MODELADO Y SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS

CON ACOMODACIÓN EN ROBÓTICA

Raúl Suárez Luis Basañez David Colomés

Instituto de Cibernética (UPC), Diagonal 647 planta 2, 08028 Barcelona

En este artículo se realiza una descripción del sistema desarrollado en el Instituto de Cibernética para simular movimientos con acomodación en robótica. El software necesario para realizar esta simulación ha sido implementado y es compatible con el simulador gráfico de robots del Instituto de Cibernética, que permite emular un robot PUMA 560. La implementación ha sido realizada en una estación de trabajo Silicon Graphics usando la librería gráfica GL y lenguaje de programación C.

1 INTRODUCCIÓN

La simulación gráfica en programación fuera de línea de un robot es importante para visualizar la ejecución de la tarea y verificar su buen comportamiento. Cuando hay interacción entre objetos, como suele suceder en tareas de ensamblado, la simulación debe incluir las fuerzas de reacción cosa que en general no tienen los simuladores comerciales. Así pueden prevenirse fuerzas que dañen los objetos o el robot mismo. La simulación de estos procesos es de especial interés, pues evita, en la medida de lo posible, el uso del robot para el correcto desarrollo de los programas.

En este trabajo se asume la existencia de un acomodador pasivo en la muñeca del robot (un elemento elástico). Cuando el objeto manipulado por el robot entra en contacto con otros objetos del entorno las fuerzas de reacción causan la deformación del acomodador alterando la posición final del objeto manipulado, tal como se ilustra en la figura 1.

La determinación de la nueva posición (que será denominada posición real) se basa en que la energía de deformación del elemento elástico ha de ser mínima y no ha de existir interpenetración entre el objeto manipulado y los objetos del entorno. A partir de esta posición se calcula la deformación del elemento elástico, así como la fuerza de reacción entre el objeto manipulado por el robot y los objetos del entorno, obtenida multiplicando la deformación por la matriz de elasticidad del elemento elástico.

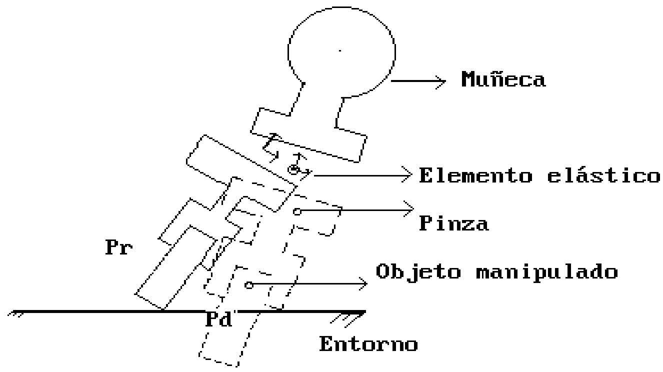


Figura1: Posición real final alcanzada Pr para la posición deseada Pd del objeto manipulado por el robot debido a las fuerzas de interacción con el entorno.

El cálculo de la nueva posición se resuelve como un problema estático, teniendo en cuenta la posición real original del objeto manipulado. En la resolución del problema se han realizado las siguientes suposiciones:

1. Todos los objetos se suponen rígidos (el objeto manipulado, los del entorno y los elementos del robot), a excepción del elemento elástico.
2. No se modela la fricción entre objetos ni se tienen en cuenta efectos dinámicos ya que se asumen velocidades de movimiento bajas.
3. Se asume que el robot alcanza exactamente la posición deseada en cada paso de la simulación (descartando fricción de articulaciones, defectos de calibración, etc.), por lo que no existen errores de posicionamiento del robot ocurre como resultado de las fuerzas de interacción con el entorno.

El simulador del movimientos con acomodación consta de cuatro módulos (figura 2), que se detallan en las secciones 2 a 5. Como se aprecia en la figura, la información de partida para realizar la simulación es la posición deseada o posición de control del objeto manipulado, obteniéndose como resultado la posición real del objeto manipulado, la deformación del elemento elástico y la fuerza de reacción correspondiente.

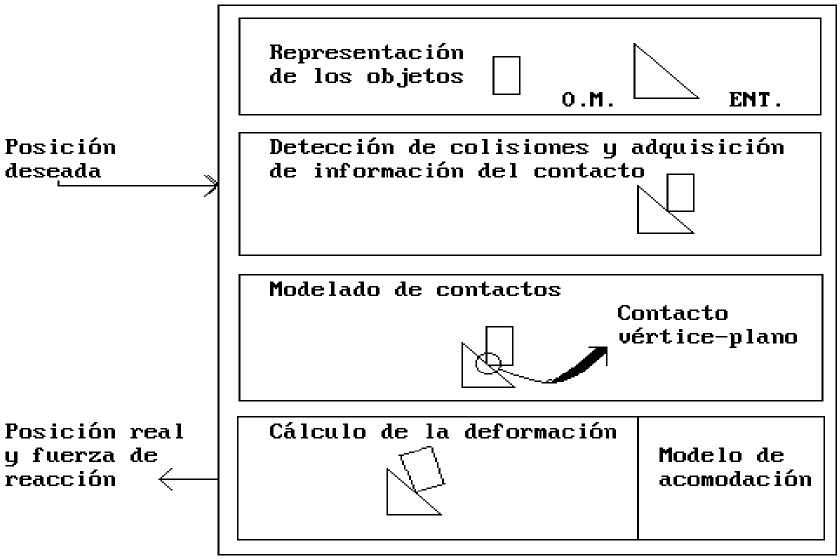


Figura 2: Componentes del simulador de movimientos con acomodación.

1.1 ANTECEDENTES

Los principales trabajos realizados hasta el momento sobre el tema de la simulación de movimientos con acomodación cabe mencionar el de Witvrouw, Vand de Poel y Bruyninckx [13], que realiza la simulación de un sensor de fuerzas y el posterior control de acomodación activa sobre las fuerzas sensadas. El hecho de que el único elemento elástico modelado sea un sensor de fuerzas hace que las soluciones adoptadas difieran mucho de las utilizadas en este trabajo.

Otro trabajo interesante sobre simulación de movimientos con acomodación es el realizado por S. Won Kim [7], que se centra únicamente en el caso de simulación de tareas de ensamblado, con lo que las soluciones adoptadas son muy particulares.

La solución adoptada en la realización de este trabajo está en la línea de los trabajos sobre simulación dinámica de objetos rígidos en entornos virtuales, tal como los realizados por J. Bouma y G. Vanêcêk,[3] y por D. Baraff [1].

1.2 MODELADO DEL ELEMENTO ELÁSTICO

El modelo utilizado del acomodador describe la relación entre la deformación de éste (e) y las fuerzas resultantes de esta deformación (f) de forma $f = \mathbf{K}\ e$, donde f es el vector de fuerzas y pares, e el vector de deformaciones de posición y orientación, y K la matriz de elasticidad del acomodador. La matriz K suele especificarse para un sistema de referencia cartesiano llamado marco de acomodación, donde resulta ser diagonal.

Los distintos tipos de elementos elásticos que se pueden modelar son:

1. Dispositivos de acomodación pasivos. Estos dispositivos pasivos (generalmente de tipo mecánico como por ejemplo muelles) se deforman ante la presencia de fuerzas.
2. Sensor de fuerzas (únicamente cuando esté situado en la muñeca o pinza del robot). El sensor de fuerzas presenta un comportamiento elástico ; aunque con deformaciones muy pequeñas. En este caso a diferencia del anterior, no son importantes los valores obtenidos de la deformación en sí (pues son excesivamente pequeños y despreciables como efectos acomodaticios), pero si lo son los valores de fuerza obtenidos a partir de esta deformación.
3. Acomodación activa mediante control de elasticidad.A pesar de tratarse de un control que se realiza con las fuerzas de reacción sobre las articulaciones del robot puede ser considerado como un elemento elástico debido a sus características.

2 REPRESENTACIÓN DE LOS OBJETOS

Los objetos considerados son poliedros no necesariamente convexos, con lo que sus caras son polígonos no necesariamente convexos, es decir se permite que puedan tener agujeros en su interior. Su representación ha de satisfacer las siguientes condiciones:

1.Condiciones debidas al problema en si:

- Contener toda la información topológica y geométrica de los objetos.
- Permitir su movimiento de forma sencilla y computacionalmente eficiente.
- Permitir la realización de un algoritmo de detección de colisiones eficiente.
- Posibilitar la determinación y modelado de los contactos.

2.Condiciones debidas a los medios a utilizar para representar los objetos:

- La representación ha de ser fácilmente implementable en lenguaje de programación C.
- La representación ha de ser tal que permita visualizar gráficamente los objetos de forma sencilla, utilizando la librería gráfica G.L. de las estaciones de trabajo Silicon Graphics.

Las representaciones de los objetos a través de aproximaciones no son, en general, suficientemente precisas. Ya que es necesario trabajar con la representación más exacta posible de los objetos se ha decidido adoptar una representación por límites [1] que consiste en una descripción del objeto mediante las entidades de su superficie (vértices, aristas y caras).

3 DETECCIÓN DE COLISIONES Y ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN DEL CONTACTO

Se ha realizado un algoritmo de detección de colisiones entre un objeto móvil (el manipulado por el robot) y los objetos fijos del entorno que, en caso de contacto, proporciona la máxima información posible de la situación geométrica para poder modelar posteriormente los contactos reales que se producen. Ambos problemas, tanto la detección de colisiones como la adquisición de información del contacto, pueden considerarse separadamente, pero por su similitud serán considerados como un único problema que se resolverá simultáneamente.

La importancia de este algoritmo es crítica para poder realizar una simulación realista del movimiento con acomodación, pues una información incorrecta del contacto puede llevar a un modelo de contactos erróneo que llevaría el objeto móvil a una posición final errónea. Se definen tres posibles situaciones de posición relativa entre dos objetos:

1. Separación. Si la mínima distancia entre ellos es mayor que un cierto valor $\in$
2. Interpenetración. Si existe un punto de la superficie de uno de los objetos que se encuentra en el interior del otro a una distancia superior a $\in$ de cualquier punto de la superficie del otro objeto.
3. Contacto. Si la mínima distancia entre las superficies de los dos objetos es inferior a $\in$ sin que exista interpenetración.

La impenetrabilidad del objeto manipulado por el robot se comprueba siempre al ejecutar el algoritmo de detección de colisiones y de adquisición de información del contacto. En el caso de que exista interpenetración, se corrige la posición y se encuentra la información del contacto en esta nueva posición. Esto se realiza mediante una búsqueda binaria recursiva interpolando linealmente entre las dos posiciones extremas, hasta encontrar una posición de contacto y no interpenetración.

Para asegurar la no interpenetración en cada paso es necesario que ésta no exista en la posición resultante del paso anterior. Esto se verificará siempre en el algoritmo principal, pero es necesario que en la configuración inicial (al empezar el proceso de simulación) el objeto manipulado no interpenetre ningún objeto del entorno.

El algoritmo utilizado de detección de colisiones entre poliedros no necesariamente convexos se basa en que dos poliedros intersectan si y solo si una arista de uno de ellos intersecta con una cara del otro [10]. Así, para detectar las intersecciones solo hace falta comprobar si alguna arista intersecta a una cara del otro objeto, y para ello es necesario que los vértices de la arista estén en diferentes lados del plano soporte de la cara y que se atraviese este plano por la cara. No obstante, en este trabajo el algoritmo se ha modificado de forma que se pueda obtener información de la intersección y se pueda diferenciar la situación de contacto de la de interpenetración y, en caso de contacto, poder obtener la información geométrica de éste.

Debido a que el algoritmo está basado en detectar si una arista de un objeto atraviesa al otro objeto comprobando cada una de sus caras se establecerá, en caso de contacto, una clasificación de la arista con respecto a cada una de las caras del otro objeto. Así para determinar toda la información geométrica del contacto entre objetos será necesario obtener todas las clasificaciones arista-cara para cada una de las aristas y caras de los objetos analizados. Al clasificar una arista con respecto a todas las caras de un objeto, esta puede dividirse en segmentos que cumplan iguales condiciones. Estos segmentos están limitados por los puntos de corte entre la arista y las entidades del objeto estático.

Como ejemplo se clasificará la arista e de un objeto móvil, con respecto a las caras f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 de un objeto estático (figura 3):

Cara	**Clasificación de e**
f_1	'fuera',(vértice v_1),'sobre cara f_3'
f_2	'fuera',(vértice v_1),'sobre cara f_3'
f_3	'sobre cara f_3'
f_4	'sobre cara f_3,(arista e_2),'dentro'
f_5	'dentro','sobre cara f_5'

Después de realizar su unión se obtendrá la siguiente clasificación de la arista respecto al objeto: ('fuera' , (vértice v_1) , 'sobre cara f_3' , (arista e_2) , 'sobre cara f_5'), donde se observan los cuatro segmentos separados por los puntos de corte. El algoritmo utilizado esta basado en encontrar estos puntos de corte.

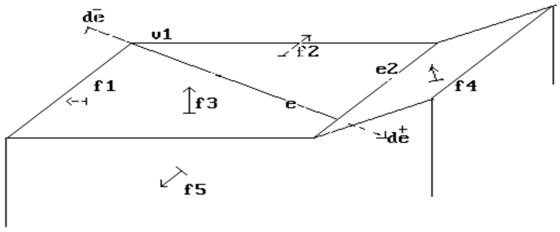


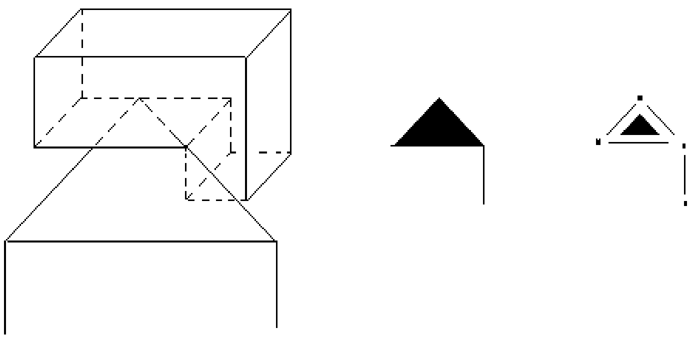
Figura 3: Ejemplo de clasificación arista-objeto.

4 MODELADO DE CONTACTOS

En la sección anterior se ha tratado el algoritmo diseñado para detectar las colisiones y adquirir la información geométrica de éstas, también se ha explicado como este algoritmo evita la interpenetración de forma que después de ejecutarlo solo existen dos posibilidades : que el objeto manipulado esté separado de los objetos del entorno o que ocupe una posición de contacto. En el primer el objeto manipulado ocupará la posición deseada, mientras que en el segundo se obtendrá la información geométrica del contacto (mediante las clasificaciones arista-objeto) que será usada conjuntamente con la configuración de contacto del paso anterior y de la geometría de los objetos para calcular la nueva posición real del objeto manipulado.

4.1 ANÁLISIS DEL CONTACTO

Dado que los objetos poliédricos no son necesariamente convexos, el contacto entre ellos puede ser geométricamente bastante complejo.



a) b) c)

Figura 4: *a) Contacto entre el* objeto *móvil y el entorno.*
b) Superficie de contacto
c) Contacto entre las distintas entidades de ambos objetos.

Cuando hay contacto entre dos objetos siempre existe una superficie de contacto entre ambos que está formada por regiones de contacto entre distintas entidades de ambos objetos. Cada región de contacto puede ser de dimensión 0, 1 ó 2. Así, por ejemplo, en el caso de la figura 4 se aprecian nueve regiones de contacto (unaCara-Cara, una Vértice-Arista, tres Arista-Cara y una Arista-Arista).

Cada superficie de contacto se representa mediante un conjunto de inecuaciones que aseguran la impenetrabilidad del objeto manipulado en los objetos del entorno. Para ello no son necesarias todas las regiones de contacto, sino sólo las regiones de contacto de dimensión 0. Los distintos tipos de contactos de dimensión cero entre dos objetos son:

1) Vértice-Cara ; 2) Arista-Arista ; 3) Vértice-Arista ; 4) Vértice-Vértice.

Se pretende modelar cada tipo de contacto de forma que se pueda extraer de él una o más condiciones matemáticas que impidan la penetrabilidad.

El contacto vértice-cara impone la condición matemática de que el vértice esté en contacto o por encima de la cara del otro objeto.

El contacto arista-arista impone la condición matemática de que las aristas no interpenetren. Se ha de destacar el hecho de que si las dos aristas en contacto son paralelas la región de contacto será entonces de dimensión 1, con lo que no es necesario modelarlo como contacto, pues únicamente se utilizan los contactos de dimensión 0.

No es posible establecer una condición matemática única para todos los contactos vértice-arista o vértice-vértice. Estos contactos se denominarán indeterminados, mientras que los contactos vértice-cara y arista-arista serán denominados contactos determinados.

Para resolver un contacto indeterminado se le asociará un conjunto de contactos determinados, dependiente de la concavidad y convexidad de las entidades que intervienen en el contacto y de la configuración de contacto anterior [14].Así, la condición matemática que impone cada contacto indeterminado vendrá dada por las condiciones matemáticas de los contactos determinados asociados a él.

4.2 EL CONTACTO COMO ECUACIÓN DEL ESPACIO DE CONFIGURACIONES.

Las condiciones matemáticas con las que se modela cada tipo de contacto determinado hacen referencia a la posición que debían ocupar las entidades del objeto manipulado que contactaban con el objeto fijo del entorno. Estas condiciones se obtienen en el espacio de configuraciones.

El espacio de configuraciones de un objeto rígido es un espacio de seis dimensiones, donde cada dimensión representa un grado de libertad del objeto. Cada punto del espacio de configuraciones (especificado por sus seis coordenadas) representa una configuración particular(una posición y una orientación del objeto).

Un contacto determinado restringe en un grado de libertad el movimiento del objeto, con lo que si el objeto mantiene el contacto, su configuración pertenecerá a una hipersuperficie de dimensión 5 del espacio de configuraciones. Sea p un punto del espacio de configuraciones y C la función escalar que representa la hipersuperficie . Si el objeto mantiene el contacto en p se ha de cumplir que :

$$C(p)=0 \tag{2}$$

La hipersuperficie S divide al espacio de configuraciones en dos regiones. En este trabajo se adoptará la convención de que si C(p)<0 entonces p representa una configuración tal que el objeto manipulado interpenetra al objeto del entorno, si C(p)>0 entonces p representa una configuración tal que el objeto manipulado está separado del entorno en lo referido al contacto básico tratado. Así la condición matemática que impone cada contacto en el espacio de configuraciones para indicar las configuraciones validas será de la forma:

$$C(p)>=0 \qquad (3)$$

5 CÁLCULO DE LA FUERZA DE REACCIÓN

Cuando se da una variación de posición y/o orientación del robot que conduciría al objeto manipulado hacia una posición deseada no alcanzable debido a la existencia de contactos, el objeto manipulado adquiere una nueva posición real que satisface :

1) No se produzca interpenetración entre el objeto manipulado y el entorno.
2) La energía de deformación del elemento elástico sea mínima.

Una vez calculada la posición real, se calculará que deformación del elemento elástico produce esta nueva posición, así como la fuerza que se deriva de esta deformación.

5.1 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL CONTACTO

En un movimiento real el objeto manipulado tenderá a ocupar la posición en la que la energía de deformación del elemento elástico sea mínima. Esta posición de mínima energía puede no ser única, debido a que las inecuaciones de contacto no son lineales. El problema radica en encontrar cual de estas posiciones de mínima energía es la que ocupará el objeto manipulado. Esta posición dependerá únicamente de la posición real anterior del objeto manipulado y de la geometría de los objetos.

El problema de la existencia de más de una posición de mínima energía, se soluciona linealizando las inecuaciones de contacto respecto a la posición real anterior del objeto manipulado. El hecho de que las inecuaciones de contacto sean lineales hace que la solución matemática al problema de encontrar la configuración de mínima energía que cumpla las ecuaciones de contacto sea única ; y al linealizarlas respecto la posición real del objeto manipulado del paso anterior el mínimo encontrado será el que se corresponda con la situación anterior.

La linealización de las ecuaciones de contacto introduce un error al encontrar la solución. Este error será mayor cuanto mayor sea la variación de la posición del objeto manipulado respecto al paso anterior. Para que este error no sea excesivamente grande se comprueba si el desplazamiento y rotación a que se somete el objeto manipulado son menores que unos ciertos valores fijos, y de no ser así se discretiza el movimiento en tantos pasos como sean necesarios mediante una interpolación lineal.

5.2 MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA

En esta sección se describirá el modelo usado para encontrar la posición real del objeto manipulado que cumpla las inecuaciones de contacto y que se corresponda con la posición de mínima energía.

5.2.1 ECUACIONES DE CONTACTO

Cada contacto impone una condición matemática sobre la posición del elemento elástico una vez deformado. Cada inecuación de contacto una vez linealizada es de la forma:

$$a_1\, e_x + a_2\, e_y + a_3\, e_z + a_4\, e_{rx} + a_5\, e_{ry} + a_6\, e_{rz} + a_7 >= 0 \qquad (4)$$

Siendo *e* el vector de deformaciones lineales y angulares.

Por lo tanto, la condición matemática que representa todos los contactos determinados presentes en una situación de contacto es de la siguiente forma:

$$A\ e >= b \qquad (5)$$

donde A es una matriz mx6 (siendo m el número de inecuaciones de contacto) cuyo elemento $a_{i,j}$ es el termino j de la inecuación de contacto i, y *b* es el vector de los m términos independientes de las inecuaciones de contacto.

5.2.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

La energía de deformación del acomodador se obtiene a partir de

$$E(e) = \tfrac{1}{2}\, e^T\, \mathbf{K}\, e \qquad (6)$$

donde **K** es la matriz de elasticidad del acomodador y *e* el vector de deformaciones lineales y angulares, todos ellos expresados respecto al marco de acomodación que se corresponde con la posición deseada del objeto manipulado.

5.3 SOLUCIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

El primer paso consiste en encontrar la variación en la deformación *e* del acomodador. La energía de deformación del elemento elástico ha de ser la mínima y se han de cumplir las inecuaciones de contacto. Se trata pues de solucionar el problema de minimizar una función cuadrática sujeta a un conjunto de inecuaciones lineales :

$$E(e) = \tfrac{1}{2}\, e^T\, \mathbf{K}\, e \qquad \text{tal que} \qquad A\ e >= b \qquad (7)$$

Una vez resuelto el problema de optimización se obtiene la deformación del elemento elástico y a partir de ella se obtendrá directamente la posición real del objeto manipulado, puesto que éste permanece solidario al elemento elástico. Con lo que el vector *f* de fuerzas y pares de reacción se obtiene mediante la expresión

$$f = \mathbf{K} * e \qquad (8)$$

6 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado e implementado un simulador de movimientos con acomodación. La implementación es compatible con el simulador gráfico de robots previamente desarrollado e implementado en el Instituto de Cibernética, en el cual ha sido incluido como un módulo opcional en la simulación de un robot PUMA 560. El software ha sido implementado en una estación de trabajo Silicon Graphics usando la librería gráfica GL y lenguaje de programación C.

En el simulador el usuario puede mover el robot como si de un robot real se tratase, produciéndose la correspondiente acomodación del objeto manipulado cuando éste entra en contacto con otros objetos del entorno. Tanto el objeto manipulado por el robot, como los objetos del entornos pueden ser definidos por el usuario. Durante la operación, el simulador muestra de forma continua en una gráfica los valores de deformación del elemento elástico, así como las fuerzas de reacción resultantes de esta deformación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CICYT TAP 96-0868

BIBLIOGRAFÍA

[1] Baraff D., 'Dinamic Simulation of non-penetrating rigid bodies', Ph.D. thesis, Dep. Computer Science ,Cornell University 1995.

[2] Basañez L., Suárez R., 'Control de Robots con acomodación activa', Revista de Robótica nº 17, Enero/Febrero 1986.

[3] Bouma W. J., Vanêcêk G., 'Modeling contacts in a physically based simulation', Computer-Aided Design Volume 26 nº6, June 1994.

[4] Cremer J., Vanêcêk G., 'Building Simulations for Virtual Enviroments', CSD WG 5.10 University of Iowa, Octubre 1994.

[5] De Schutteer J., Van Brussel H., 'Compliant Robot Motion', International Journal of Robotic Research, Vol.7 nº4, Agosto 1988.

[6] Foley, Van Dam, Feiner, Hughes, 'Computer Graphics: Principles & Practice Reading', MA ,Addison-Wesley Cop., 2ª Ed., 1990.

[7] Kim S.Won, 'Developments of New Force Reflecting Control Shemes and a Aplication to teleoperation training Simulator', International Conference of Robotics and Automation, Nice (France), Mayo 1992.

[8] Nemhauser G.L, Rinnooy A., Todd, 'Optimization', Amsterdam Elsevier Science Pub. 1989.

[9] Suarez R., 'Control de fuerza en Robótica', Automática e Instrumentación, nº185, Noviembre 1988.

[10] Thomas F., Torras C., 'Interference Detection between non-convex polyhedra. Revisited with a practical Aim', IEEE J. Robotics and Automation, 1993

[11] Vanêcêk G., 'A data structure for analyzing collisions of moving objects', IEEE 24th Ann. Hawaii Int. Conf. System Science, Junio 1990.

[12] Van de Poel P., Witvrouw W., Bruyninckx H., De Shutter, 'An enviroment for Developing and Optimising Compliant Robot Motion Task', International Conference on Advanced Robotics, Tokio, 1993.

[13] Witvrouw W., Van de Poel P.,Bruyninckx, De Shutter J., 'ROSI: A Task Specification and Simulation Tool for Force Sensor Based Robot Control, ISIR 1993.

[14] Colomés D., 'Modelado y simulación de movimientos con acomodación en Robótica', Proyecto Final de Carrera, E.T.S.E.I.B (U.P.C), 1996