l'*estructura mecànica* i en part a la *unitat de control*, que inclou els elements següents:

- a) El *motor* (sovint també es parla d'*actuador*)
- b) Les *transmissions*
- c) Els *sensors* (de posició, de velocitat, eventualment de força)
- d) El *controlador*

El motor, les transmissions i els sensors formen part de l'estructura mecànica, mentre que el controlador forma part de la unitat de control. La fi-gura 2.20 mostra una disposició freqüent dels elements del sistema d'ac-cionament lligats a l'estructura mecànica.

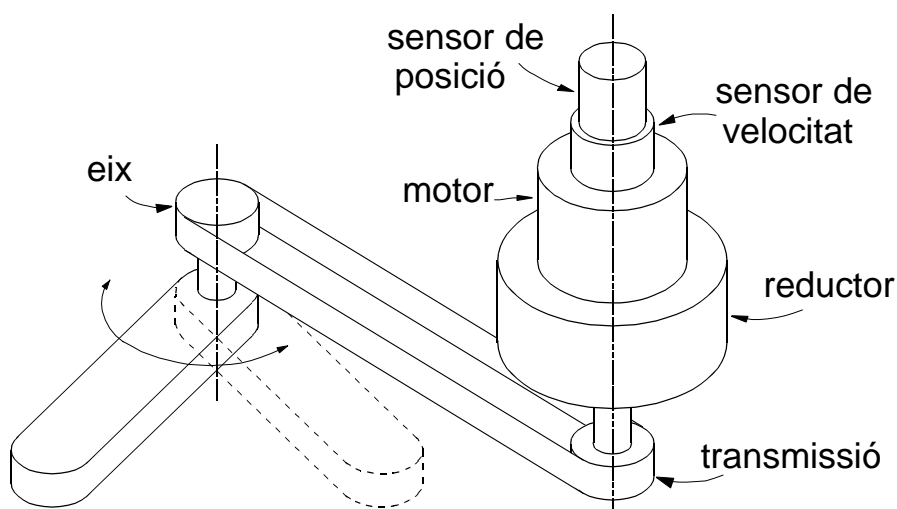


Figura 2.20

L'accionament dels robots és una de les parts que ha experimentat transformacions més importants, malgrat la curta vida (30 anys) d'aquestes màquines; en efecte, s'ha passat de l'accionament hidràulic governat per un controlador analògic a un accionament elèctric governat per un controlador digital basat en un microprocessador.

A continuació es comenten les particularitats de les diferents parts del sistema d'accionament, així com l'evolució més recent.

Motors

Els *motors* del sistema d'accionament d'un robot industrial (també denominats *actuadors*) han de poder seguir un senyal de consigna i, per tant, han de ser controlats en posició i velocitat. Les principals característiques que és convenient que reuneixin són:

- a) Una baixa relació pes/potència (ja que molts són transportats per la mateixa estructura del robot)
- b) Un parell màxim alt (ja que s'aconsegueixen millors acceleracions dels eixos i una capacitat d'ajustar-se a la consigna més gran)
- c) Una velocitat màxima elevada (ja que d'aquesta manera s'aconsegueixen velocitats mitjanes més elevades)
- d) I una inèrcia pròpia molt baixa (ja que d'aquesta manera l'acceleració dels eixos és més elevada).

Les tecnologies bàsiques utilitzades com a *motors* (o *actuadors*) per a robòtica són la *pneumàtica*, la *hidràulica* i l'*elèctrica*, caracteritzades per:

- La *pneumàtica* és adequada per a sistemes de precisió molt baixa i càrregues moderades, però en canvi és d'actuació molt ràpida i la relació pes/potència és baixa.
- La *hidràulica* és adequada per a robots sotmesos a grans acceleracions o a grans càrregues, sempre, però, amb una precisió moderada. La seva relació pes/potència és excel·lent.
- Finalment, l'*elèctrica* ofereix molt bona precisió i possibilitats de control però, a causa de les grans reduccions necessàries, les acceleracions de la càrrega resulten moderades i el pes és elevat.

Els primers robots industrials van començar utilitzant actuadors hidràulics, ja que en aquella època (anys 1960) era la tecnologia més adequada per aquesta aplicació. Ja el 1971, la Universitat de Stanford va desenvolupar un robot d'accionament elèctric, però no va ser fins el 1974 que ASEA va posar al mercat el primer robot comercial d'accionament totalment elèctric, el IRb6.

A partir d'aleshores, la millora contínua de les característiques i prestacions dels motors elèctrics (motors de baixa inèrcia, motors sense escombretes, etc.) ha fet que aquesta tecnologia hagi anat desplaçant paulatinament la hidràulica. Aquest procés sembla que culmina amb el recent llançament dels primers robots de pintura elèctrics, desplaçant el darrer reducte d'aplicació de la hidràulica.

L'accionament pneumàtic queda reservat a sistemes de manipulació que exigeixen, o bé poca precisió, o bé poca versatilitat, essent, tanmateix, la velocitat elevada.

Transmissions

Dintre del concepte de *transmissió* s'engloben tres funcions diferents, totes utilitzades en robòtica:

- a) La primera fa referència al significat del terme: *transmetre a distància* els moviments i les forces. Aquesta funció és d'interès en robòtica, ja que no és convenient desplaçar motors ni altres elements pesants vers el terminal. Alguns exemples són:
 - Transmissió per corretja dentada
 - Transmissió per paral·lelogram articulad (sovint formant part de la mateixa estructura articulada del robot)
 - Transmissió per cable

- b) *Transformar el tipus de moviment* (de giratori a lineal o viceversa, enllaçar moviments d'eixos, etc.). Alguns exemples són:
 - Transmissió per cargol de boles
 - Transmissió per pinyó-cremallera
 - Transmissió diferencial per a puny de 2 eixos

- c) *Modificar les velocitats i forces.* En robòtica s'utilitzen sobretot els reductors per disminuir la velocitat i augmentar el parell, especialment en els motors elèctrics. Alguns reductors utilitzats són:
- Reductor harmònic
 - Reductor cicloidal
 - Diversos tipus de reductors planetaris

Les transmissions per a robòtica han de complir diverses condicions per funcionar correctament: han de tenir poca massa i inèrcia baixa, han de tenir rigidesa elevada i han d'eliminar, en la mesura que sigui possible, els jocs. A més, els reductors han d'admetre velocitats d'entrada elevades i parells màxims alts.

La consideració del conjunt *motor-transmissió* i la seva *situació* en l'estructura mecànica del robot han experimentat importants vicissituds durant la curta vida d'aquestes màquines. Les principals etapes són:

- a) Amb l'ús de sistemes hidràulics, que no necessiten reductors i tenen una relació pes/potència baixa, es va optar per la situació immediata de l'actuador a l'eix accionat.
- b) El desenvolupament dels primers robots elèctrics, amb la necessitat de grans reduccions i amb un elevat pes del conjunt, va fer que els grups motor-reductor es traslladessin prop de la base.

Es va haver de recórrer, doncs, a sistemes de transmissió del moviment i de les forces vers els darrers eixos (estructures articulades complexes amb la inclusió de paral·lelograms, transmissions per corretja o per cadena, llargs eixos que treballen a torsió, etc.).

- c) Amb la millora contínua dels motors elèctrics, s'ha preferit tornar a optar per col·locar els grups motor-reductor en situació immediata als eixos accionats. La darrera tendència apunta vers el desenvolupament de motors d'elevat parell per a l'accionament directe d'eixos.

Això podria fer perdre alguna prestació de velocitat i acceleració al robot, però millora molt en aspectes tals com, per exemple, la rigidesa, la disminució de la inèrcia pròpia, l'eliminació de jocs, i la facilitat de manteniment, aspectes cada vegada més valorats en els robots industrials.

Sensors

En la majoria dels robots industrials el principal interès està centrat en el control de la posa del terminal i eventualment, en el control de la velocitat. Els sensors de posició i de velocitats són utilitzats com a dispositius de retroacció per al sistema de control de l'accionament dels eixos.

Els principals *sensors de posició* utilitzats són:

- Els *potenciòmetres* (basats en una resistència variable) i els *resolvers* (basats en una tensió induïda), que donen un senyal analògic.
- Els *codificadors* (basats en el comptatge d'impulsos fotoelèctrics creats per un disc amb ranures), que donen un senyal digital. Els codificadors poden ser *incrementals* (per comptatge es coneix la posició a partir d'una referència inicial) o *absoluts* (basats en una lectura múltiple que permet conèixer la posició absoluta).

El *sensor de velocitat* més freqüentment utilitzat és la dinamo tacomètrica, que dóna una tensió de sortida proporcional a la velocitat.

La utilització de sistemes de control digital basat en microprocessador dóna avantatge al sistema digital de codificador damunt dels sistemes analògics; fins i tot la velocitat comença a ser avaluada per càlcul a partir de les lectures del codificador.

Controlador

La funció del controlador és comparar el valor real de la variable amb el valor de consigna i originar un senyal de control que tendeixi a corregir aquesta desviació.

És evident l'interès de controlar la posició, funció primària dels robots, però en molts robots també és interessant un control correcte de la velocitat, sobretot quan cal aconseguir bones prestacions dinàmiques en l'acceleració i desacceleració.

En els primers robots el controlador era analògic, generalment del tipus PID (proporcional-integral-derivatiu), a causa de la complexitat del sistema que calia controlar.

A les últimes generacions de robots industrials els càlculs associats a les funcions del controlador són realitzades per un microprocessador. Un avantatge de la utilització del microprocessador és que pot adaptar el control a condicions variables de l'entorn. La utilització de microprocessador obliga a conversions analògico-digitals (A/D), i digitalo-analògiques /D/A), i alhora revaloritza els sensors de mesura digital.

Un esquema del *sistema d'accionament* amb la funció del *controlador* és donada a la figura 2.21.

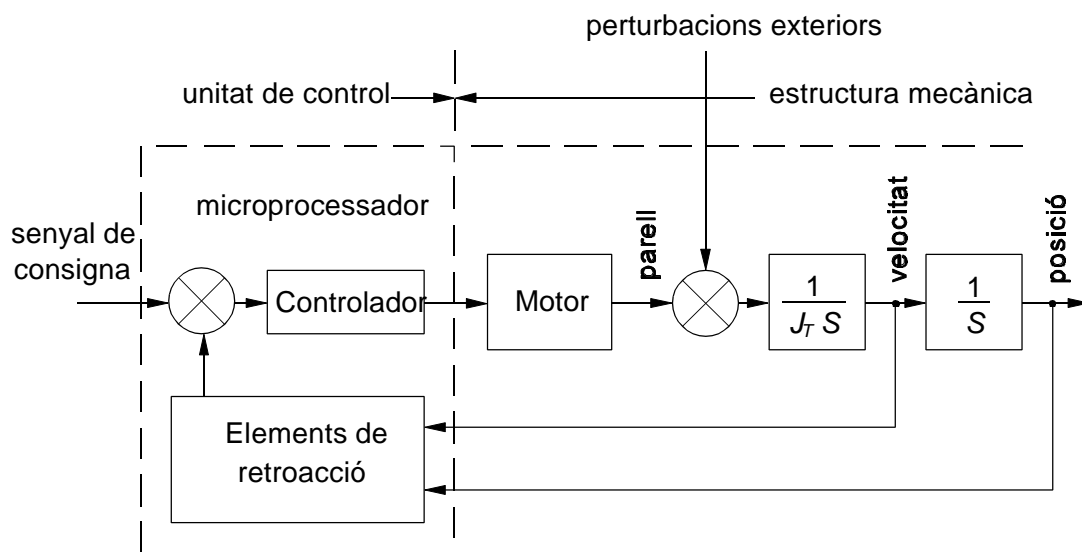


Figura 2.21

3 Característiques i prestacions

3.1 Sistemes de coordenades

Moltes de les característiques i prestacions dels robots industrials estan relacionades amb la capacitat del seu *terminal* per situar-se en una *posa* o per seguir una determinada *trajectòria de poses*. És convenient, doncs, definir un o més *sistemes de coordenades* que permetin referenciar les poses i trajectòries de poses del *terminal* del robot industrial, ja sigui un objecte o una eina (Fig. 3.1).

Prèviament, però, la norma ISO 9787 estableix com a base de referència el *sistema de coordenades de sentit directe*, en el qual el sentit positiu de l'eix, Z, ve donat per la regla de la mà dreta (Fig. 3.1), alhora que els sentits positius de rotació dels tres eixos corresponen al sentit d'avanç d'una rosca cap a la dreta (o la referència amb la mà donada a la Fig. 3.1).

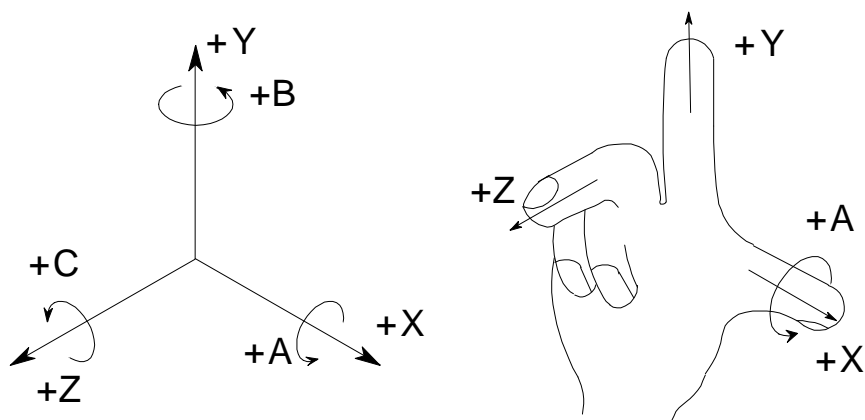


Figura 3.1

Sistemes de coordenades de la norma ISO 9787

a) *Sistema de coordenades de l'entorn (X_o , Y_o i Z_o)*

Sistema de coordenades fixat al sòl de l'entorn del robot industrial, el qual constitueix una bona referència per al mateix robot i per als objectes exteriors al robot. Els elements de referència d'aquest sistema de coordenades són, segons ISO 9787, els següents (Fig. 3.2 i 3.3):

- a1) El centre d'aquest sistema de coordenades és definit per qui l'utilitza segons les seves necessitats.
- a2) Les direccions i sentits dels eixos són determinades de la manera següent:

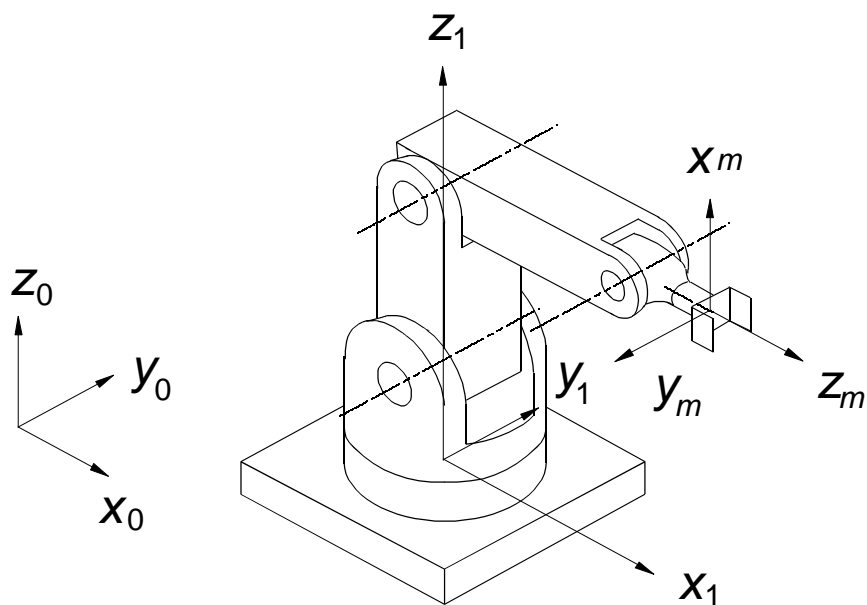
Z_o	Sentit contrari a la gravetat
X_o	Elegit per qui l'utilitza en funció de les seves necessitats
Y_o	Sentit resultant de l'aplicació de la regla de la mà dreta

b) *Sistema de coordenades de la base (X_l , Y_l i Z_l)*

Sistema de coordenades fixat a la base del robot industrial i que constitueix una bona referència per als moviments del mateix robot. Si la base és fixa (no mòbil), aleshores la relació entre el *sistema de coordenades de la base* i el *sistema de coordenades de l'entorn* es defineix per mitjà de paràmetres constants. Els elements de referència d'aquest sistema de coordenades són, segons ISO 9787, els següents (Fig. 3.2 i 3.3):

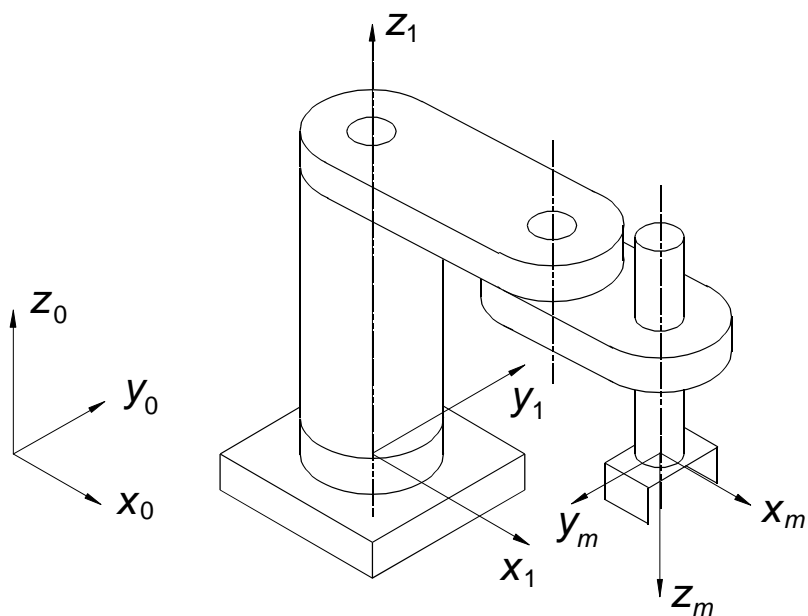
- b1) El centre d'aquest sistema de coordenades és definit pel fabricant del robot industrial
- b2) Les direccions i sentits dels eixos són determinades de la manera següent:

Z_l	Direcció perpendicular a la interfície mecànica de la base, en el sentit de la base vers l'estructura mecànica
X_l	Direcció i sentit orientats vers el centre de l'espai de treball del robot industrial, C_w ; o també el donat pel fabricant
Y_l	Sentit resultant de l'aplicació de la regla de la mà dreta.



Sistemes de coordenades aplicats a un robot angular. L'aplicació als robots cartesià, cilíndric i esfèric dóna la mateixa disposició d'eixos.

Figura 3.2



Sistemes de coordenades aplicats a un robot Scara.

Figura 3.3

c) *Sistema de coordenades del puny* (X_m , Y_m i Z_m)

Sistema de coordenades fixat a la interfície mecànica del puny i que, per tant, constitueix una referència excel·lent per al *terminal*, ja sigui aquest un objecte o una eina. Els elements de referència d'aquest sistema de coordenades són, segons ISO 9787, els següents (Fig. 3.2 i 2.3):

c1) El centre d'aquest sistema de coordenades és definit pel centre de la interfície mecànica del puny

c2) Les direccions i sentits dels eixos són determinades de la manera següent:

Z_m Direcció perpendicular a la interfície mecànica del puny, en el sentit vers el terminal.

X_m Direcció de la intersecció de la interfície mecànica del puny amb el pla $X_l Z_l$ (o paral·lel) quan els eixos primaris i secundaris estan a la seva posició mitjana (en cas que no es pugui aplicar aquest criteri, seran definides pel fabricant). Si X_m i Z_l són paral·lels, tenen el mateix sentit; en cas contrari, X_m s'allunya de Z_l .

Y_m Sentit resultant de l'aplicació de la regla de la mà dreta.

Sistema de coordenades d'usuari

En alguns casos pot ser convenient que l'usuari, o el mateix constructor si el robot està molt orientat vers una determinada aplicació, determinin un nou sistema de coordenades més adequat a l'aplicació.

En general aquest sistema de coordenades de l'usuari està directament lligat a la peça o a l'eina amb la qual s'opera. Per tant, el *sistema de coordenades del puny* i el *sistema de coordenades d'usuari* estan lligats al mateix element (el terminal forma part de l'últim element del robot) i, per tant, el canvi de referència es realitza per mitjà de paràmetres constants.

La figura 3.4 mostra el que podria ser un *sistema de referència d'usuari* per a una torxa de soldadura per arc.

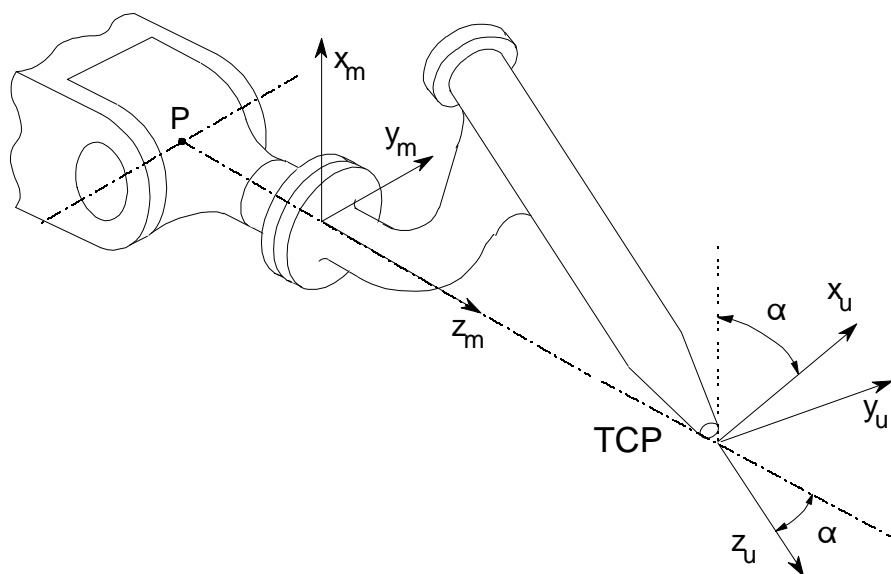


Figura 3.4

Sistema de coordenades articulars

Els sistemes de coordenades anteriorment descrits són independents de l'estructura articulada del robot industrial.

Tanmateix, l'accionament del robot es fa per mitjà dels seus eixos, i per a cada conjunt de valors de posició, o de velocitat, dels eixos del robot determina la posició, o la velocitat, de la *interfície mecànica del puny* i, en conseqüència, del *terminal*. La referència proporcionada del moviment dels eixos s'anomena *sistema de coordenades articulars*.

La transformació entre les *coordenades del puny* i les *coordenades articulars* es realitza per mitjà del mòdul del sistema de control anomenat *operador geomètric*.

Les prestacions d'un robot industrial depenen en gran mesura de la qualitat de l'operador geomètric i, en especial, de la seva velocitat i precisió de càlcul, així com també de les operacions auxiliars que pot realitzar, com ara: interpolacions lineals, circulars, o d'altres; càlcul de velocitats i acceleracions, establiment de punts de pas i de punts d'aturada, etc.

3.2 Espai de treball i accessibilitat

En rigor, l'*espai de treball* es defineix com el conjunt de poses, referenciades en el sistema de coordenades de la base, que pot atènyer la *interfície mecànica del puny* i el *terminal*, el qual constitueix un volum d'un espai de 6 dimensions que inclou la posició i l'orientació.

Quan es parteix d'un robot concret i d'una aplicació concreta, s'acostuma a simular (en funció de sistemes CAE específics per a robots) el moviment (i de vegades també el comportament dinàmic) del robot industrial i el seu terminal, en una modelització de l'entorn real en què operarà. Això permet detectar posicions no possibles, col·lisions eventuais de l'estructura articulada o del terminal amb d'altres objectes, punts en els quals és necessari un canvi de configuració, etc.

Tanmateix, quan es tracta de donar les característiques d'un robot industrial, sense terminal i fora de l'entorn en què treballarà, el tractament d'un espai de 6 dimensions és massa complex i poc intuïtiu.

Per tant, es desdobra aquesta informació en dues parts corresponents a un *espai de treball de posicions* (en un espai de tres dimensions) i a l'*accessibilitat* (que fa referència a les orientacions).

Espai de treball de posicions

Per definir l'*espai de treball de posicions* cal determinar prèviament el punt que servirà de referència.

El constructor prefereix el *punt de referència del puny*, P (intersecció dels dos primers eixos del puny, o bé, en cas que no s'intersectin, punt definit sobre el primer eix del puny (Fig. 3.5 i 3.6)), ja que és intrínsec al robot industrial i es defineix amb independència de qualsevol aplicació concreta.

S'ha convingut a considerar per *espai de treball de posicions* (o simplement *espai de treball*) el volum de 3 dimensions a l'interior del qual es mou el *punt de referència del puny*, P , guiat per l'estructura articulada del robot quan recorre totes les posicions compatibles amb els límits mecànics imposats als eixos primaris o del braç (Fig. 3.5). El punt C_w és el centre de l'espai de treball.

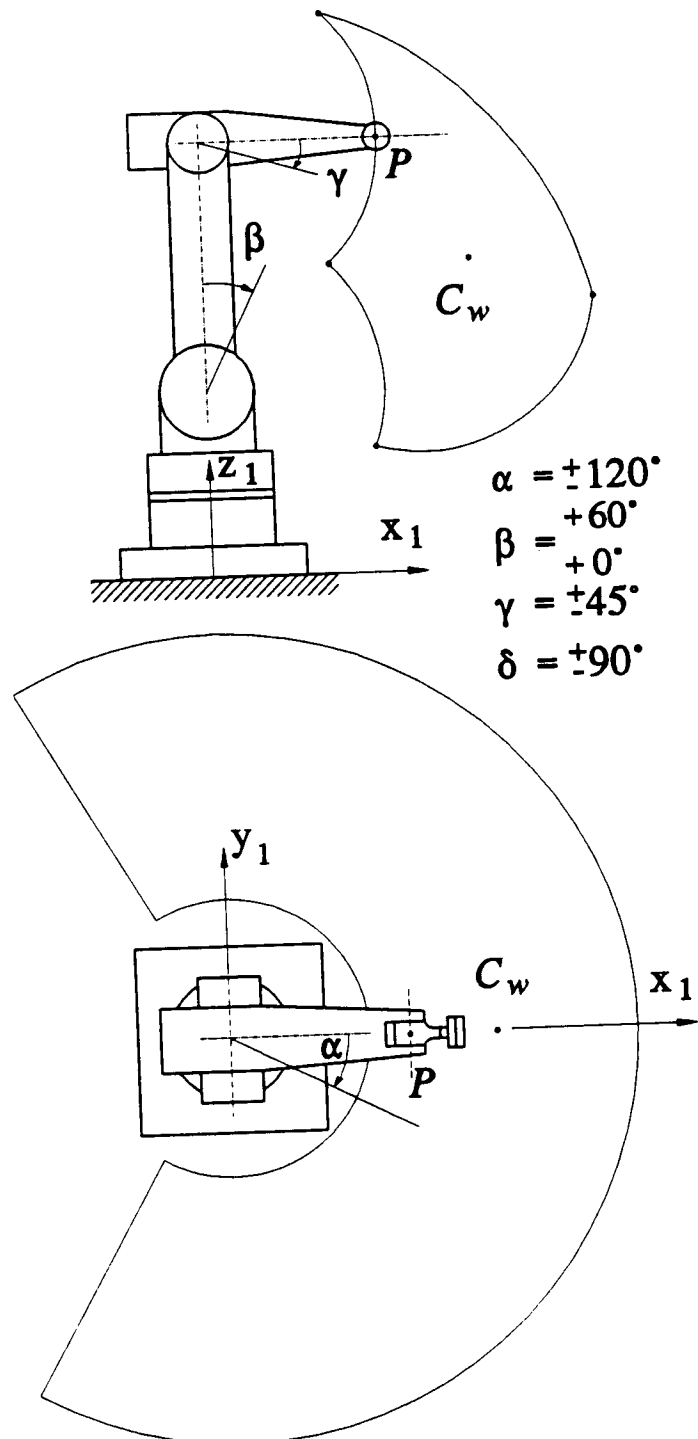


Figura 3.5

Accessibilitat

El concepte d'*accessibilitat* fa referència a la capacitat del robot industrial per orientar el terminal en una direcció determinada, dintre de l'espai de treball, gràcies a les possibilitats de gir dels eixos secundaris o del puny.

L'accessibilitat interessa especialment a l'usuari del robot industrial. Per tant, convé prendre el *punt de referència del terminal* (en anglès *tool center point*, *TCP*, punt real o virtual, representatiu del terminal per a una aplicació determinada, fixat en el sistema de coordenades del puny (Fig. 3.6)), ja que està directament relacionat amb la tasca que cal realitzar (punt mitjà de la pinça, de la pinça de soldadura per punts, punta de la torxa de soldadura per arc, de la pistola de pintura, etc.).

Com és fàcil de comprendre, el *punt de referència del terminal*, *TCP*, allunya't del *punt de referència del puny*, *P*, recorre un espai de treball més ample, però en general les possibilitats d'orientació són més restringides.

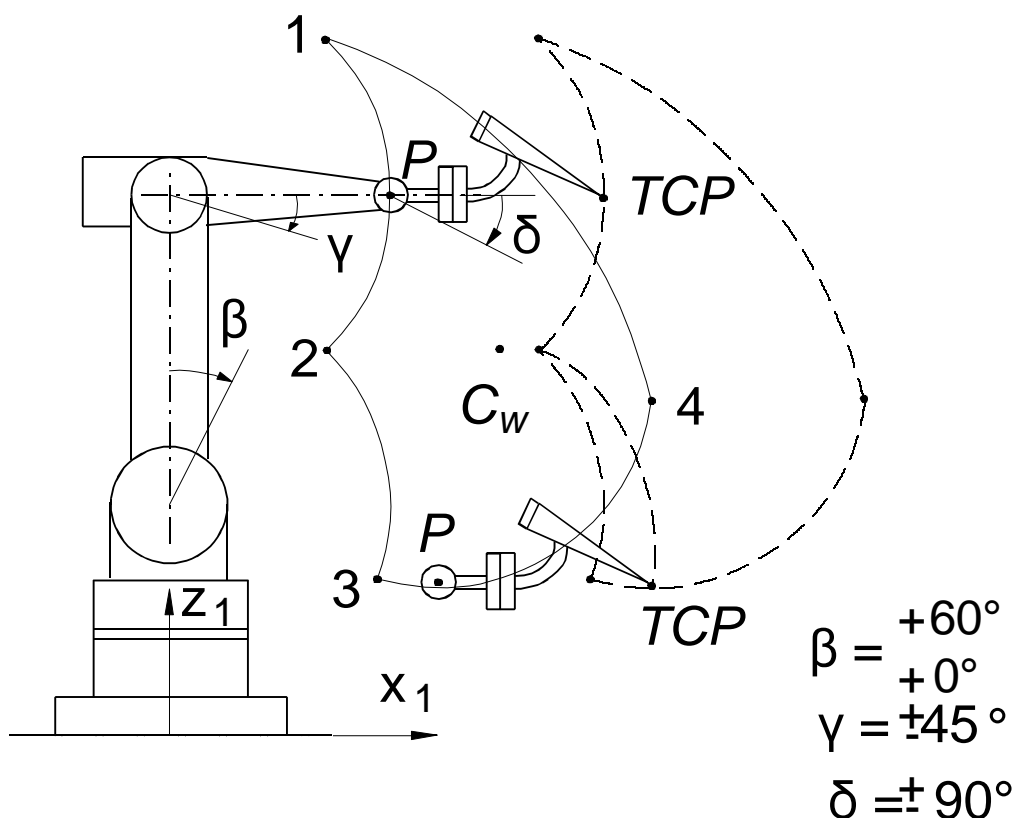


Figura 3.6

A la figura 3.6 hi ha representat l'*espai de treball de posicions* (línia contínua) i l'*espai de treball de terminal* recorregut pel *punt de referència del terminal, TCP*, amb *accessibilitat horitzontal* (l'eina situada horitzontalment).

Com es pot observar, aquest nou *espai de treball de terminal* amb *accessibilitat horitzontal* està allunyat de l'altre cap enfora la longitud de l'eina, però, a més, ha experimentat una retallada a la seva part inferior causada per la no disponibilitat de gir suficient en els eixos del puny.

La representació de nous *espais de treball de terminal* amb noves *accessibilitats* segons diferents orientacions (terminal orientat amunt, avall, amb diferents inclinacions, etc.) donaria diferents volums en distintes posicions respecte al robot, i amb diferents restriccions a causa de les limitacions dels girs dels eixos del puny.

Simulació de l'aplicació

El fabricant tan sols proporciona la figura, generalment en planta i alçat, on estan representades les projeccions de l'*espai de treball de posicions* del robot industrial. La norma fins i tot recomana l'especificació de les coordenades dels punts singulars d'aquest espai (punts 1, 2, 3, 4 etc., a la Fig. 3.5), agrupades en forma de taula.

Però, com ja s'ha vist, aquesta informació dóna tan sols una idea aproximada dels moviments possibles de l'estructura articulada del robot industrial. La informació útil per una aplicació, els *espais de treball de terminal* amb restriccions d'*accessibilitat*, els ha de determinar el mateix usuari en funció del terminal utilitzat.

Un mètode elemental per realitzar un primer tempteig d'aquest estudi consisteix a fer diverses representacions anàlogues a la de la Figura 3.6, amb l'ajut d'un CAD-2D, però resulta un procediment molt laboriós i presenta dificultats d'anàlisi dels girs del puny no continguts en el pla.

Avui dia aquest tipus d'anàlisi, juntament amb d'altres treballs de l'enginyeria d'implantació, es realitza amb més eficàcia per mitjà d'algun dels sistemes de CAE-robòtica, que permeten la simulació de moviments i seqüències en l'entorn d'un model del sistema robòtic que s'estudia (Cap. 6).

3.3 Càrrega nominal i càrrega límit

La càrrega es defineix com la *força* i el *parell de forces* aplicats a la *interfície mecànica del puny* que resulten, en unes condicions de velocitat i acceleració especificades, de les *forces estàtiques* causades pels pesos i pel contacte del terminal (o peça subjectada) amb l'exterior, i de les *forces dinàmiques* funció de les inèrcies del terminal (i peça subjectada), suportades pel robot industrial.

La norma ISO 9946 especifica que les característiques de la càrrega s'han de donar en termes de

Efectes estàtics:	<i>força</i>	(N)
	<i>parell de forces</i>	(N·m)
Efectes dinàmics:	<i>massa</i>	(kg)
	<i>moment d'inèrcia</i>	(kg·m ₂)

referenciats respecte al sistema de coordenades de la interfície mecànica del puny. La figura 3.7 proporciona les delimitacions que ha de fornir el fabricant sobre els conceptes relacionats amb la càrrega.

A partir d'aquests conceptes s'estableixen les definicions següents:

- a) *Càrrega nominal*. Càrrega màxima que es pot aplicar a la interfície mecànica del puny, en condicions normals de funcionament (quant a velocitats i acceleracions) sense que es degradi cap de les prestacions del robot industrial anunciades pel fabricant.

En general la *càrrega nominal* és especificada simplement en termes de massa; si aquesta és molt concentrada i està situada prop del centre de la interfície mecànica del puny, no es presentarà cap més problema a l'aplicació.

Tanmateix, si aquesta massa està allunyada de la interfície mecànica del puny, o bé té un moment d'inèrcia important, aleshores caldria delimitar aquests dues qüestions (Taules 1 i 2 de la Fig. 3.7).

- b) *Càrrega límit*. Càrrega màxima que es pot aplicar a la interfície me-cànica

del puny, en condicions de funcionament restringides (quant a velocitats i acceleracions) sense que es deteriori l'estructura mecànica (elements, eixos, motors o transmissions).

La càrrega límit ha de ser especificada amb més precisió i, amb aquesta finalitat, s'estableixen els conceptes següents:

- b1) *Força màxima.* Força màxima de qualsevol direcció (resultant, entre d'altres, del pes), amb exclusió dels efectes d'inèrcia, que es pot aplicar de manera contínua a la interfície mecànica del puny sense que es produeixi una deterioració permanent de l'estructura mecànica (Taula 3 de la Fig. 3.7).
- b2) *Parell de forces màxim.* Parell de forces màxim de qualsevol direcció (resultant, entre d'altres, del descentrament del pes), a exclusió dels efectes d'inèrcia, que es pot aplicar d'una manera contínua a la interfície mecànica del puny sense que es produeixi un deteriorament permanent de l'estructura mecànica (Taula 3 de la Fig. 3.7).

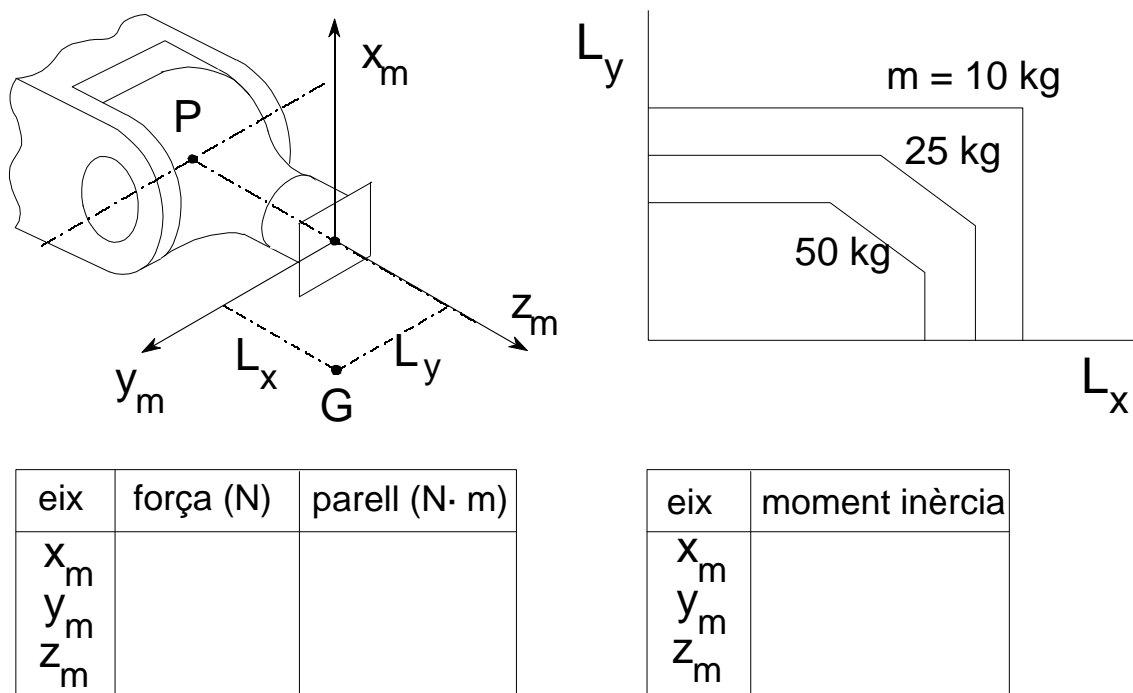


Figura 3. 7

3.4 Repetibilitat i precisió

El concepte de *repetibilitat* fa referència a la separació màxima que reben els valors (entre ells mateixos) d'un determinat paràmetre (posa, trajectòria, velocitat) quan una operació és repetida un determinat nombre de vegades sota les mateixes condicions.

El concepte de *precisió* fa referència a la desviació màxima del *valor mitjà* que rep un determinat paràmetre (posa, trajectòria, velocitat) respecte a un *valor de consigna* prefixat, quan una operació és repetida un determinat nombre de vegades sota les mateixes condicions.

La descripció de dues operacions de desplaçament del punt de referència del terminal *TCP* entre dues posicions estàtiques pot aclarir els conceptes.

- a) En primer lloc, es desplaça el terminal des de la posició *A* fins a la *B* en mode manual, això és, conduït per un operador humà (*programació per guiatge*, vegeu Sec. 3.5). Després, ja en mode automàtic, es fa repetir diverses vegades aquest desplaçament.

Es mesuren acuradament les poses d'arribada del punt de referència del terminal *TCP*, pròximes al punt d'arribada inicial, *B*. El diàmetre de la mínima esfera que inclou totes les posicions d'arribada del punt *TCP* és la definició de *repetibilitat* (Fig. 3.8).

- b) I, en segon lloc, es programa el moviment de desplaçament entre el punt *A* i el punt de consigna, *B*, mitjançant un llenguatge (*programació per llenguatge*, vegeu Sec. 3.5) i, ja en mode automàtic, també es fa repetir diverses vegades aquest desplaçament.

Es mesuren acuradament les posicions d'arribada del punt de referència del terminal *TCP* i se'n calcula el valor mitjà, B_M . La distància entre el punt mitjà, B_M , i el punt de consigna, *B*, rep el nom de *precisió* (Fig. 3.8).

Així, doncs, una bona *repetibilitat* és una condició molt desitjable en tots els robots, i especialment en els robots *programats per guiatge*, mentre que la *precisió* es fa necessària en els robots *programats per llenguatge*.

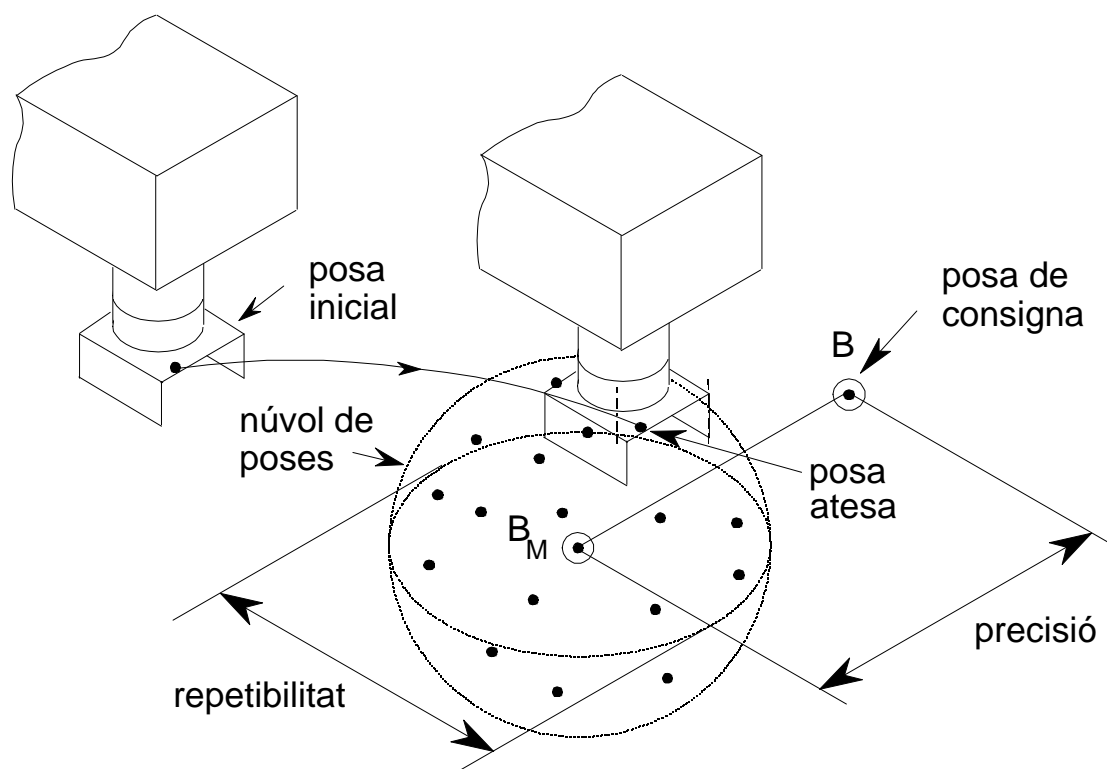


Figura 3.8

Els anteriors conceptes sobre *repetibilitat* i *precisió* tenen una concreció a la norma ISO 9283 aplicats a diferents tipus de variable. A continuació se'n donen unes definicions simplificades, fixant primer els termes següents:

Posa inicial: Posa des de la qual s'inicia un moviment fins a una altra posa.

Posa de consigna: Posa que s'especifica, com a punt final d'un moviment, per mitjà de programació per guiatge (Sec. 3.6) o per programació explícita (Sec. 3.6).

Posa atesa: Posa aconseguida com a resposta real del robot a una determinada posa de consigna.

Núvol de poses: Conjunt de poses ateses, corresponents a la mateixa posa de consigna, en repetir un determinat nombre de vegades el mateix moviment.

Repetibilitat

Repetibilitat de posa monodireccional. Separació màxima entre les posicions i orientacions mesurades per a una mateixa posa de consigna quan segueixen la mateixa trajectòria repetida un nombre determinat de vegades.

Repetibilitat de posa multidireccional. Separació màxima entre les posicions i orientacions mesurades per a una mateixa posa de consigna quan segueixen una diversitat de trajectòries repetides cada una un nombre determinat de vegades.

Repetibilitat de trajectòria. Separació màxima entre un nombre determinat de trajectòries obtingudes a partir de seguir-la un nombre determinat de vegades. Es mesura pel radi de la mínima superfície cilíndrica que les inclou totes.

Repetibilitat de velocitat de trajectòria. Separació màxima entre un nombre determinat de velocitats de trajectòria obtingudes en les mateixes condicions. Es mesura pel valor triple de la desviació tipus de les variacions de la velocitat.

Precisió

Precisió de posa local. Desviació entre la posició i l'orientació de la posa de consigna i el valor mitjà d'un determinat nombre de poses ateses obtingudes seguint la mateixa trajectòria repetida un nombre determinat de vegades.

Precisió de biposa (o de distància). Comparació de la distància i de les diferències d'orientació entre dues poses programades (*programació per llenguatge*) i dues poses ateses obtingudes seguint la trajectòria un nombre determinat de vegades.

Precisió de trajectòria. Desviació entre les posicions i orientacions mesurades d'una trajectòria de consigna i les de la mateixa trajectòria recorreguda un nombre determinat de vegades.

Precisió de velocitat de trajectòria. Desviació entre una velocitat de trajectòria consigna i la mitjana d'un nombre determinat de

velocitats de trajectòria mesurades en ser recorreguda la trajectòria un determinat nombre de vegades en les mateixes condicions.

Resolució

Concepte relacionat amb la *repetibilitat* i la *precisió* que es defineix com la distància més petita, o l'angle més petit, que pot ser efectuat per cada eix del robot. Ha de ser especificat en mil·límetres, radiants o graus.

3.5 Velocitat i acceleració

La *velocitat* és una de les característiques importants per avaluar un robot industrial en el moment de dissenyar una aplicació. En efecte, d'una banda, la *velocitat màxima* té una influència decisiva en l'avaluació dels temps per a grans desplaçaments. D'altra banda, un bon *control de velocitat* és fonamental en determinades aplicacions.

De manera anàloga, l'*acceleració* també és un paràmetre fonamental en l'avaluació d'un robot industrial. En efecte, d'una banda l'*acceleració màxima* és el paràmetre que determina el temps en desplaçaments curts. D'altra banda, l'*acceleració màxima* també és determinant en el disseny de les pinces de subjecció, a fi de preveure que els objectes subjectats no es despreguin a causa de les forces d'inèrcia.

A partir d'aquests conceptes es poden establir les definicions següents:

Velocitat

Velocitat d'eix. És la velocitat de desplaçament, angular o lineal, d'un eix individual.

Velocitat de trajectòria. És la velocitat d'un punt al llarg d'una trajectòria especificada, obtinguda per control de trajectòria contínua, que genera components de velocitats dels diversos eixos. Es defineix, ja sigui per al centre de la *interfície mecànica del puny*, ja sigui pel *punt de referència del terminal*.

Si no hi ha especificació en sentit contrari, la velocitat de trajectòria s'ha d'entendre com la velocitat màxima que compleix

les exigències de precisió.

Acceleració

Acceleració d'eix. És l'acceleració necessària per generar el moviment d'un eix individual.

Acceleració de trajectòria. És l'acceleració obtinguda per control de trajectòria contínua i generada a partir de components de velocitat (acceleracions de Coriolis) i d'acceleració dels diversos eixos, de manera que el centre de la *interfície mecànica del puny* o el *punt de referència del terminal* arribi a la velocitat desitjada al llarg de la trajectòria requerida.

Especificacions segons norma

La velocitat dels diferents eixos d'un robot industrial acostuma a ser una de les prestacions especificades en els catàlegs comercials. La norma ISO 9946 estableix unes especificacions normatives per indicar la velocitat:

La velocitat ha de ser indicada seguint les condicions següents:

- Per mitjà d'una relació constant de distància, o angle, per unitat de temps, sempre que no hi intervingui cap acceleració;
- Tot aplicant la càrrega nominal.

El fabricant ha d'especificar, com a mínim, a la seva documentació:

- La *velocitat d'eix* màxima per a cada eix
- La *velocitat de trajectòria* nominal, així com la forma de la trajectòria

3.6 Programació i control

Les possibilitats de programació i de control d'un robot industrial constitueixen una part fonamental de les seves prestacions.

La *programació de tasques* és el procés per mitjà del qual s'elabora el *programa de tasca* d'un sistema robòtic, i el *sistema de control* és el conjunt de sistemes electrònics i informàtics que generen les ordres d'actuació del sistema robòtic d'acord amb el *programa de tasca*, i en verifiquen i asseguren el compliment.

Nivells de programació

Es poden classificar els sistemes de programació dels robots industrials en tres nivells:

- 1 *Nivell d'articulació.* La *tasca* es descriu a partir de definir les diferents posicions que han d'adoptar els eixos del robot per realitzar els moviments. És el nivell de programació més pròxim a la màquina, i no fa necessària la transformació de coordenades per part del controlador.
- 2 *Nivell de terminal.* La *tasca* es descriu a partir de definir els diferents moviments que ha de realitzar el terminal. És un nivell superior de programació que exigeix la transformació de coordenades per donar les ordres sobre els accionaments.
- 3 *Nivell d'objecte.* La *tasca* es descriu tot definint les operacions que ha de realitzar el robot industrial. No s'especifiquen ja els moviments concrets del terminal, que hauran de ser generats pel sistema de control.
- 4 *Nivell d'objectiu.* La *tasca* es descriu en termes dels resultats que es volen obtenir. Aquest nivell de programació va dirigit a la gestió d'un sistema automatitzat complex i demana recursos de la *intel·ligència artificial*.

Formes bàsiques de programació dels moviments

Els robots industrials presenten dues formes bàsiques de programació, relacionades amb la forma de determinar les posicions i els moviments:

A *Programació per guiatge* (també *gestual*). Un operador humà guia el robot seguint els punts i trajectòries necessàries per a l'execució de la *tasca*, i indica les funcions auxiliars que haurà d'executar, mentre el sistema les enregistra. La mateixa estructura articulada efectua la transformació de coordenades entre les que dóna l'operador en funció del guiatge, i les coordenades articulars, captades pels sensors de posició dels eixos. En aquest sistema de programació té importància la *repetibilitat*. La programació per guiatge correspon al *nivell 1* dels descrits anteriorment.

La programació per guiatge pot ser realitzada de dues formes:

Programació per guiatge motoritzat, on l'operador actua sobre la *cònsola de guiatge*.

Programació per guiatge manual, on l'operador actua directament movent l'estructura del robot, o una rèplica més lleugera, o *maniquí*.

B *Programació per llenguatge* (també *textual*). El programador especifica el *programa de tasca* per mitjà d'un llenguatge de programació. En aquest sistema té importància tant la *precisió* com la *repetibilitat*.

La programació per llenguatge també té dues formes diferents:

Programació explícita, en la qual s'especifiquen completament les poses o les trajectòries del terminal, així com les funcions auxiliars que ha d'executar el sistema robòtic. La programació explícita pot correspondre al *nivell 1* dels descrits anteriorment, però més freqüentment al *nivell 2*.

Programació implícita, en la qual no s'especifiquen, en general, ni les poses ni la trajectòria del terminal ni altres funcions auxiliars, ja que aquestes són generades pel mateix sistema de control a partir d'una definició més general de tasca. La programació implícita correspon als *nivells 3 i 4* descrits anteriorment.

Sistemes de control

El robots industrials poden tenir dos tipus bàsics de control:

Control posa a posa (o control PTP). És un control mitjançant el qual cada moviment es desenvolupa a partir d'instruccions que només especifiquen la posa següent.

És el tipus de control adequat per a *tasques* que exigeixen la immobilització del terminal en determinades poses on es realitza una acció (càrrega/descàrrega de màquines, paletització, soldadura per punts, etc.).

Control de trajectòria contínua (o control CP, continuous path). És un control que s'exerceix de manera coordinada sobre dos o més eixos i que s'executa segons instruccions que especifiquen la posa següent, normalment obtinguda per interpolació sobre la trajectòria desitjada, i que controla també la velocitat d'avanç vers aquesta posa.

És el tipus de control adequat per a *tasques* que exigeixen el seguiment de trajectòries amb velocitat controlada (soldadura per arc, pintura, aplicació de segelladors, etc.).

Especificacions segons norma

Sobre la programació i el control la norma ISO 9946 estableix les especificacions normatives següents:

El fabricant ha d'especificar el mètode de programació. Per exemple:

- Programació per introducció manual de dades
- Programació per guiatge manual, o amb cònsola de guiatge
- Programació per guiatge amb cònsola de guiatge
- Programació per llenguatge explícita
- Programació implícita, etc.

El fabricant també ha d'especificar sobre el control del robot:

- Tipus d'unitat de control i totes les informacions útils a l'usuari.
- Emmagatzematge de programes. Capacitat del sistema bàsic.
Possibilitats d'expansió

- Tipus de control dels moviments:
 - Control en anell obert, control en anell tancat
 - Control posa a posa, control de trajectòria contínua
- Mètode d'interpolació: lineal, circular, altres
- Òrgans de control, amb la cònsola de guiatge si és el cas.
- Interfícies d'entrada/sortida:
 - Tipus i nivells dels senyals
 - Senyal continu o senyal multiplexat
- Interfícies de xarxa per a intercanvi de dades:
 - Característiques físiques
 - Formats de les dades i del control

Bibliografia

- AUTOMATIZACIÓN INTEGRADA & REVISTA DE ROBÓTI-
CA (Nº 68) *Parque de Robots 1991. Crecimiento moderado de las instalaciones de robots*. PULSAR, Barcelona, maig de 1992.
- BLAS, M.; MATEU, M.R.; PICÓ, R.M.; RIBA, C. *Diccionari de robòtica industrial (Català / Castellà / Francès / Anglès)*. UPC, Barcelona, 1991.
- DEVIMEUX, J.P.; HOESSLER, B.; MUNIER C.; ORRIOLS M. *Dispositifs de préhension pou la robotique. Règles de conception et de choix*. CETIM, Saint-Étienne, 1988.
- ENGELBERGER J., *Los robots industriales en la práctica*. Ediciones Deusto S.A., Bilbao, 1985.
- FERRATÉ, G.; (i altres) *Robótica Industrial*. Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1986.
- FU, K.S.; GONZÁLEZ, R.C.; LEE, C.S.G. *Robótica. Control, detección, visión e inteligencia*. McGraw-Hill, Madrid, 1988.
- GIORDANO, M.; LOTTIN, J. *Cours de robotique. Description et fonctionnement des robots industriels*. Armand Colin, París, 1990.
- GROOVER, M.P.; WEISS, M.; NAGEL, R.N.; ODREY, N.G. *Robótica Industrial. Tecnología, Programación y Aplicaciones*. McGraw-Hill, Madrid, 1989.
- IFR (International Federation of Robotics). *Statistics* (1988, 1989, 1990 i 1991). Estocolm, 1989, 1990, 1991 i 1992.
- ISO/TR 8373 *Robots manipulateurs industriels - Vocabulaire*

- (Robots manipuladors industrials - Vocabulari), 1988.
- ISO 9401-1 *Robots manipulateurs industriels - Interfaces mécaniques. Partie 1 : Interfaces circulaire* (Robots manipuladors industrials - Interfícies mecàniques. Part 1: Interfícies circulars), 1988.
- ISO 9283 *Robots manipulateurs industriels - Critères de performance et méthodes d'essai correspondants* (Robots manipuladors industrials - Criteris sobre prestacions i mètodes d'assaig corresponents), 1990.
- ISO 9787 *Robots manipulateurs industriels - Système de coordonnées et mouvement* (Robots manipuladors industrials (Sistemes de coordenades i moviment), 1990.
- ISO 9946 *Robots manipulateurs industriels - Présentation des caractéristiques* (Robots manipuladors industrials - Presentació de característiques), 1991.
- LÓPEZ, P.; FOULC, J.N. *Introduction à la robotique* (volums 1 i 2). Editests, París, 1984.
- NOF, Sh.Y.(Editor) *Handbook of Industrial Robots*. John Wiley & Sons, 1985.
- PRIEL, M. *Les robots industriels. Caractéristiques, performances et choix*. AFNOR technique, París, 1990.
- YONEMOTO, K. *Robotization in Japan. Socio-economic impacts by industrial robots*, JIRA (Japan Industrial Robot Association), Tòquio, 1990.