

# Simulador Cinemàtic per a l'Aprensió Destra d'Objectes

Xavier SIERRA, Leo PALOMO, Jan ROSELL i Raúl SUÁREZ

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, IOC-UPC, Barcelona, e-mail : jan.rosell@upc.es

**Resum**—L'article presenta i detalla el simulador Qilex, que permet realitzar la simulació cinemàtica del conjunt format per un braç i una mà robòtics, de manera que es resol tant la cinemàtica directa (que permet posicionar i orientar les puntes dels dits si es coneixen les variables d'articulació) com la cinemàtica inversa (que permet determinar les variables d'articulació un cop conegudes la posició i orientació de les puntes dels dits). La solució proposada per resoldre aquest segon punt està basada en un mètode d'optimització iteratiu que consecutivament mou l'articulació que millor contribueix a reduir la distància entre les puntes dels dits i les configuracions desitjades. El mètode ha estat desenvolupat per al cas concret d'un robot Stäubli RX90 i la mà mecànica amb quatre dits MA-I, desenvolupada al Laboratori de Robòtica de l'IOC.

## I. INTRODUCCIÓ

Les mans mecàniques s'incorporen als robots per tal de fer-los més flexibles i per tal d'ampliar els tipus de tasques que poden dur a terme. Aquest fet implica molts problemes específics de planificació i control. El primer problema a tractar és determinar els punts d'aprensió idonis per a un determinat objecte [8], és a dir, on s'haurien de col·locar els dits i en quina direcció caldria exercir les forces per tal d'aprehendre correctament l'objecte? Quan l'objecte que ha de ser aprehès se situa en la cel·la de treball, aquesta qüestió també involucra el problema cinemàtic invers del conjunt braç-mà, és a dir, quin és el valor de les variables d'articulació que situen els extrems dels dits a les posicions i orientacions especificades per tal de realitzar l'aprensió de l'objecte satisfactòriament? Aquest és un problema complex degut al gran nombre de graus de llibertat i a l'estructura d'arbre de la cadena cinemàtica.

L'eina desenvolupada per tal de donar respostes a aquest complicat problema és el simulador Qilex [9]. Aquest simulador, de caràcter lliure, permet calcular la cinemàtica inversa d'una estructura arbrada com la formada per un braç robòtic i una mà mecànica i, per tant, proporciona els valors de les variables d'articulació que fan que el conjunt braç-mà realitzi l'aprensió d'un determinat objecte de forma correcta. A més, l'aplicació final permet visualitzar els models gràfics dels robots i facilita la in-

teracció entre l'usuari i aquests models, amb la qual cosa s'aconsegueix evitar l'experimentació directa amb el sistema real, que en alguns casos pot resultar complicada.

En aquest article s'explica el funcionament bàsic del simulador i s'introdueix un mètode general capaç de resoldre el problema cinemàtic invers d'un conjunt braç-mà. La proposta es basa en un mètode d'optimització capaç de tractar robots i mans de forma general, tot i així, és particularitzat per a un robot Stäubli RX90 i la mà mecànica MA-I, que disposa de quatre dits i que ha estat desenvolupada al Laboratori de Robòtica de l'IOC [10]. En concret, es tracta d'un mètode simple i general que és utilitzat en la planificació de trajectòries fora de línia per a l'aprensió i manipulació destra d'objectes.

Després d'aquesta introducció, l'article s'estructura tal com segueix. La Secció II descriu les principals característiques del simulador Qilex, tant pel que fa a eines emprades com pel que fa a l'estructura del codi. La secció III, en canvi, presenta el mètode encarregat de resoldre el problema cinemàtic invers a través de les següents subseccions: la Secció III-A descriu el problema a través de la presentació del model cinemàtic, l'exposició detallada del problema i la solució proposada basada en un mètode iteratiu d'optimització; la Secció III-B presenta les funcions objectius que han de ser minimitzades; i la Secció III-C descriu l'algorisme proposat per resoldre la cinemàtica inversa i que és estadísticament avaluat en la Secció III-D. Finalment, la Secció IV resumeix el treball i estableix possibles camins de recerca futurs.

## II. EL SIMULADOR QILEX

El simulador Qilex és una eina molt potent, visual i intuïtiva, que interconnecta tres aspectes clarament diferenciats: el motor matemàtic, que es basa en el mètode presentat en la següent secció i que permet resoldre la cinemàtica inversa del conjunt braç-mà; la visualització dels diferents models geomètrics i dels seus respectius moviments; i, per últim, la interfície que permet establir la connexió entre l'usuari i el programa.

En aquesta secció es presenten les eines emprades per tal d'aconseguir dur a terme la visualització dels diferents models i per tal d'implementar la interfície d'usuari. A més, es realitza un breu repàs de l'estructura general del programa.

1

Aquest treball ha estat parcialment suportat pels projectes de la CICYT: DPI2001-2202 i DPI2002-03540

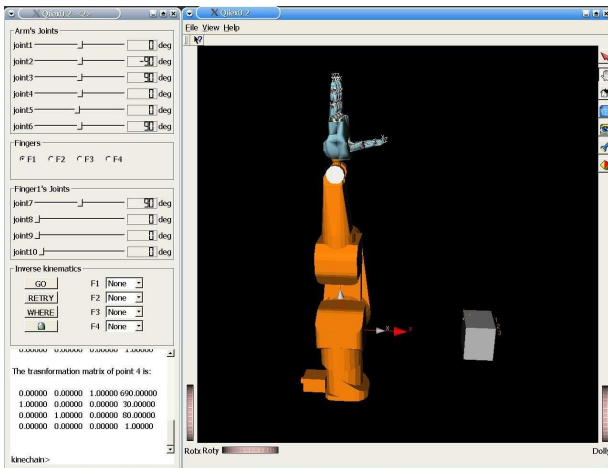


Fig. 1. L'aplicació final Qilex.

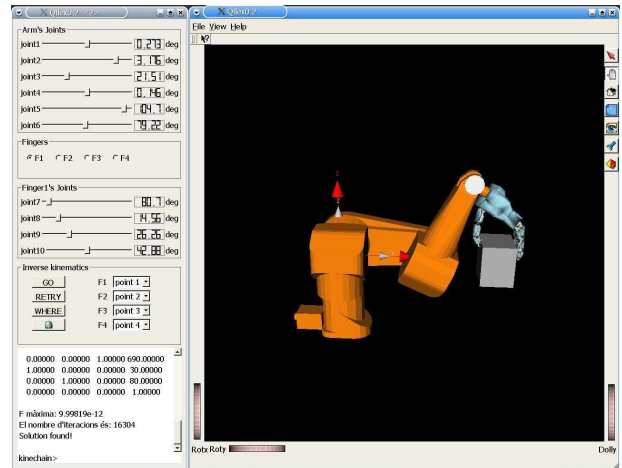


Fig. 2. L'aplicació final Qilex.

### A. L'aplicació final

El funcionament general de l'aplicació final gira entorn del document principal, que és la cel·la de treball. Per tant, la primera de les opcions a escollir quan s'executa l'aplicació és, o bé crear una cel·la nova, o bé obrir una cel·la ja grabada. Ambdós procediments, però, acaben realitzant el mateix: introdueixen elements a l'escena. Bàsicament, hi ha dos tipus d'elements que poden ser introduïts:

- objectes geomètrics, que són estàtics i sobre els quals hi ha definits els punts d'aprehensió que es volen assolir.
- cadenes cinemàtiques, que poden moure's ja que disposen d'una sèrie d'articulacions que poden variar el seu valor (per exemple, el robot RX90 equipat amb la mà MA-I). Cadascuna d'aquestes cadenes cinemàtiques té un panell de control propi.

En la figura 1 es pot observar l'aspecte de l'aplicació Qilex un cop s'han introduït a la cel·la una cadena cinemàtica (el conjunt braç robòtic més mà mecànica) i un objecte geomètric.

Com es pot veure, es distingeixen dos parts clarament diferenciades:

- El panell de control, que permet a l'usuari moure directament les articulacions mitjançant els lliscadors, seleccionar els punts d'aprehensió desitjats per afrontar el problema invers o visualitzar per consola les matrius de transformació de les puntes dels dits.
- L'escena en la qual es mostra la cel·la de treball. En ella es poden veure els diversos models 3D introduïts i els moviments d'aquells que han estat introduïts com a cadena cinemàtica.

Per altra banda, en la figura 2 s'observen el conjunt braç més mà i un objecte geomètric després de realitzar el càlcul de la cinemàtica inversa. Com es pot comprovar, en aquest cas s'ha trobat solució i, per tant, el robot ha

aconseguit dur a terme amb èxit l'aprehensió de l'objecte.

### B. Les principals eines emprades

Bàsicament, les eines emprades per a la construcció de l'aplicació final són el Open Inventor, com a eina de modelització gràfica; i la biblioteca Qt, com a eina fonamental per a la construcció de la interfície d'usuari. Ambdues, encaixen en la filosofia de programació orientada a objectes que, a nivell de llenguatge de programació, imposa l'ús del C++.

Open Inventor és un conjunt d'eines que permeten la programació d'objectes en 3D de forma senzilla. Cal destacar que es basa o parteix d'OpenGL per a desenvolupar mòduls que faciliten la seva programació i que s'encarreguen de construir les diferents escenes, les quals estan formades per diferents objectes representats de forma jeràrquica. Per altra banda, un dels elements més importants d'Open Inventor són els *engines*, que permeten la interacció amb l'escena. Normalment, s'utilitzen per animar parts de l'escena o per definir restriccions d'una part de l'escena sobre una altra. En el cas del simulador, permeten introduir moviment a les diferents articulacions del model geomètric del robot i la mà. La Figura 3 mostra els models en Open Inventor de la mà MA-I i del robot Stäubli RX90, i el model físic del grup braç-mà.

La biblioteca Qt és l'eina utilitzada per realitzar la interfície d'usuari. Concretament, aquesta biblioteca presenta diversos avantatges que fan del seu ús una eina imprescindible: disposa d'una extensa documentació, té un desenvolupament molt actiu i, a més, és una biblioteca purament orientada a objectes. Per altra banda, una de les seves eines més característiques, que, a més, es pot considerar un avantatge addicional, és el mecanisme dels *Signals and Slots*, que s'utilitza per a la comunicació entre els diferents objectes de l'aplicació.

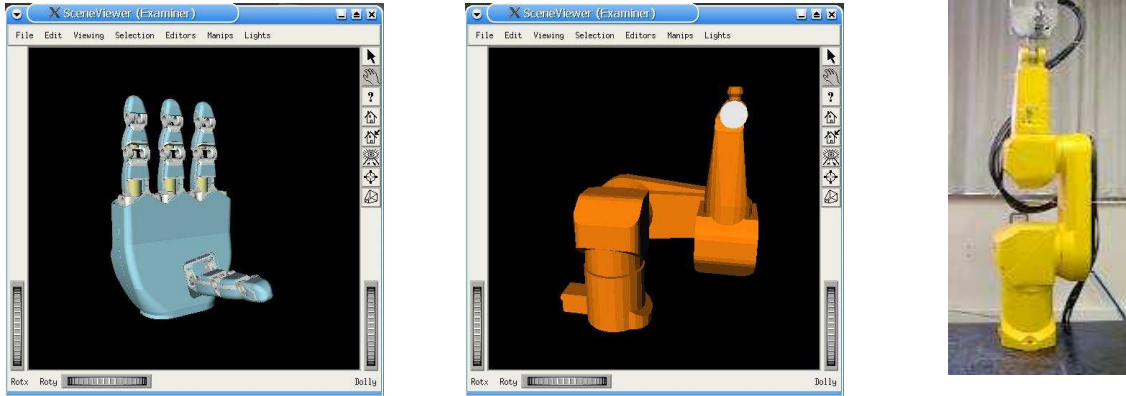


Fig. 3. Models en Open Inventor de la mà mecànica MA-I i del robot Stäubli RX90, així com el model físic del conjunt braç-mà.

### C. L'estructura del codi

L'esquelet principal de l'aplicació és el típic d'una aplicació feta amb Qt ja que disposa de tres classes principals:

- **QilexApp** és l'objecte aplicació i és on estan declarats tots els menús de l'aplicació. A més, s'encarrega de gestionar les entrades i les sortides. Conté un element de la classe **QilexDoc**.
- **QilexDoc** és l'objecte document. En el cas del simulador, un document és una escena que conté objectes (per exemple, les cadenes cinemàtiques). Conté una classe **QilexView**.
- **QilexView** és l'objecte vista, que s'encarrega de mostrar l'escena a l'usuari.

Per altra banda, la classe document **QilexDoc** conté la classe **Qpanel\_control\_hand**, que especifica el panell de control corresponent al braç robòtic més la mà. Aquesta conté, a més, la classe **Rchain\_hand**, que implementa el motor cinemàtic i és molt important per al funcionament general de l'aplicació ja que, per una banda, està connectada al panell de control mitjançant *Signals* i *Slots*; i, per altra banda, estan connectada a l'escena mitjançant *engines*.

Adicionalment, **Rchain\_hand** es recolza en altres subclasses. D'aquestes en destaquen **Rhmatrix** i **Rhtranslink**, que representen una matriu homogènia i una matriu homogènia de transformació d'un element d'una cadena cinemàtica, respectivament.

## III. LA CINEMÀTICA INVERSA

En aquest apartat es descriu el mètode encarregat de resoldre la cinemàtica inversa d'una estructura cinemàtica arbrada com la formada per un braç robòtic i una mà mecànica. Aquest mètode és implementat en la classe **Rchain\_hand**.

### A. Descripció del problema

Siguin  $A$  i  $F$  el nombre de graus de llibertat del braç i de cada dit, respectivament, i sigui  $K$  el nombre de dits de la mà. Si l'estructura cinemàtica arbrada és considerada com a  $K$  cadenes cinemàtiques que comparteixen els  $A$  primers elements, aleshores els elements poden ser etiquetats com  $j_k$  amb  $j = 1, \dots, A + F$  i  $k = 1, \dots, K$ . Com que  $j_m = j_n$  per  $j = 1, \dots, A$  i  $m, n = 1, \dots, K$ , el subíndex  $k$  serà omès en els casos en els quals el significat quedi clar.

Usant aquesta nomenclatura, es defineixen els següents sistemes de referència (Figura 4):

- $\mathcal{F}_W$ : sistema de referència de la cel·la de treball.
- $\mathcal{F}_0$ : sistema de referència assignat a la base del robot.
- $\mathcal{F}_{j_k}$ : sistema de referència assignat a cada element  $j_k$ . Els que són assignats a les puntes dels dits s'anomenen  $\mathcal{F}_{n_k}$ , amb  $n = A + F$  i  $k = 1, \dots, K$ .
- $\mathcal{F}_{n_k}^*$ : posició desitjada de  $\mathcal{F}_{n_k}$ .

Els sistemes de referència  $\mathcal{F}_0$ ,  $\mathcal{F}_{n_k}^*$  i  $\mathcal{F}_{n_k}$  es descriuen, respecte de  $\mathcal{F}_W$ , a través de les transformacions homogènies  $T_W^0$ ,  $T_W^{n_k^*}$  i  $T_W^{n_k}$ , respectivament. Cada sistema de referència  $\mathcal{F}_{j_k}$  es descriu respecte del sistema de referència de l'element previ,  $\mathcal{F}_{(j-1)_k}$ , a través d'una transformació homogènia,  $T_{(j-1)_k}^{j_k}$ , basada en els paràmetres Denavit-Hartenberg  $\alpha_{j_k}$ ,  $\theta_{j_k}$ ,  $a_{j_k}$  i  $d_{j_k}$  [3]:

$$T_{(j-1)_k}^{j_k} = \begin{bmatrix} c\theta_{j_k} & -\alpha_{j_k} s\theta_{j_k} & s\alpha_{j_k} s\theta_{j_k} & a_{j_k} c\theta_{j_k} \\ s\theta_{j_k} & c\alpha_{j_k} c\theta_{j_k} & -s\alpha_{j_k} c\theta_{j_k} & a_{j_k} s\theta_{j_k} \\ 0 & s\theta_{j_k} & c\alpha_{j_k} & d_{j_k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

L'ús de la notació Denavit-Hartenberg (DH) permet obtenir expressions simples, útils per al mètode iteratiu proposat en aquest article; fet que contrasta amb les complicades expressions trobades usant altres notacions [2, 4]. Aquest és un avantatge que compensa el següent inconvenient. La notació DH defineix  $\theta_{j_k}$  com l'angle (al voltant de l'eix  $z$  de  $\mathcal{F}_{(j-1)_k}$ ) entre l'eix  $x$  de  $\mathcal{F}_{(j-1)_k}$  i l'eix

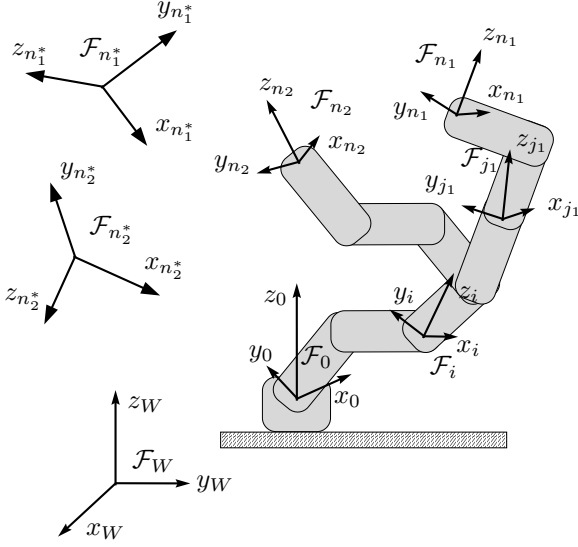


Fig. 4. Definició de sistemes de referència.

$x$  de  $F_{j_k}$ . Aquesta definició presenta una ambigüïtat en l'articulació a partir de la qual comencen les branques de l'estructura cinemàtica arbrada, ja que hi ha  $K$  sistemes de referència en la base de cadascun dels dits que són definits a partir de l'últim element del robot ( $A$ ), amb cada eix  $z$  definit per la corresponent primera articulació del dit. Aleshores, en general  $\theta_{A_m} \neq \theta_{A_n}$  per  $m, n = 1, \dots, K$ . Si el valor  $\theta_{A_1}$ , corresponent al sistema de referència assignat a la base del dit 1, es considera arbitràriament com a referència, s'obté que:

$$\theta_{A_k} = \theta_{A_1} + \delta_{A_k} \quad (2)$$

on  $\delta_{A_k}$  és un valor d'offset constant. Per tant, l'ús de la notació DH per al model cinemàtic de les estructures arbrades obliga a tractar de forma especial l'última articulació de la branca comuna.

Tal com es mostra en la figura 3, la mà dreta MA-I, desenvolupada al Laboratori de Robòtica de l'IOC, consta de quatre dits amb quatre graus de llibertat cadascun. A més, es consideren tres articulacions virtuals addicionals, que permeten tenir en compte que (Figura 5):

- Qualsevol punt de la gemma del dit pot ser usat per tal d'exercir la força requerida sobre el punt d'aprehensió (articulacions  $\theta_{11_k}$  i  $\theta_{12_k}$ ).
- Només es defineix la direcció normal al punt d'aprehensió, i, com a conseqüència, existeix un grau de llibertat de rotació al voltant de l'eix definit per aquesta direcció (articulació  $\theta_{13_k}$ ).

Els paràmetres DH de la mà i el braç, incloent les tres articulacions virtuals de les puntes dels dits, es mostren a l'Annex.

El problema que es preten solventar és la cinemàtica

inversa del grup braç-mà, és a dir, trobar els valors de les variables d'articulació que col·loquen els sistemes de referència de les puntes dels dits  $F_{n_k}$  a la configuració desitjada  $F_{n_k}^*$  amb  $k = 1, \dots, K$ .

La solució proposada per tal de resoldre el problema cinemàtic invers es basa en un mètode d'optimització distribuït. La funció objectiu a optimitzar (minimitzar) és la distància entre les configuració actual i desitjada de la punta del dit. El problema és desacoplat per tal d'analitzar l'efecte individual de cada articulació sobre la funció objectiu, és a dir, el problema es converteix en una composició de subproblemes d'optimització d'un grau de llibertat. A cada pas del procés iteratiu, els valors de les articulacions que minimitzen individualment aquesta funció objectiu són calculats i utilitzats per actualitzar l'estructura cinemàtica.

La solució proposada s'inspira en el Mètode d'Optimització Distribuït introduït per Regnier et al. [7] per solucionar la cinemàtica inversa de tots els manipuladors simples, i també utilitzat per solucionar el problema cinemàtic invers dels manipuladors [5]. Una aproximació similar, però utilitzant una mètrica diferent, es presenta en [1] per solucionar el problema cinemàtic invers per a manipuladors redundants.

### B. Funcions objectiu

La representació de la distància entre dos sistemes de referència involucra la mescla parametrizada de components translacionals i rotacionals. No existeixen mètriques bi-invariants en SE(3), el grup Euclideà per als moviments del sòlid rígid, tot i que és possible definir mètriques invariants per l'esquerra o la dreta [6] (és a dir, distàncies invariants respecte de l'elecció del sistema de referència inercial o respecte del sistema de referència del sòlid rígid, respectivament). L'ús d'aquestes mètriques pot ser computacionalment car en procediments iteratius i, per tant, és necessari recórrer a mètriques més simples (per exemple [1, 7]), malgrat que aquestes no disposin de característiques invariants ni defineixin de forma precisa la relació entre els components translacionals i rotacionals.

Si es consideren les matrius  $M^k = T_W^{n_k} - T_W^{n_k^*}$  amb  $k = 1 \dots K$ . El grau d'èxit de la solució de la cinemàtica inversa s'avalua a través de la distància entre  $F_{n_k}$  i  $F_{n_k}^*$  mesurada com:

$$dist^k(M^k) = \sum_{x=1}^3 \sum_{y=1}^3 (M^k[x][y])^2 + \omega \sum_{x=1}^3 (M^k[x][4])^2 \quad (3)$$

on  $M^k[x][y]$  és l'element  $xy$  de  $M^k$  i  $\omega$  és una constant que pondera els errors d'orientació respecte els errors de posició. El valor de  $\omega$  és proporcional a la distància màxima,  $L$ , entre l'origen de  $F_0$  i l'origen més llunyà de  $F_{n_k}$  amb  $k = 1 \dots K$ . En el nostre cas, els millors resultats s'obtenen fixant  $\omega = 0.06L$ .

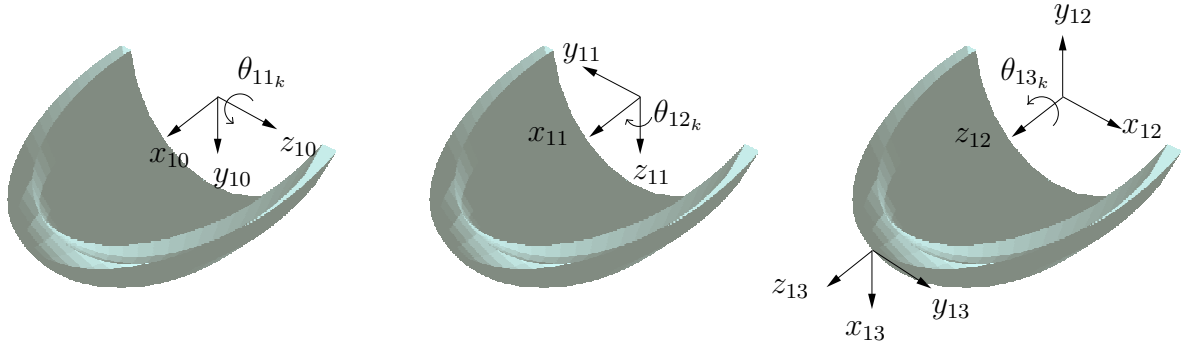


Fig. 5. Gemma del dit amb les articulacions virtuals de revolució  $\theta_{11k}$ ,  $\theta_{12k}$  i  $\theta_{13k}$  definides al voltant dels eixos  $z$  de  $\mathcal{F}_{10k}$ ,  $\mathcal{F}_{11k}$ ,  $\mathcal{F}_{12k}$ , respectivament.

Considerem inicialment el moviment de les articulacions dels dits. Per tal de tenir en compte l'efecte de cada articulació separatament, la matriu  $M^k$  i la distància  $dist^k(M^k)$  es reescriuen en funció de cada articulació  $\theta_{jk}$  considerada amb  $j = (A+1), \dots, (A+F)$ ,  $k = 1, \dots, K$ . Això es fa per canviar la referència des de  $\mathcal{F}_0$  a  $\mathcal{F}_{(j-1)k}$  (Figura 6) i s'obté que:

$$M_{jk}^k = T_{(j-1)k}^{n_k} - T_{(j-1)k}^{n_k*} = T_{(j-1)k}^{j_k} T_{j_k}^{n_k} - (T_W^0 T_0^{(j-1)k})^{-1} T_W^{n_k*} \quad (4)$$

Aleshores, com que l'expressió de  $M_{jk}^k$  té  $\theta_{jk}$  com a única variable, el problema cinemàtic invers pot ser reformulat com una composició de subproblemes d'optimització d'un grau de llibertat, on les funcions objectiu que han de ser minimitzades són:

$$F_{jk} = dist_{j_k}^k(M_{j_k}^k) \quad (5)$$

Per a les articulacions dels dits, aquesta funció objectiu  $F_{jk}$  es pot expressar com segueix mitjançant l'agrupació dels termes en els quals apareix  $\theta_{jk}$ :

$$F_{jk} = 2(a_{jk} \sin \theta_{jk} + b_{jk} \cos \theta_{jk}) + \Delta_{jk} \quad (6)$$

on els paràmetres  $a_{jk}$ ,  $b_{jk}$ , i  $\Delta_{jk}$  són funció de les matrius de l'equació (4) que no depen de  $\theta_{jk}$  ( $T_{j_k}^{n_k}$  i  $(T_W^0 T_0^{(j-1)k})^{-1} T_W^{n_k*}$ ), essent:

$$T_{j_k}^{n_k} = \begin{bmatrix} t_{00} & t_{01} & t_{02} & t_{03} \\ t_{10} & t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{20} & t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$(T_W^0 T_0^{(j-1)k})^{-1} T_W^{n_k*} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta_{jk} = -2t_{10}h_{20} \sin \alpha_{jk} + 2t_{03}a_{jk} - 2t_{20}h_{20} \cos \alpha_{jk}$$

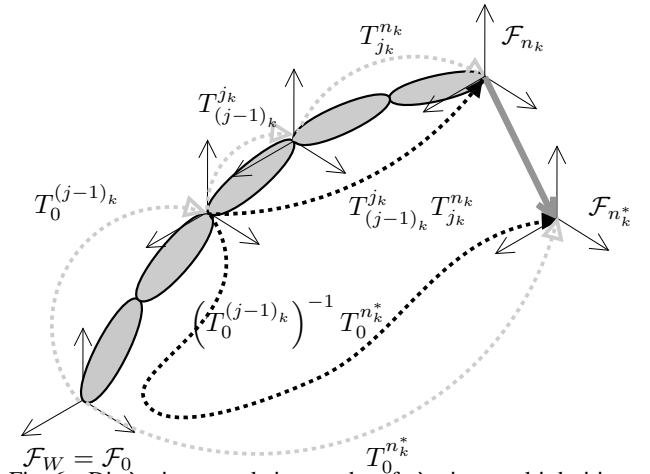


Fig. 6. Distància entre el sistema de referència actual i desitjat de la punta del dit  $k$ , mesurat respecte del sistema de referència de l'element  $j_k$  (usant  $T_W^0 = I$ ).

$$\begin{aligned} & -2t_{11}h_{21} \sin \alpha_{jk} - 2t_{21}h_{21} \cos \alpha_{jk} - 2t_{12}h_{22} \sin \alpha_{jk} \\ & - 2t_{22}h_{22} \cos \alpha_{jk} - 2t_{13}h_{23} \sin \alpha_{jk} - 2t_{23}h_{23} \cos \alpha_{jk} \\ & + h_{00}^2 + h_{03}^2 + h_{02}^2 + h_{01}^2 + h_{10}^2 + h_{20}^2 \\ & + h_{13}^2 + h_{12}^2 + h_{11}^2 + h_{22}^2 + h_{21}^2 + t_{21}^2 \\ & + t_{20}^2 + t_{22}^2 + t_{23}^2 + t_{02}^2 + t_{01}^2 + t_{00}^2 \\ & + a_i^2 + t_{03}^2 + h_{23}^2 + t_{12}^2 + t_{13}^2 + t_{10}^2 + t_{11}^2 \\ & + d_{j_k}^2 + 2d_{j_k}(t_{13} \sin \alpha_{jk} - h_{23} + t_{23} \cos \alpha_{jk}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_{jk} = & t_{13}h_{03} \cos \alpha_{jk} - t_{23}h_{03} \sin \alpha_{jk} - a_{j_k}h_{13} - t_{03}h_{13} \\ & - t_{02}h_{12} - t_{01}h_{11} - t_{00}h_{10} - t_{20}h_{00} \sin \alpha_{j_k} \\ & + t_{10}h_{00} \cos \alpha_{j_k} + t_{11}h_{01} \cos \alpha_{j_k} - t_{21}h_{01} \sin \alpha_{j_k} \\ & + t_{12}h_{02} \cos \alpha_{j_k} - t_{22}h_{02} \sin \alpha_i \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} b_{j_k} = & -t_{13}h_{13} \cos \alpha_{j_k} - a_{j_k}h_{03} - t_{03}h_{03} - t_{02}h_{02} \\ & - t_{01}h_{01} - t_{00}h_{00} - t_{10}h_{10} \cos \alpha_{j_k} + t_{20}h_{10} \sin \alpha_{j_k} \\ & + t_{21}h_{11} \sin \alpha_{j_k} - t_{11}h_{11} \cos \alpha_{j_k} + t_{22}h_{12} \sin \alpha_{j_k} \\ & - t_{12}h_{12} \cos \alpha_{j_k} + t_{23}h_{13} \sin \alpha_{j_k} \end{aligned} \quad (11)$$

El moviment de les articulacions del braç afecta la posició i orientació dels sistemes de referència de tots els

dits. Per tant, per tal de tenir en compte aquest fet, cal definir una funció objectiu diferent per aquestes articulacions.

Segui  $F_j^k$  la funció objectiu que mesura la distància entre la posició actual i la desitjada de la punta del dit  $k$ , mesurada en el sistema de referència de l'element  $j$  del braç, amb  $j = 1, \dots, A$ .

La funció  $F_j^k$  té la mateixa expressió que la funció objectiu de les articulacions del dit (equació 6), tenint en compte, però, que només es considera una única cadena cinemàtica. Per tal de considerar totes les cadenes cinemàtiques, la funció objectiu  $F_j$  de l'articulació del braç  $\theta_j$  es calcula com la suma de les funcions  $F_j^k$ , amb  $k \in 1 \dots K$ :

$$F_j = \sum_{k=1}^K F_j^k = \sum_{k=1}^K 2(a_{j_k} \sin \theta_j + b_{j_k} \cos \theta_j) + \Delta_{j_k} \quad (12)$$

Tal com s'explica en la secció anterior, degut a l'ús de la notació DH, el valor de l'última articulació del braç,  $\theta_A$ , es mesura respecte una referència diferent per cada dit. Això fa que l'equació (12) es vegi modificada pel cas de l'articulació  $\theta_A$ . Tenint en compte l'equació (2), s'obté que:

$$F_A = \sum_{k=1}^K 2(a_{A_k} \sin(\theta_{A_1} + \delta_{A_k}) + b_{A_k} \cos(\theta_{A_1} + \delta_{A_k})) + \Delta_{A_k} \quad (13)$$

Les funcions objectiu presentades fins ara mesuren la distància entre la configuració actual i la desitjada de les puntes dels dits, en funció del valor de cada articulació. Com a conseqüència, aquestes funcions objectiu es poden minimitzar per obtenir els valors òptims de les articulacions, és a dir, els valors de les articulacions que mouen les puntes dels dits a una localització propera a la desitjada.

El valor de l'articulació que minimitza  $F_{j_k}$  s'obté de  $\frac{\partial F_{j_k}}{\partial \theta_{j_k}} = 0$ , usant:

- l'equació (12) pels elements  $j = 1, \dots, (A - 1)$
- l'equació (13) per l'element  $j = A$
- l'equació (6) pels elements  $j_k$  amb  $j = (A + 1), \dots, (A + F)$  i  $k = 1, \dots, K$

El valor de  $\theta_{j_k}$  obtingut és:

$$\theta_{j_k} = \begin{cases} \arctan \frac{\sum_{k=1}^K a_{j_k}}{\sum_{k=1}^K b_{j_k}} & \text{si } j = 1, \dots, (A - 1) \\ \arctan \frac{\sum_{k=1}^K \{a_{A_k} \cos \delta_{A_k} + b_{A_k} \sin \delta_{A_k}\}}{\sum_{k=1}^K \{-a_{A_k} \sin \delta_{A_k} + b_{A_k} \cos \delta_{A_k}\}} & \text{si } j = A \\ \arctan \frac{a_{j_k}}{b_{j_k}} & \text{si } j = (A + 1), \dots, (A + F) \\ & k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (14)$$

Cal verificar que el valor de  $\theta_{j_k}$  obtingut és un mínim, comprovant que el signe de la segona derivada sigui positiu, en cas contrari, es pren el valor  $(\theta_{j_k} + \pi)$ .

Quan  $\theta_{j_k}$  es troba fora del rang de valors possibles  $[\theta_{j_k}^{max}, \theta_{j_k}^{min}]$ , se li assigna un valor arbitrari, proper al límit més pròxim, és a dir:

$$\text{si } \theta_{j_k} < \theta_{j_k}^{min} \text{ aleshores } \theta_{j_k} = \theta_{j_k}^{min} + \delta \quad (15)$$

$$\text{si } \theta_{j_k} > \theta_{j_k}^{max} \text{ aleshores } \theta_{j_k} = \theta_{j_k}^{max} - \delta \quad (16)$$

amb  $\delta$  escollit aleatòriament de  $[0, (\theta_{j_k}^{max} - \theta_{j_k}^{min})/3]$ .

### C. Mètode d'optimització

La cinemàtica inversa del conjunt braç-mà serà sol·ventada mitjançant un mètode d'optimització basat en un procés que iterativament calcula les funcions objectiu i troba els valors de les articulacions que les minimitza. L'èxit del mètode que es proposa depèn del valor inicial de les articulacions, degut a la naturalesa pròpia dels algorismes d'optimització iteratius. És per això que resulta interessant realitzar una aproximació inicial del braç que situï el conjunt en una configuració propera a la que es vol assolir. Això es pot aconseguir fixant, inicialment, les articulacions dels dits al valor mig dels seus rangs, i minimitzant únicament les articulacions del braç, utilitzant un llindar elevat per aturar el procés.

L'algorisme **Approach-Arm**, mostrat més avall, utilitza un procediment iteratiu d'optimització per trobar el valor de les articulacions del braç que situen les puntes dels dits en una configuració propera a la desitjada. S'usen les següents funcions:

**OptimizeArm:** Aquesta funció utilitza l'equació (14) per  $j = 1, \dots, A$  per tal de trobar els valors de les articulacions del braç,  $\Theta_{arm} = [\theta_1, \dots, \theta_A]$ , que minimitzen la distància entre  $\mathcal{F}_{n_k}$  i  $\mathcal{F}_{n_k}^*$  amb  $k = 1, \dots, K$ . La funció retorna:

- l'etiqueta de l'articulació amb una funció objectiu més gran
- el valor de la funció objectiu més gran,  $F_a$
- el vector  $\Theta_{arm}$

**MoveLinks:** Aquesta funció mou una articulació concreta,  $j$ , a un valor donat,  $\Theta[j]$ . Si al realitzar dues crides consecutives d'aquesta funció s'obté el mateix paràmetre  $j$ , aleshores, en la segona crida a la funció es mouen totes les articulacions a les posicions òptimes corresponents especificades per  $\Theta$ .

Com que l'algorisme **Approach-Arm** és també un algorisme d'optimització iteratiu, es poden obtenir diferents configuracions finals en funció dels valors inicials de les articulacions del braç. Aquests valors, implementats com un vector  $\Theta_{arm}^{ini}$ , es generen aleatòriament.

Per tant, el primer que fa l'algorisme que calcula la cinemàtica inversa del conjunt braç-mà (**Hand-Arm Inverse Kinematics**) és realitzar una estimació dels valors de les articulacions del braç,  $\Theta_{arm}$ , utilitzant l'algorisme

**ApproachArm.** Llavors, l'algorisme inicia un nou procés iteratiu que actualitza les articulacions dels dits més cops que les articulacions del braç (la relació és de 1 a  $S$ ). En aquest procés, s'utilitza la següent funció:

**OptimizeFinger:** Aquesta funció utilitza l'equació (14) per  $j = (A + 1), \dots, (A + F)$ ,  $k = 1, \dots, K$  per tal de trobar els valors de les articulacions dels dits,  $\Theta_{F_k} = [\theta_{(A+1)_k}, \dots, \theta_{(A+F)_k}]$ , que minimitzen la distància entre  $\mathcal{F}_{n_k}$  i  $\mathcal{F}_{n_k}^*$ . La funció retorna:

- l'etiqueta de l'articulació amb una funció objectiu més gran
- el valor de la funció objectiu més gran,  $\mathbf{F}_k$
- el vector  $\Theta_{F_k}$

```

ApproachArm( $\mathcal{F}_{n_1}^*, \dots, \mathcal{F}_{n_K}^*, \Theta_{arm}^{ini}$ )
   $R_{max}$  = Màxim nombre d'iteracions
  Inicialitza les articulacions del braç a  $\Theta_{arm}^{ini}$ 
  Fixa  $\Theta_{F_k}$  a la meitat dels seus rangs
   $r = 0$ 
  DO
    ( $j, \Theta_{arm}, \mathbf{F}_a$ ) = OptimizeArm ( $\mathcal{F}_{n_1}^*, \dots, \mathcal{F}_{n_K}^*$ )
    MoveLinks ( $j, \Theta_{arm}$ )
     $r = r + 1$ 
  WHILE  $\mathbf{F}_a > \epsilon$  AND  $r < R_{max}$ 
END

```

```

Hand-Arm Inverse Kinematics( $\mathcal{F}_{n_1}^*, \dots, \mathcal{F}_{n_K}^*$ )
   $N_{max}$  = Nombre màxim d'intents
   $R_{max}$  = Nombre màxim d'iteracions
   $n = 0$ 
  DO
     $\Theta_{arm}^{ini}$  = Assignació aleatòria
    ApproachArm( $\mathcal{F}_{n_1}^*, \dots, \mathcal{F}_{n_K}^*, \Theta_{arm}^{ini}$ )
     $r = 0$ 
    DO
      IF ( $r \bmod S$ ) = 0 DO
        ( $j, \Theta_{arm}, \mathbf{F}_a$ ) = OptimizeArm ( $\mathcal{F}_{n_1}^*, \dots, \mathcal{F}_{n_K}^*$ )
        MoveLinks ( $j, \Theta_{arm}$ )
      END IF
      FOR  $k = 1$  TO  $K$  DO
        ( $j, \Theta_{F_k}, \mathbf{F}_k$ ) = OptimizeFinger ( $\mathcal{F}_{n_k}^*$ )
        MoveLinks ( $j, \Theta_{F_k}$ )
      END FOR
       $r = r + 1$ 
       $\mathbf{F} = \max\{\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_K\}$ 
    WHILE  $\mathbf{F} > \epsilon$  AND  $r < R_{max}$ 
    IF  $r \neq R_{max}$  RETURN [ $\Theta_A, \Theta_{F_1}, \dots, \Theta_{F_K}$ ]
     $n = n + 1$ 
  WHILE  $n < N_{max}$ 
  RETURN solució no trobada
END

```

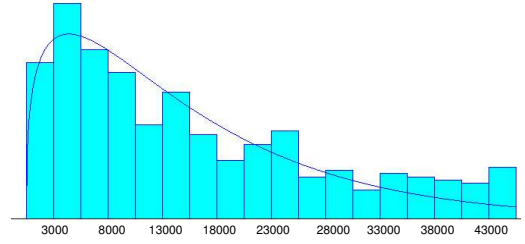


Fig. 7. Distribució de probabilitat del nombre d'iteracions.

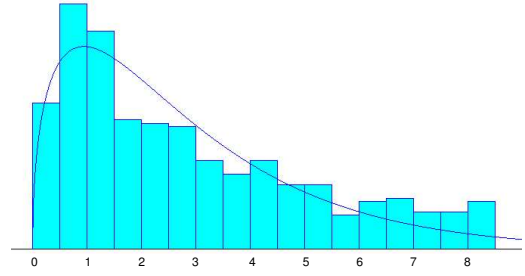


Fig. 8. Distribució de probabilitat del temps de CPU (en segons).

#### D. Experiments

L'algorisme que calcula la cinemàtica inversa ha estat incorporat al simulador robòtic Qilex desenvolupat al Laboratori de Robòtica de l'IOC (<http://qilex.berlios.de/>), i ha estat testat estadísticament. La validació ha consistit en:

- Generar una sèrie de configuracions d'aprehensió assignant aleatòriament valors a les articulacions del conjunt braç-mà i calculant la cinemàtica directa.
- Calcular la cinemàtica inversa per a cadascuna de les configuracions anteriors.

L'estudi consta de 500 configuracions d'aprehensió a assolir. D'aquestes, l'algorisme final ha estat capaç de trobar la solució de la cinemàtica inversa en un 96% dels casos<sup>1</sup>, utilitzant  $R_{max} = 50000$ ,  $N_{max} = 50$  i  $S = 3$ . Per altra banda, el 64% de les solucions trobades s'han obtingut en el primer intent (és a dir, amb el primer valor de la configuració inicial  $\Theta_{arm}^{ini}$ ), mentre que un 86% de les solucions trobades s'ha obtingut en un dels cinc primers intents.

El nombre d'iteracions necessari en l'intent en el qual s'ha trobat solució es pot descriure mitjançant la distribució Gamma mostrada en la Figura 7, amb un factor de forma de  $\alpha = 1,25$ , un factor d'escala de  $\beta = 13400$ , un offset de 487, i un valor mig de 17237. El temps de CPU requerit per aquestes iteracions, utilitzant un Pentium IV a 2GHz amb un S.O. GNU/Linux Debian i un compilador gcc 3.2.3., es pot descriure mitjançant la distribució Gam-

<sup>1</sup>S'ha obtingut un èxit del 100% per cadenes cinemàtiques simples amb 13 graus de llibertat.

ma mostrada en la Figura 8, amb un factor de forma de  $\alpha = 1,48$ , un factor d'escala de  $\beta = 1,97$ , un valor mig de 2,92 segons i un valor màxim de 8,45.

Aquets resultats mostren que la implementació actual del mètode encara no pot ser usada en línia i cal encara dedicar molts esforços en aquest sentit. De moment, el mètode s'utilitza per a la planificació de trajectòries fora de línia per a l'aprehensió i manipulació de la dreta d'objectes.

#### IV. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

En aquest article s'ha presentat un simulador cinemàtic per a un robot industrial equipat amb una mà mecànica, com a eina de suport al desenvolupament d'algorismes per a l'aprehensió de la dreta d'objectes. El simulador es basa en un algorisme que permet resoldre la cinemàtica inversa d'un conjunt braç-mà i que es basa en un mètode d'optimització. L'algorisme ha estat implementat i testat satisfactòriament en un robot Stäubli RX90 equipat amb una mà mecànica desenvolupada al Laboratori de Robòtica de l'IOC. Les futures modificacions de l'algorisme haurien de considerar els següents punts:

- L'ús de la mètrica invariant per l'esquerra proposada en [6]. Mitjançant aquesta mètrica s'obtenen expressions més complexes, però com que és necessari un canvi en l'algorisme degut a les característiques invariants d'aquesta distància, és d'esperar una reducció important en el nombre d'iteracions invertides.
- Una millor selecció de les configuracions de partida del mètode utilitzant una heurística semblant a la proposada a [1]. Això podria incrementar l'èxit del mètode fins a un 100%.

Pel que fa al simulador en sí, s'haurien de millorar algunes de les seves funcionalitats. En aquest sentit, es proposa dissenyar un intèrpret capaç de desenvolupar diversos mòduls d'ajuda per a la programació o incorporar un sistema de detecció de col·lisions.

#### ANNEX

Els paràmetres Denavit-Hartenberg dels dits de MA-I i del robot Stäubli RX90 es detallen en les següents taules. Cal destacar que els paràmetres de l'última articulació del robot,  $\theta_6$ , es detallen en la taula de cada dit degut a les característiques de la notació DH comentades en la Secció III-A.

Robot Stäubli RX90:

$j$	1	2	3	4	5
$\alpha_j$	-90	0	90	-90	90
$a_j$	0	450	0	0	0
$d_j$	0	0	0	450	0
$\theta_j^{min}$	-160	-227.5	-52.5	-270	-105
$\theta_j^{max}$	160	47.5	232.5	270	120

Dit 1:

$j$	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha_j$	90	90	0	0	0	-90	-90	0
$a_j$	67	0	76	56	40	0	0	0
$d_j$	276	11	0	0	0	0	0	15
$\theta_j^{min}$	-180	80	0	0	0	0	-180	-270
$\theta_j^{max}$	360	100	90	90	90	90	0	90

Dit 2:

$j$	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha_j$	90	90	0	0	0	-90	-90	0
$a_j$	0	0	0	56	40	0	0	0
$d_j$	276	11	0	0	0	0	0	15
$\theta_j^{min}$	-180	80	0	0	0	0	-180	-270
$\theta_j^{max}$	360	100	90	90	90	90	0	90

Dit 3:

$j$	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha_j$	90	90	0	0	0	-90	-90	0
$a_j$	-67	0	76	56	40	0	0	0
$d_j$	276	11	0	0	0	0	0	15
$\theta_j^{min}$	-180	80	0	0	0	0	-180	-270
$\theta_j^{max}$	360	100	90	90	90	90	0	90

Dit 4:

$i$	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha_i$	0	90	0	0	0	-90	-90	0
$a_i$	72	0	76	66	45	0	0	0
$d_i$	145	0	0	0	0	0	0	15
$\theta_i^{min}$	-213.7	-66.3	0	0	0	0	-180	-270
$\theta_i^{max}$	326.3	-46.3	90	90	90	90	0	90

#### REFERÈNCIES

- [1] J. M. Ahuactzin i K. K. Gupta. The kinematic roadmap: a motion planning based global approach for inverse kinematics of redundant robots. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 15(4):653–669, Aug. 1999.
- [2] John J. Craig. *Introduction to robotics mechanics and control*. Addison-Wesley, segona edició, 1989.
- [3] J. Denavit i R.S. Hartenberg. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22:215–221, juny 1955.
- [4] W. Khalil i J. F. Kleinfinger. A new geometric notation for open and closed-loop robots. Dins *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pàgines 1174–1179. 1986.
- [5] F. B. Ouezdou, S. Regnier i C. Mavroidis. Kinematic synthesis of manipulators using a distributed optimization method. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 121(4):492–501, 1999.
- [6] F. C. Park. Distance metrics on the rigid-body motions with applications to mechanical design. *Journal of Mechanical Design*, 117:48–54, 1995.
- [7] S. Regnier, F. B. Ouenzou i P. Bidaud. Distributed optimization method for inverse kinematics of all serial manipulators. *Journal of Mechanical and Machine Theory*, 32(7):1–15, October 1997.
- [8] K. B. Shimoga. Robot grasp synthesis algorithms: A survey. *The Int. Journal of Robotics Research*, 15(3):230–266, 1996.
- [9] Xavier Sierra. Simulador cinemàtic per a l'aprehensió de la dreta d'objectes. Projecte Final de Carrera, ETSEIB, UPC.
- [10] R. Suárez i P. Grosch. Mano mecànica MA-I. Dins *Actas XXIV Jornadas de Automàtica*. (ISBN 84-931846-7-5), 2003, Univ. Leon (Spain).