PLANIFICACIÓN Y CONTROL EN ENTORNOS MULTI-ROBOT

Ramon Costa i Castelló, Luis Basañez Villaluenga y Raúl Suárez Feijóo

Institut de Cibernética (UPC-CSIC)
Av. Diagonal 647, 2a planta
08028 Barcelona

Resumen. En este trabajo se presentan las características y posibilidades más destacadas de los sistemas multi-robot en los que diferentes robots actúan de manera coordinada en un espacio de trabajo compartido. A tal efecto, se pasa revista a los principales enfoques existentes y a los algoritmos utilizados para la planificación y control de estos sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

La actuación coordinada de los diferentes robots de una celda de fabricación permite llevar a cabo tareas no realizables en entornos mono-robot además incrementar la eficiencia en otros tipos de tareas. En contrapartida la coordinación genera un aumento de la complejidad de programación, planificación y control de todos los elementos que componen la celda. En esta introducción se resumen las principales ventajas e inconvenientes que presenta la utilización de celdas multi-robot.

1.1. Ventajas de las Celdas Multi-robot.

Las celda multi-robot presentan un gran número de ventajas frente a las celdas mono-robot. A continuación se presentan agrupadas en tres grandes grupos :

- Mejora de las prestaciones.
  - *Aumento de la flexibilidad.* En el artículo industrial se está llevando a cabo un gran esfuerzo para mejorar la flexibilidad de los sistemas de producción con el fin de reducir costes en la fabricación de series cortas que no justifican el desarrollo de máquinas específicas. Los entornos multi-robot son en este campo una de las soluciones más prometedoras debido a que la existencia de diferentes elementos programables en una celda de producción permite a la misma realizar una gran variedad de tareas.
    La flexibilidad introducida facilita así mismo la utilización de algoritmos de recuperación frente errores (Smith & Gini 1986) , con lo que se consigue minimizar los tiempos de paro en caso de fallas o averías en alguno de los componentes de la celda.
  - *Aumento de la productividad.* La existencia de varios elementos activos dentro de la celda producción hace que muchas tareas puedan realizarse de forma más rápida y eficiente que en el caso de diponer de un solo elemento activo (Jing 1994). Incluso puede llegar a ser más eficiente una celda multi-robot que varias celda mono-robot trabajando en paralelo.
    Cabe mencionar que de manera similar a lo que ocurre en les computadores multi-procesador, el incremento de eficiencia no suele ser lineal con el número de robots, y depende en gran medida del tipo de la tarea que se desea realizar.
  - *Posibilidad de Realización de Tareas Complejas.* Gracias a la interacción entre los diferentes manipuladores se produce un aumento de la destreza del conjunto, lo que permite realizar, entre otras, tareas de ensamblado complejas sin la necesidad de elementos externos de apoyo.
  - *Manipulación de Objetos Conflictivos.* La manipulación simultánea de un objeto por diferentes robots hace que haya un mayor control sobre el objecto manipulado. Esto es de especial interés en el caso de objetos de gran tamaño y de objetos flexibles, que son

difícilmente manipulables por un solo robot.
De manera similar, tener diferentes puntos de aprehensión permite manipular objetos no asibles. Este tipo de objetos no son manipulables en entornos convencionales si no se utilitzan técnicas especiales, como la magnetización o el vacio (succión).

- Mejora de las Características Técnicas.
  - *Aumento de la Capacidad de Carga.* La utilización de varios robots permite trabajar con objetos más pesados, cosa de gran interés en ámbitos como la construcción, las aplicaciones espaciales y subacuáticas, y el montaje de barcos y aviones.
  - *Aumento del Espacio de Trabajo.* Desde el punto de vista del espacio de trabajo, varios robots compartiendo parte de sus volumenes de trabajo genera un incremento del volumen global de trabajo de la celda, con el consecuente incremento de la accesibilidad y la posibilidad de comunicación con otros componentes sin la necesidad de elementos específico de enlace como alimentadores, cintas transportadoras, almacenes temporales, etc ...
- Especialización de los Componentes.
  Las ventajas anteriormente presentadas se refieren a entornos en los que los diferentes robots tienen prestaciones similares, pero existen también entornos en los que cada robot tiene características propias, es decir cada robot está especializado en la realización de un cierto tipo de tareas. Ello permite obtener prestaciones muy superiores a las que tendría un solo robot. Aplicaciones típicas de este tipo de entornos son el sensado activo (Zhe, Chen & Tsuji 1991), donde un robot realiza tareas de manipulación y el otro tareas de sensado para guiar la manipulación del primero, y la manipulación conjunta especializada, en la que por ejemplo un pórtico y un manipulador articulado trabajan conjuntamente para obtener una buena precisión conjuntamente con una gran capacidad de carga (Osumi & Arai 1994).

1.2. Problemática de los Sistemas Multi-robot.

Los problemas clásicos de los sistemas robotizados presentan características específicas en los entornos Multi-robot debido a la necesidad de coordinación entre los diferentes robots del entorno.

Seguidamente se comenta como influye el hecho de trabajar con más de un robot en algunos problemas típicos de la robótica:

- Control.
  Cuando varios robots manipulan conjuntamente un objeto forman una cadena cinemática cerrada lo que implica unas características cinemáticas y dinámicas propias que deben tenerse en cuenta en el diseño del sistema de control.
- Entornos de Programación.
  La existencia de los diferentes robots exige coordinar su actuación, lo que ha de quedar reflejado en los entornos de programación utilizados, especialmente en los que contienen aspectos implícitos.
  - *Planificación de trayectorias.* Una de las dificultades de la planificación de trayectorias es la existencia de numerosos grados de libertad que hacen que el espacio de búsqueda sea de gran dimensión.
    Dentro de la planificación de trayectorias para entornos multi-robot cabe distingir dos aspectos: planificación de trayectorias para varios robots que comparten espacio de trabajo y planificación de trayectorias para cadenas cinemáticas cerradas.
  - *Algoritmos de Descomposición y Secuenciación de Tareas.* Estos algoritmos deben tener en cuenta la existencia, características y disponibilidad de todos los robots del entorno, lo que hace muy grande el espacio de búsqueda con el consiguiente aumento del coste computacional.
  - *Coordinación.* Además de estas características, es necesario que los lenguajes de programación (nivel robot) incorporen instrucciones de comunicación y sincronización entre los diferentes robots.
- Simulación de Entornos Robotitzados.
  Dada la complejidad de estos entornos resulta fundamental disponer de herramientas de simulación, tanto a nivel de tareas como a nivel dinámico.
  La dinámica de varios robots actuando conjuntamente sobre un objeto no es directamente representable por un conjunto de ecuaciones diferenciales, ya que los manipuladores además de su propio comportamiento dinámico tienen diferentes restricciones producto de la interacción entre ellos. Es por ello que no pueden simularse con herramientas convencionales (McClamroch 1986) (McMillan, Sadayappan & Orin 1994).

2. PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ENTORNOS MULTI-ROBOT

Dentro de la planificación de movimientos los entornos multi-robot plantean dos problemas principales: la generación de trayectorias para robots que comparten el espacio de trabajo, y la generación de trayectorias para cadenas cinemáticas cerradas. En el primer caso se necesita la coordinación para evitar colisiones entre los diferentes robots, mientras que en el segundo caso que se produce cuando por ejemplo, dos robots manipulan simultáneamente una misma pieza, la coordinación es necesaria para compatibilizar las diferentes restricciones cinemáticas impuestas por cada robot, además de evitar colisiones entre ellos. En ambos casos, como en los sistemas mono-robot, también es necesario evitar colisiones con los objetos del entorno, ya sean éstos fijos o móviles.

2.1. Volumen de Trabajo Compartido.

La principal diferencia entre los entornos multi-robot y los mono-robot es que en los primeros el número de grados de libertad con el que se debe trabajar es normalmente más elevado, y por tanto herramientas como el espacio de configuraciones (Craig 1986) no son utilizables de manera explícita. Esto hace que, como se comentará más adelante, muchas de las técnicas utilizadas en el caso mono-robot no sean directamente aplicables al caso multi-robot.

Las propuestas en este tema se dividen en dos grandes grupos: uno en el que se trabaja con toda la información disponible (**enfoque centralizado**), es decir se intenta planificar el movimiento de todos los robots de manera simultánea; y otro, en que se va utilizando la información por partes (**enfoque distribuido**), es decir se planifica por partes y posteriormente se compatibilizan los resultados obtenidos. Como es típico, los enfoques centralizados son completos y encuentran la solución si ésta existe, aunque resultan computacionalmente costosos, mientras que los enfoques distribuidos suelen ser incompletos pero con un coste computacional menor.

2.1.1. Enfoques Centralizados.

- Extensión de los métodos existentes para entornos mono-robot.

  La mayoría de estos métodos están definidos para entornos mon-robot sobre el espacio de configuraciones. Por lo tanto es necesario disponer de herramientas de obtención y análisis de una figura equivalente para entornos multi-robot, como el espacio de configuraciones compuesto (Hwang 1990).

  Los algoritmos más ampliamemte difundidos (Latombe 1991) suelen agruparse en tres grandes grupos:

  - *Mapas de Carreteras (*Roadmaps*).* La conectividad del espacio libre se plasma en una red de curvas unidimensionales, y posteriormente se realiza la búsqueda de la trayectoria sobre la red obtenida. Para la obtención de la red se emplean diferentes técnicas como grafo de visibilidad (Lozano-Pérez 1983), diagrama de tangencias (Doyle & Jones 1994), retracciones (Canny 1985), *freeways* (Brooks 1983), o métodos de análisis probabilístico (Kavraki & Latombe 1994). Estos últimos son los más interesantes para espacios de gran dimensión como es el caso del espacio de configuraciones compuesto de los entornos multi-robot.
  - *Descomposición del Espacio Libre.* Estos algoritmos realizan un recubrimiento del espacio libre con un conjunto de figuras geométricas, y dan como resultado una secuencia de estas figuras que recubre la trayectoria a seguir. La descomposición se puede realizar de manera exacta (Brooks & Lozano-Pérez 1985) o aproximada (Lozano-Pérez 1987). En el caso de las descomposiciones aproximadas es frecuente aplicar descomposiciones jerárquicas (Hayward 1986) con el fin de reducir el coste computacional de los algoritmos.
  - *Métodos de Optimización.* La generación de la trayectoria se plantea como un problema de optimización, es decir, se define una función de coste, que suele ser función de la distancia a la posición deseada y a los objetos, y se aplica un algoritmo de optimización. La principal diferencia con otros problemas de optimización, es que en este caso interesa no sólo obtener al mínimo de la función de coste (conocido a priori), sino sobre todo, conservar el camino seguido. Los principales métodos utilizados son los algoritmos basados en potenciales (similares al método del gradiente) (Barraquand, Langlois & Latombe 1990), si bién caen con facilidad en mínimos locales; se han realizado numerosos trabajos para definir funciones de coste sin mínimos locales (Khosla & Volpe 1988) o para salir de ellos después de haberlos alcanzado (Barraquand et al. 1990). Además de los algoritmos basados en potenciales, se utilizan también otras técnicas como la programación dinámica (Barraquand & Ferbach 1993) y los algoritmos genéticos (Blume, Krisch & Jakob 1994).

- Métodos Específicos para Entornos Multi-robot.
  Estos algoritmos, aunque completos, suelen utilizar propiedades de los entornos de trabajo para los que fueron definidos, por lo que su aplicabilidad se ve restringida a entornos de las mismas características y por ello son de difícil extensión. Son frecuentes en entornos de trabajo en los que el espacio de búsqueda de posibles colisiones es un plano, como en el caso de los robots Scara (Shih, Sadler & Gruver 1991).

2.1.2. Enfoques Distribuidos.

En estos métodos la trayectoria de cada uno de los robots se calcula por separado y posteriormente se compatibilizan para evitar colisiones. Por ello, para aplicar estos enfoques es necesario disponer de métodos eficientes de predicción de colisiones entre los diferentes robots del entorno (Hayward, Aubry, Foisy & Ghallab 1995). La mayoría de métodos de compatibilización de trayectorias son incompletos y ello hace que en muchos casos sean necesarias varias iteraciones antes de encontrar una solución al problema.

- Métodos Basados en Prioridades.
  La introducción de prioridades establece una jerarquía entre los manipuladores del entorno, es decir, el brazo con mayor prioridad planifica el movimiento independientemente del resto de los manipuladores, mientras que los manipuladores con menor prioridad se adaptan al movimiento de los manipuladores con mayor priodidad. Ciertos trabajos introducen este concepto dentro del bucle de control (Freund & Hoyer 1988) mientras que otros lo hacen a través de la utilización del *C-t space* (Warren 1990), es decir el espacio de configuraciones y tiempo, en el que se planifica la trayectoría de los robots de menor prioridad. Este espacio se construye tomando el tiempo como un nuevo grado de libertad y considerando la trayectoria de los manipuladores con mayor prioridad como objetos estacionarios en este nuevo espacio.
  Enfoques de este estilo son utilizados en la planificación de trayectorias de robots redundantes con un número elevado de grados de libertad. En este caso se dan prioridades a los diferentes grados de libertad del robot (Gupta & Zhu 1994).
- Métodos Basados en *Scheduling*.
  A diferencia de los anteriores, en éstos métodos las trayectorias de los diferentes manipuladores se calculan en paralelo y posteriormente se aplica un proceso de compatibilización de las trayectorias mediante una distribución temporal adecuada de las mismas.
  Las principales técnicas aplicadas para compatibilizar las trayectorias son:
  - *Búsqueda en Grafos* (Lin & Tsai 1991). El volumen de trabajo se gestiona como un recurso que debe compartirse. Para ello se representa el espacio de trabajo en un grafo y se busca una distribución en tiempo que haga que cada uno de los robots llegue a su destino sin que se produzca ningún conflicto. Los recursos que debe ir usando el robot en cada momento los da un planificador de trayectorias ejecutado anteriormente.
  - *Espacio de Coordinación Virtual.* Esta técnica se plantea tanto en el espacio de configuraciones (O'Donnell & Lozano-Pérez 1989) como en el cartesiano (Mohri, Yamamoto & Marushima 1993). La trayectoria a seguir por cada uno de los manipuladores se parametriza en una variable independiente. Posteriormente, en el espacio definido por estas variables independientes, se localizan aquellas zonas que generan colisiones. A continuación se genera en este espacio una curva entre los puntos inicial y final tal que no intersecte estas zonas. Esta curva implica una distribución en el tiempo de las trayectorias de cada robot de forma que no hay colisión entre ellos.
    Durante la generación de la curva se pueden tener también en cuenta factores de carácter dinámico.

  Estos métodos permiten optimizarse ciertos criterios como el retardo introducido por la distribución de las trayectorias (Chang, Chung & Lee 1994).
  Además de las técnicas anteriormente comentadas existen otros enfoques de carácter más heurístico que introducen variaciones en algunos de los movimientos e incluso movimientos intermedios con el fin de compatibilizar diferentes trayectorias (Roach & Boaz 1987).
- Métodos Basados en Clasificación.
  Algunos métodos realizan una clasificación de las posibles colisiones entre los diferentes manipuladores, y utilizan algoritmos de detección y heurísticas de evitación para cada una de ellas (Nagata, Honda & Teramoto 1988).

2.2. Cadenas Cinemáticas Cerradas

Cuando varios robots sujetan conjuntamente un mismo objeto forman una cadena cinemática cerrada. Este tipo de estructuras tiene unas características propias, por lo tanto será necesario utilizar algoritmos que los tengan en cuenta. El principal problema de estos algoritmos es que han de compatibilizar las posiciones de los diferentes elementos que forman la cadena cinemática cerrada.

Para este tipo de sistemas también se ha definido un espacio de configuraciones (Koga 1994), en el que en teoría son aplicables las técnicas de las cadenas cinemáticas abiertas. Sin embargo, el número de grados de libertad y la complejidad introducida en el cálculo de los objetos en el espacio de configuraciones hace impensable el uso de esta herramienta para cadenas cinemáticas cerradas.

Para planificar trayectorias en este tipo de sistemas se han propuesto diferentes enfoques, todos ellos incompletos y con fuertes componentes heurísticas. A continuación se presentan las principales propuestas:

- Aproximaciones sucesivas (Barraquand & Ferbach 1994).
  En este enfoque se parte de una especificación del movimiento del objeto y de una serie de restricciones que deben cumplirse en todo momento. Las restricciones vienen impuestas por los contactos necesarios entre el objeto manipulado y los robots.
  En primer lugar se calcula la trayectoria que debe seguir el objeto sin tener en cuenta las restricciones; posteriormente, en un proceso iterativo esta trayectoria se modifica a medida que éstas se introducen las restricciones. Todo ello se realiza a través de programación dinámica.
  Barraquand & Ferbach (1994) consideran fijadas a priori un conjunto de posiciones en las que el objeto es estable y en las que, por tanto los robots pueden variar el punto y las características del contacto.
- Descomposición del Movimiento (Koga & Latombe 1994).
  En este enfoque se descompone el movimiento deseado en dos tipos de movimientos, caminos de transferencia (*transfer paths*) y caminos de tránsito (*transit paths*); en los primeros se mueven el objeto y los manipuladores simultáneamente mientras que en los segundos solamente se mueven los manipuladores mientras el objeto se halla en una posición estable. Estos movimientos son utilizados para cambiar las configuraciones de los diferentes manipuladores cuando llegan a una singularidad o situación equivalente.
  En primer lugar, se calcula una trayectoria libre de colisión para el objeto manipulado; seguidamente se busca una secuencia de caminos de transferencia que haga posible el movimiento ya planificado, y para finalizar, se busca un conjunto de caminos de tránsito que enlaze adecuadamente los elementos de la secuencia de caminos de transferencia indicada. Es posible que ni la secuencia de *transfer paths* ni el conjunto de *transit paths* sean únicos, en cuyo caso se selecciona aquella solución que sea óptima según algún criterio preestablecido.
- Heurísticas (Fischer 1994).
  Otro posible enfoque es la utilización de heurísticas para evitar tanto posibles colisiones como la caída en mínimos locales. De esta manera se trata de evitar la utilización del espacio de configuraciones.

En las cadenas cinemáticas cerradas es habitual que existan más grados de libertad que restricciones. Éstos pueden utilizarse durante la planificación para optimizar ciertos aspectos, como el tiempo en que se realiza el movimiento o los pares que deben realizar los diferentes actuadores (Tausac, Tabarah, Dombre & Benhabib 1994)(Cox & Tesar 1994).

3. ALGORITMOS DE CONTROL PARA ENTORNOS MULTIROBOT

El control de robots es un problema al que se ha dedicado considerable trabajo que ha dado lugar a numerosos enfoques para su resolución (Craig 1986) (Asada & Slotine 1986). La variable controlada puede ser la posición o fuerza del elemento terminal del robot (An 1986), o bien puede realizarse un control híbrido de posición y fuerza (Fisher & Mujtaba 1992).

Las cadenas cinemáticas a que dan lugar dos o más robots manipulando un objeto se caracterizan por ser redundantes. Otro aspecto importante es la necesidad de controlar las fuerzas internas que actúan sobre el objeto manipulado. La forma de tratar estos aspectos establecen la diferencia entre las diversas propuestas existentes en el diseño de controladores para cadenas cinemáticas cerradas.

3.1. Maestro-Esclavo

Este enfoque fue el seguido en los primeros trabajos realizados sobre el tema y consiste en controlar uno de los manipuladores en posición (maestro) y el resto en fuerza (esclavos). Es decir, los esclavos se limitan a seguir la evolución del maestro. Los grados de libertad se fijan a partir de las restricciones cinemáticas introducidas una vez fijada la posición del maestro (Luh & Zheng 1987).

El enfoque Maestro-Esclavo tiene una implementación simple y con algoritmos de control sencillos (Tao & Luh 1991), pero no aprovecha las ventajas introducidas por la redundancia del sistema ni quedan claros aspectos como el reparto de la carga entre los manipuladores.

Siguiendo esta filosofía se han utilizado diferentes esquemas de control, como el control óptimo (Zheng & Luh 1988), Control de línea de base (Clark & Stark 1986), linealización por realimentación (Tarn, Bejczy & Yun 1986), *Virtual Internal Mode* (Furuta, Kosuge, Shiote & Hatano 1987), control adaptativo (Arimoto, Miyazaki & Kawamura 1987) entre otros.

3.2. Cadena Cinemática Cerrada

A diferencia del caso anterior, aquí se trata la cadena cinemática como un todo. Por ello se modela (Khalil & Bennis 1995) y controla (Tarn, Bejczy & Yun 1987) el sistema completo. Existen trabajos sobre el control de posición, de fuerza (Wen & Kreutz 1989) o control híbrido de posición y fuerza (Uchiyama & Dauchez 1988).

La principal ventaja de este enfoque es que la coordinación necesaria se trata de forma natural y optimizando criterios establecidos. El principal inconvenient es que dentro de la cadena se incluye el elemento manipulado, que tiene características y especificaciones propias y diferenciadas, cosa que hace perder generalidad y homogeneidad al método. Además éste es difícilmente aplicable a robots industriales que incorporan un control de posición propio.

Los principales esquemas de control aplicados en este enfoque son el *feedforward* (Connolly & Pfeiffer 1994), el proporcional derivativo (Luecke & Gardner 1994), el control adaptativo (Hsu 1993), el control óptimo (Zefran, Kumar & Yun 1994), el control robusto (Derventzis & Davison 1992), y el control de estructura variable (Özgüner, Yurkovich, Al-Abbass & Hatano 1987).

3.3. Inyección de Fuerza

En este enfoque se trabaja directamente sobre el modelo del objeto manipulado, suponiendo que las condignas de control son las fuerzas a realizar por los diferentes manipuladores (Dellinger & Anderson 1992). A través de la composición de las diferentes fuerzas se obtiene la fuerza total que actúa sobre el objeto y por tanto la trayectoria que éste seguirá. Existen trabajos aplicando control de posición, de fuerza (Hu & Goldenberg 1989) o híbrido de posición y fuerza (Hayati 1986).

Un tema en el que se ha trabajado especialmente, dentro de este planteamiento es el análisis de los tipos de contactos entre los robots y el objeto manipulado (Paljug, Yun & Kumar 1994), así como sus posiciones óptimas (Nakamura, Nagai & Yoshikawa 1989).

La principal ventaja de este enfoque es que permite, manteniendo un control individual para cada uno de los robots, controlar de forma simple y natural las fuerza internas que actúan sobre el objeto manipulado (Walker, Freeman & Marcus 1989) y la optimización de otros criterios, como la distribución de la carga entre los diferentes manipuladores, el par realizado por cada uno de los actuadores (Walker, Freeman & Marcus 1988), y el consumo de energía, entre otros.

Como en el resto de enfoques se han presentado un gran número de propuestas sobre el tipo de control a utilizar; así se han utilizado, entre otros, el control de impedancia (Schneider & Cannon 1992), las técnicas de aprendizaje (Zilouchian 1994), el control adaptativo (Hu & Goldenberg 1989), el control óptimo (Hu & Goldenberg 1993), la linealización y el desacoplamiento por realimentación (Ramadorai, Tarn & Bejczy 1992), y el control deslizante (Costa-Castelló, Suárez & Basañez 1995).

4. APLICACIONES INDUSTRIALES Y PERSPECTIVAS

Pese a que muchos de los temas comentados en las secciones anteriores son todavía motivo de estudio, existen ya diferentes aplicaciones industriales en las que se utilizan varios robots para llevar a cabo una cierta tarea.

Algunas aplicaciones interesantes son la manipulación con precisión de objetos de gran peso utilizando un pórtico y un manipulador articulado (Osumi & Arai 1994), la manipulación de láminas metálicas flexibles de gran tamaño con dos manipuladores articulados (Al-Jarrah, Zheng & Yi 1995), y las tareas de ensamblado de automóviles (Yamada, Nagamatsu & Sato 1995).

No obstante, la generalización de los entornos multi-robot dentro de las celdas de producción requiere disponer de algoritmos de planificación de movimientos, tanto conjuntos como independientes, que funcionen de forma eficiente y en tiempo de real. En la actualidad esto está lejos de conseguirse para entornos genéticos, aunque existen aplicaciones para entornos concretos que están funcionando con gran éxito. Uno de los temas en que debe profundizarse es la utilización de información sensorial dentro de los planificadores. Por tanto será imprescindible definir el tipo de información necesaria y cómo obtenerla y procesarla.

Dentro del campo del control es imprescindible desarrollar algoritmos de coordinación para varios robots. Una de las perspectivas más prometedoras es la utilización de bucles de control externos basados en la realimentación de fuerza, aunque no es aconsejable, en general la utilización de enfoques Maestro-Esclavo, ya que no aprovechan la mayor parte de las ventajas propias de este tipo de entornos.

Pese a que muchos de los puntos necesarios para un rendimiento eficiente son aún tema de investigación, los entornos Multi-robot son una apuesta muy prometedora dentro del campo de las celdas de fabricación flexible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CICYT TAP 93-0415.

REFERENCIAS

Al-Jarrah, O., Zheng, Y. F. & Yi, K.-Y. (1995), Trajectory planning for two manipulators to deform flexible materials using compliant motions, *in* 'Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 2, Nagoya,Aichi,Japan, pp. 1517–1523.

An, C. (1986), Trajectory and force control of a direct drive arm, Report ai-tr-912 (phd thesis), MIT Artificial Intelligence Laboratory.

Arimoto, S., Miyazaki, F. & Kawamura, S. (1987), Cooperative motion of multiple robot arms or fingers, *in* 'Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 3, Raleigh, North Carolina, pp. 1407–1412.

Asada, H. & Slotine, J.-J. E. (1986), *Robot Analysis and Control*, John Wiley Sons, Inc.

Barraquand, J. & Ferbach, P. (1993), Path planning through variational dynamic programming, 33, Digital Equipment Corporation, Paris Research Laboratory, Paris.

Barraquand, J. & Ferbach, P. (1994), A penalty function method for constrained motion planning, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', San Diego, California, pp. 1235–1242.

Barraquand, J., Langlois, B. & Latombe, J.-C. (1990), 'Robot motion planning with many degrees of freedom and dynamic constraints', *Robotics Research* (5), 435–444.

Blume, C., Krisch, S. & Jakob, W. (1994), Robot trajectory planning with collision avoidance using genetic algorithms ans simulation, *in* 'Proc. Of the 25th Int. Symposium on Industrial Robots', Hannover, pp. 169–175.

Brooks, R. (1983), 'Solving the find-path problem by good representation of free space', *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics* **13**(3), 190–197.

Brooks, R. & Lozano-Pérez, T. (1985), 'A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation', *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics* **15**(2), 224–233.

Canny, J. (1985), A voronoi method for the pianomovers problem, *in* 'Proc. of the 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', St Louis, Missouri, pp. 530–535.

Chang, C., Chung, M. J. & Lee, B. H. (1994), 'Collision avoidance ot two general robot manipulators by minimun delay time', *IEEE Trans. On Systems, Man And Cybernetics* **24**(3), 517–522.

Clark, C. & Stark, L. (1986), A comparison of control laws for a cooperative robot system, *in* 'Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', Vol. 1, San Francisco, California, pp. 390–394.

Connolly, T. & Pfeiffer, F. (1994), Cooperating manipulator control with feedforward dynamic compensation, *in* 'Preprints of the Fourth IFAC Symposium on Robot Control (ISIR)', Vol. 3, Capri, Italy, pp. 993–998.

Costa-Castelló, R., Suárez, R. & Basañez, L. (1995), Control deslizante de la posición de un objeto manipulado cooperativamente por varios robots, *in* 'Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial', Tarragona.

Cox, D. J. & Tesar, D. (1994), Multi-level criteria for dual-arm robotic operations, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', San Diego, California, pp. 1243–1249.

Craig, J. J. (1986), *Introduction to Robotics, Mechanics Control*, Addison Wesley.

Dellinger, W. & Anderson, J. (1992), Interactive force dynamics of two robotic manipulators grasping a non-rigid object, *in* 'Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 3, Nice,France, pp. 2205–2210.

Derventzis, C. & Davison, E. (1992), Robust motion/force control of cooperative multi-arm systems, *in* 'Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 3, Nice,France, pp. 2230–2237.

Doyle, A. & Jones, D. (1994), A tangent based method for robot path planning, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', San Diego, California, pp. 1561–1566.

Fischer, M. (1994), Efficient path planning strategies for cooperating manipulators in enviroments with obstacles, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', San Diego, California, pp. 2418–2423.

Fisher, W. & Mujtaba, M. (1992), 'Hybrid position/force control: A correct formulation', *The Int. Journal of Robotics Research* **11**(4), 299–311.

Freund, E. & Hoyer, H. (1988), 'Real-time pathfinding in multirobot systems including obstacle avoidance', *The Int. Journal Of Robotics Research* **7**(1), 42–70.

Furuta, K., Kosuge, K., Shiote, Y. & Hatano, H. (1987), Master-slave manipulator based on virtual internal model following control concept, *in* 'Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Raleigh, North Carolina, pp. 567–572.

Gupta, K. K. & Zhu, X. (1994), Practical global motion planning for many degrees of freedom: A novel approach within sequential framework, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', San Diego, California, pp. 2038–2043.

Hayati, S. (1986), Hybrid position/force control of multi-arm cooperating robots, *in* 'Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, San Francisco, California, pp. 82–89.

Hayward, V. (1986), Fast collision detection scheme by recursive decomposition of A manipulator workspace, *in* 'Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', San Francisco, California, pp. 1040–1049.

Hayward, V., Aubry, S., Foisy, A. & Ghallab, Y. (1995), 'Efficient collision prediction among many moving objects', *The Int. Journal of Robotics Research* **14**(2), 129–143.

Hsu, P. (1993), Adaptative coordination of a multiple manipulator system, *in* 'Proc. of the 1993 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Atlanta, Georgia, pp. 259–264.

Hu, Y.-R. & Goldenberg, A. (1989), An adaptative approach to motion and force control of multiple coordinated robot arms, *in* 'Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 2, Scottsdale, Arizona, pp. 1091–1096.

Hu, Y.-R. & Goldenberg, A. A. (1993), 'Dynamic control of coordinated redundant robots with torque optimization', *Automatica* **29**(6), 1411–1424.

Hwang, Y. K. (1990), Boundary equations of configuration obstacles for manipulators, *in* 'Proc. of the 1990 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Hyatt Regency Cincinnati, Ohio, pp. 298–303.

Jing, H. W. (1994), 'Two arms are faster than one', *The Int. Journal Of Robotics Research* **13**(4), 364–368.

Kavraki, L. & Latombe, J.-C. (1994), Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', San Diego, California, pp. 2138–2145.

Khalil, W. & Bennis, F. (1995), 'Symbolic calculation of the base inertial parameters of closed-loop robots', *The Int. Journal Of Robotics Research* **14**(2), 112–128.

Khosla, P. & Volpe, R. (1988), Superquadradic artificial potentials for obstacle avoidance and approach, *in* 'Proc. of the 1988 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Philadelphia, Pennsylvania, pp. 1778–1784.

Koga, Y. (1994), On Computing Multi-Arm Manipulation Trajectories, PhD thesis, Stanford.

Koga, Y. & Latombe, J.-C. (1994), On multi-arm manipulation planning, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', San Diego, California, pp. 945–952.

Latombe, J.-C. (1991), *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Pubishers.

Lin, C.-F. & Tsai, W.-H. (1991), 'Motion planning for multiple robots with multi-mode operations via disjunctive graphs', *Robotica* **9**, 393–408.

Lozano-Pérez, T. (1983), 'Spatial planning : A configuration space approach', *IEEE Trans. on Computers* **32**(2), 108–120.

Lozano-Pérez, T. (1987), 'A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators', *IEEE Journal of Robotics and Automation* **3**(3), 224–238.

Luecke, G. & Gardner, J. (1994), 'Experimental results for force distribution in cooperating manipulator sytems using local joint control', *The Int. Journal of Robotics Research* **13**(6), 471–480.

Luh, J. & Zheng, Y. (1987), 'Constrained relations between two coordinated industrial robots for motion control', *The Int. Journal Of Robotics Research* **6**(3), 60–70.

McClamroch, N. H. (1986), Singular systems of differential equations AS dynamic models for constrained robot systems, *in* 'Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, San Francisco, California, pp. 21–28.

McMillan, S., Sadayappan, P. & Orin, D. E. (1994), 'Efficient dynamic simulation of multiple manipulator systems with singulatr configurations', *IEEE Trans. On Systems, Man Ans Cybernetics* **24**(2), 306–313.

Mohri, A., Yamamoto, M. & Marushima, S. (1993), Collision-free trajectory planning for two manipulators using virtual coordination space, *in* 'Proc. of the 1993 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Atlanta, Georgia, pp. 674–679.

Nagata, T., Honda, K. & Teramoto, Y. (1988), 'Multirobot plan generation in A continous domain: Planning by use of plan graph and avoiding collisions among robots', *IEEE Journal Of Robotics And Automation* **4**(1), 2–13.

Nakamura, Y., Nagai, K. & Yoshikawa, T. (1989), 'Dynamics and stability in coordination of multiple robotics mechanisms', *The Int. Journal of Robotics Research* **8**(2), 45–61.

O'Donnell, P. A. & Lozano-Pérez, T. (1989), Deadlock-free and collision-free coordination of two robot manipulators, *in* 'Proc. of the 1989 IEEE

Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Scottsdale, Arizona, pp. 484–489.

Osumi, H. & Arai, T. (1994), Cooperative control between two position-controlled manipulators, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 2, San Diego, California, pp. 1509–1515.

Özgüner, U., Yurkovich, S., Al-Abbass, F. & Hatano, H. (1987), Decentralized variable structure control of A two-arm robotic system, *in* 'Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 3, Raleigh, North Carolina, pp. 1248–1254.

Paljug, E., Yun, X. & Kumar, V. (1994), 'Control of rolling contacts in multi-arm manipulation', *IEEE Trans. On Robotics And Automation* **10**(4), 441–452.

Ramadorai, A., Tarn, T. & Bejczy, A. (1992), Task definition, decoupling and redundancy resolution by nonlinear feedback in multi-robot object handling, *in* 'Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Nice,France, pp. 467–472.

Roach, J. W. & Boaz, M. N. (1987), 'Coordinating the motions of robot arms in A common workspace', *IEEE Journal Of Robotics And Automation* **RA-3**(5), 437–444.

Schneider, S. A. & Cannon, r., R. H. (1992), 'Object impedance control for control for cooperative manipulation: Theory and experimental results', *IEEE Trans. on Robotics and Automation* **8**(3), 383–394.

Shih, C.-L., Sadler, J. P. & Gruver, W. A. (1991), Collision avoidance for two SCARA robots, *in* 'Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', Sacramento, California, pp. 674–679.

Smith, R. & Gini, M. (1986), Robot tracking and control issues in an intelligent error recovery system, *in* 'Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', San Francisco, California, pp. 1070–1075.

Tao, J. M. & Luh, J. (1991), Position and force controls for two coordinating robots, *in* 'Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', Vol. 1, Sacramento, California, pp. 176–181.

Tarn, T., Bejczy, A. & Yun, X. (1986), Coordinated control of two robot arms, *in* 'Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 2, San Francisco, California, pp. 1193–1202.

Tarn, T., Bejczy, A. & Yun, X. (1987), Design of dynamics control of two cooperating robot arms : Closed chian formulation, *in* 'Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Raleigh, North Carolina, pp. 7–13.

Tausac, V., Tabarah, E., Dombre, E. & Benhabib, B. (1994), Analysis and solution of the trajectory planning problem for reconfigurable two-arm robots, *in* 'Preprints Of The Fourth IFAC Symposium On Robot Control', Capri, Italy, pp. 925–931.

Uchiyama, M. & Dauchez, P. (1988), A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots., *in* 'Proc. of the 1988 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 350–356.

Walker, I. D., Freeman, R. A. & Marcus, S. I. (1988), Dynamic task distribution for multiple cooperating robot manipulators, *in* 'Proc. of the 1988 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 3, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 1288–1290.

Walker, I. D., Freeman, R. A. & Marcus, S. I. (1989), Internal object loading for multiple cooperating robot manipulators, *in* 'Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Scottsdale, Arizona, pp. 606–611.

Warren, C. (1990), Multiple robot path coordination using artificial potential fields, *in* 'Proc. of the 1990 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Hyatt Regency Cincinnati, Ohio, pp. 500–505.

Wen, J. T. & Kreutz, K. (1989), Motion and force control for multiple cooperative manipulators, *in* 'Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 2, Scottsdale, Arizona, pp. 1246–1251.

Yamada, Y., Nagamatsu, S. & Sato, Y. (1995), Development of multi-arm robots for automobile assembly, *in* 'Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 3, Nagoya,Aichi,Japan, pp. 2224–2229.

Zefran, M., Kumar, V. & Yun, X. (1994), Optimal trajectories and force distribution for coopearting arms, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, San Diego, California, pp. 874–879.

Zhe, J. Y., Chen, Q. & Tsuji, S. (1991), Active camara guided manipulation, *in* 'Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation', Sacramento, California, pp. 632–638.

Zheng, Y. F. & Luh, J. (1988), Optimal load distribution for two industrial robots handling A single object, *in* 'Proc. of the 1988 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 1, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 344–349.

Zilouchian, A. (1994), An iterative learning control technique for a dual arm robotic system, *in* 'Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation', Vol. 2, San Diego, California, pp. 1528–1533.