

PLANIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS Y CONTROL DE FUERZA EN ENTORNOS MULTI-ROBOT

Ramon Costa Castelló* Luis Basañez Villaluenga*

* *Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)*
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya
Av. Diagonal 647,11
08028-Barcelona

Resumen: En este artículo 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. El artículo se completa con una breve exposición de algunos trabajos realizados en los últimos tiempos en el Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC) dentro de este ámbito. Copyright © 2004 CEA-IFAC.

Palabras Clave : Multi-robot, control, planificación.

1. INTRODUCCIÓN

La actuación coordinada de diferentes robots en una celda de fabricación permite llevar a cabo tareas no realizables en entornos mono-robot además de incrementar la eficiencia en la realización de otros tipos de tareas¹. 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 y la problemática específica de las celdas multi-robot (Figura 1).

¹ En este trabajo el término multi-robot se utiliza para designar entornos en los que diferentes brazos manipuladores actúan conjuntamente.

1.1 Ventajas de las Celdas Multi-robot

Las celdas multi-robot presentan un gran número de ventajas frente a las celdas mono-robot.

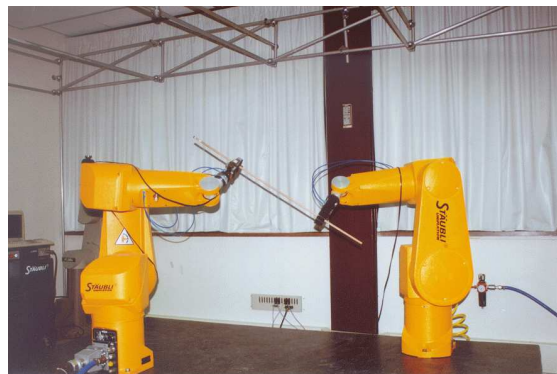


Figura 1. Ejemplo de celda multi-robot del IOC.

A continuación estas ventajas se presentan clasificadas en dos grandes grupos.

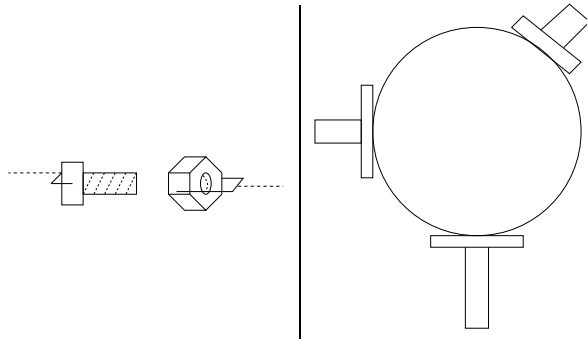


Figura 2. Realización de tareas complejas y manipulación de objetos difícilmente asibles.

1.1.1. Mejora de las prestaciones

1.1.1.1. Aumento de la flexibilidad. Uno de los retos en el ámbito industrial es el incremento de 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 gran variedad de tareas, sin una reconfiguración física.

La flexibilidad introducida por los sistemas multi-robot facilita asimismo la utilización de algoritmos de recuperación frente a errores (Smith and Gini, 1986), con lo que se minimizan los tiempos de paro en caso de fallas o averías en alguno de los componentes de la celda.

1.1.1.2. Aumento de la productividad. La utilización de varios elementos activos dentro de una celda de producción hace que muchas tareas puedan realizarse de forma más rápida y eficiente que en el caso de disponer de un solo elemento activo (Jing, 1994). Incluso puede llegar a ser más eficiente una celda multi-robot que varias celdas mono-robot trabajando en paralelo.

Cabe mencionar que, de manera similar a lo que ocurre en los computadores multi-procesador, el incremento de eficiencia no suele ser lineal con el número de robots, y depende en gran medida del tipo de tarea que se desee realizar.

1.1.1.3. 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 (Figura 2).

1.1.1.4. Manipulación de objetos conflictivos. La manipulación simultánea de un objeto por diferentes robots permite un mayor control sobre el objeto 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 difícilmente asibles de forma estable. Este tipo de objetos no son manipulables en entornos convencionales si no se utilizan técnicas especiales, como la sujeción magnética o por vacío (succión) (Figura 2).

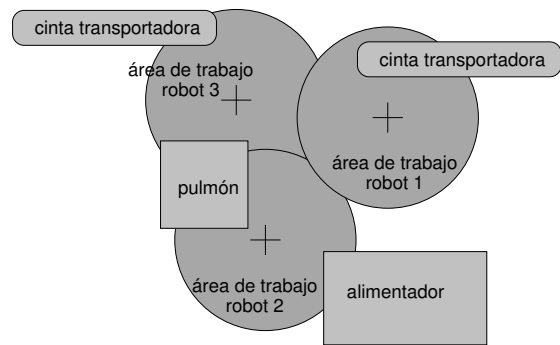


Figura 3. Ejemplo de trabajo de una celda multirobot.

1.1.2. Mejora de las características técnicas

1.1.2.1. 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 edificación, las aplicaciones espaciales y subacuáticas, y la construcción de barcos y aviones.

1.1.2.2. Aumento del espacio global de trabajo. Varios robots compartiendo parte de sus volúmenes de trabajo generan 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 específicos de enlace como alimentadores, cintas transportadoras y almacenes temporales (Figura 3).

1.1.2.3. Especialización de los robots. Las ventajas anteriormente presentadas se refieren a celdas en las que los diferentes robots tienen prestaciones similares, pero existen también entornos en

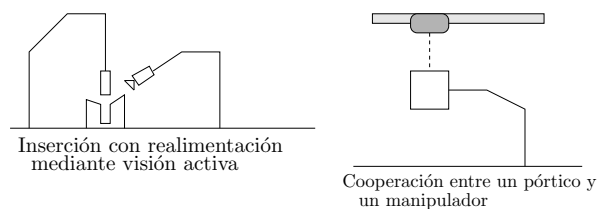


Figura 4. Especialización de los robots.

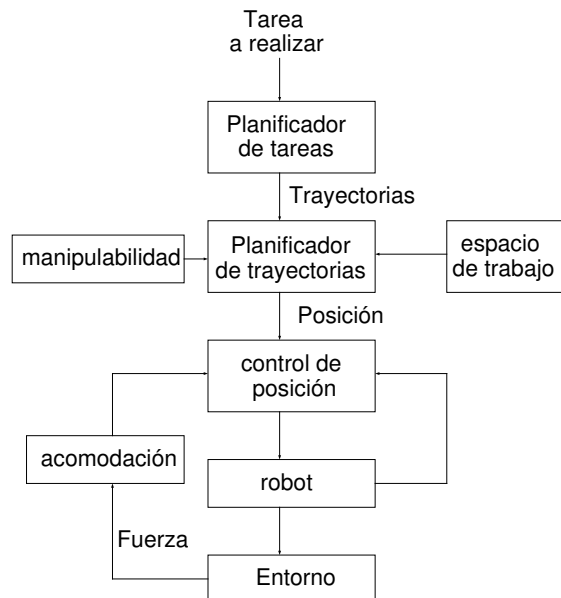


Figura 5. Esquema de tareas a resolver en la programación de robots.

los que cada robot tiene características propias diferenciadas, es decir, cada robot está especializado en la realización de un cierto tipo de tareas. Esta situación permite obtener prestaciones muy superiores a las que tendría un solo robot. Aplicaciones típicas de este tipo de entornos son el sensado activo (Zhe *et al.*, 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 robot pórtico y un robot articulado trabajan conjuntamente para obtener una buena precisión conjuntamente con una gran capacidad de carga (Osumi and Arai, 1994) (Figura 4).

1.2 Problemática de los Sistemas Multi-robot

La programación automática de celdas robotizadas implica la resolución de diferentes tipos de problemas. En la Figura 5 se muestra un esquema de los principales tipos de problemas y de la relación entre ellos. La mayoría de estos problemas, clásicos en la literatura sobre robótica, presenta características específicas en las celdas multi-robot debido a la necesidad de coordinación

entre los diferentes robots del entorno. Seguidamente se comenta la transcripción a entornos multi-robot de los principales problemas típicos de la robótica.

1.2.1. Control

Varios robots manipulan conjuntamente un objeto forman una cadena cinemática cerrada. Dicha cadena cinemática introduce restricciones algebraicas sobre el comportamiento del sistema, lo que modifica notablemente las características cinemáticas y dinámicas. Este problema se analiza con mayor detalle en la sección 3.

1.2.2. Entornos de programación

La existencia de 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.

1.2.2.1. Planificación de trayectorias. Una de las dificultades de la planificación de trayectorias en entornos multi-robot es la existencia de numerosos grados de libertad que hacen que el espacio de búsqueda sea de gran dimensión. Así mismo las restricciones cinemáticas dificultan también la aplicación de los métodos tradicionales. Este punto se presenta en mayor detalle en la sección 2.

1.2.2.2. Algoritmos de descomposición y secuenciación de tareas. Estos algoritmos deben tener en cuenta las 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.

1.2.2.3. Coordinación. Además de las características ya mencionadas, es necesario que los lenguajes de programación (nivel robot) incorporen herramientas de especificación de tareas e instrucciones de comunicación y sincronización entre los diferentes robots.

1.2.3. Simulación de entornos robotizados

Dada la complejidad de estos entornos resulta fundamental disponer de herramientas de simulación, tanto a nivel de tarea como a nivel dinámico.

La dinámica de varios robots actuando conjuntamente sobre un objeto no es directamente re-

presentable por un conjunto de ecuaciones diferenciales, ya que los manipuladores, además de su propio comportamiento dinámico, presentan restricciones producto de la interacción entre ellos. Por ello no pueden simularse con herramientas convencionales (McClamroch, 1986) (McMillan *et al.*, 1994).

Un enfoque que permite simular estos entornos de forma estructurada es el uso de una formulación basada en ecuaciones diferencial-algebraicas. En este enfoque se modela la interacción entre los robots en forma de ecuaciones algebraicas mientras que las dinámicas individuales se introducen mediante las ecuaciones diferenciales tradicionales (Costa-Castelló *et al.*, 1998).

2. PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ENTORNOS MULTI-ROBOT

La planificación de movimientos de los entornos multi-robot plantea 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, 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 trabaja es normalmente más elevado, y por tanto herramientas como el espacio de configuraciones (Latombe, 1991) no son utilizables de manera explícita. Debido a ello y tal como se comentará más adelante, muchas de las técnicas utilizadas en el caso mono-robot no son 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

2.1.1.1. Extensión de los métodos existentes para entornos mono-robot. La mayoría de los métodos centralizados están definidos para entornos mono-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 ampliamente difundidos (Latombe, 1991) suelen agruparse en tres grandes grupos:

- Hojas de rutas (*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 el grafo de visibilidad (Lozano-Pérez, 1983), el diagrama de tangencias (Doyle and Jones, 1994), las retracciones (Canny, 1985), los caminos libres (*freeways*) (Brooks, 1983), o métodos de análisis probabilístico (LaValle, 1999-2004). 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 llenado 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 and 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 obstáculos, y se aplica un algoritmo de optimización. La principal diferencia con otros problemas de optimización es que en este caso interesa no sólo obtener el mínimo de la función de coste (conocido a priori), sino sobre todo, almacenar el camino seguido.

Los principales métodos utilizados son los algoritmos basados en potenciales (similares al método del gradiente) (Barraquand *et al.*, 1990), si bien caen con facilidad en mínimos locales. Se han realizado numerosos trabajos para definir funciones de coste sin mínimos locales (Khosla and 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 and Ferbach, 1993) y los algoritmos genéticos (Blume *et al.*, 1994).

2.1.1.2. Métodos específicos para entornos multi-robot. Estos algoritmos, aunque completos, suelen utilizar propiedades particulares 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 (Freund and Rossmann, 2003). 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 *et al.*, 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 todas ellas 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 *et al.*, 1995). La mayoría de métodos de compatibilización de trayectorias son incompletos y ello hace que en muchos casos sean necesarias varias iteraciones para encontrar una solución al problema.

2.1.2.1. Métodos basados en prioridades. La introducción de prioridades establece una jerarquía entre los manipuladores del entorno, es decir, el robot 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 prioridad. Ciertos trabajos introducen esta estrategia dentro del bucle de control (Freund and 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 trayectoria de los robots de menor prioridad. Este espacio se construye tomando el tiempo como un nuevo grado de libertad y considerando la trayec-

toria 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 and Zhu, 1994).

2.1.2.2. Métodos basados en "scheduling". A diferencia de los anteriores, en estos 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 propuestas para compatibilizar las trayectorias son:

- Búsqueda en grafos (Lin and Tsai, 1991). El volumen de trabajo se gestiona como un recurso que debe compartirse. Para ello se representa el espacio de trabajo con 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 and Lozano-Pérez, 1989) como en el cartesiano (Mohri *et al.*, 1993). La trayectoria a seguir por cada uno de los manipuladores se parametriza con una variable independiente. Posteriormente, en el espacio definido por estas variables independientes, se localizan las zonas que generan colisiones. A continuación se genera en este espacio una curva entre los puntos inicial y final que no interseque estas zonas. Esta curva implica una distribución en el tiempo de las trayectorias de cada robot de forma que no haya colisión entre ellos. Durante la generación de la curva se pueden tener también en cuenta factores de carácter dinámico.

Los métodos basados en "scheduling" permiten optimizar ciertos criterios como el retardo introducido por la distribución de las trayectorias (Chang *et al.*, 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 and Boaz, 1987).

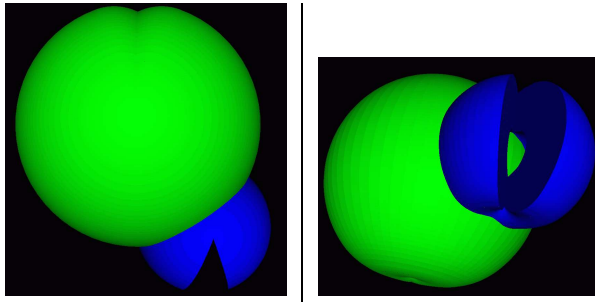


Figura 6. Espacio de trabajo y figura realizable para el caso de la figura 1.

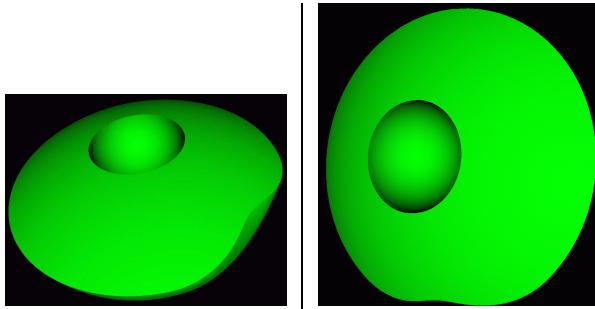


Figura 7. Volumen de trabajo de la celda robótica para el caso de la Figura 1.

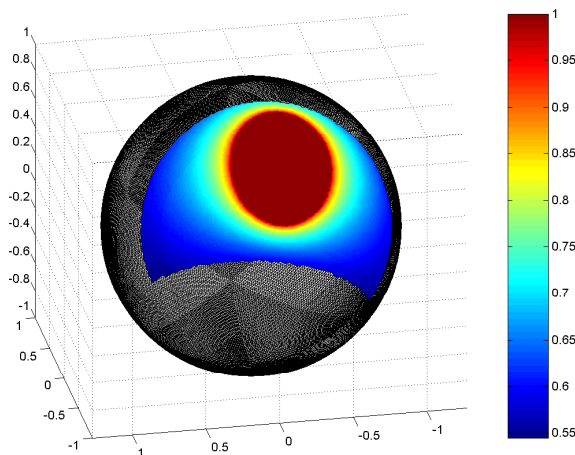


Figura 8. Rango de orientaciones alcanzables por la celda robótica en la configuración de la Figura 9.

2.1.2.3. 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 de colisiones para cada clase de colisiones (Nagata *et al.*, 1988).

2.2 Cadenas Cinemáticas Cerradas

Varios robots sujetando conjuntamente un mismo objeto forman una cadena cinemática cerrada. Este tipo de cadenas tiene unas características propias, por lo que requiere algoritmos que las tengan en cuenta. Muchos algoritmos de

planificación utilizan herramientas como la manipulabilidad o el conocimiento del espacio de trabajo de los diferentes robots. Estos conceptos deben redefinirse para que dichos algoritmos puedan ser aplicables en el caso de sistemas multirobot.

La extensión de las medidas de manipulabilidad a cadenas cinemáticas cerradas es un tema en la que se está realizando una gran esfuerzo de investigación. Para realizar esta extensión se están aplicando tanto técnicas heurísticas (Bicchi and Prattichizzo, 1998) como herramientas de geometría diferencial (Wen and Wilfinger, 1998) (Park and Kim, 1998).

Cuando varios robots manipulan conjuntamente la misma pieza se produce una reducción substancial del espacio de trabajo de los diferentes robots (Costa-Castelló and Basañez, 1999). Por ello resulta importante determinar dicho espacio tanto para posicionar relativamente los diferentes robots con el fin de obtener un espacio de trabajo que permita realizar la tareas deseadas (Costa-Castelló and Basañez, 2001), como para planificar las trayectorias. Una metodología que permite realizar ambas cosas es la que expresa el espacio de trabajo de la cadena cinemática cerrada como la intersección de diferentes figuras geométricas (Figura 6), una de ellas correspondiente al espacio de trabajo de uno de los robots y el resto a las figuras realizables del resto de los robots. Dichas figuras se obtienen a partir de los espacios de trabajo individuales y de las características de la manipulación. Mediante este planteamiento resulta sencillo obtener el espacio de trabajo del sistema completo (Figura 7). En ocasiones resulta también necesario analizar el conjunto de orientaciones que pueden alcanzarse en un punto del espacio (Costa-Castelló and Basañez, 2003). A modo de ejemplo en la figura 9 se presenta la celda robotizada del IOC en cuatro configuraciones, en las que el origen del sistema coordenado de referencia de la pieza se halla sobre el mismo punto, pero con orientaciones diferentes. En la figura 8 se muestra el conjunto de orientaciones alcanzables en ese punto del espacio.

Otro estudio de interés ha sido la definición de 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 inviable el uso real de esta herramienta para cadenas cinemáticas cerradas.

En algunas cadenas cinemáticas cerradas es habitual que existan más grados de libertad que restricciones. Los grados adicionales pueden utilizarse durante la planificación para optimizar

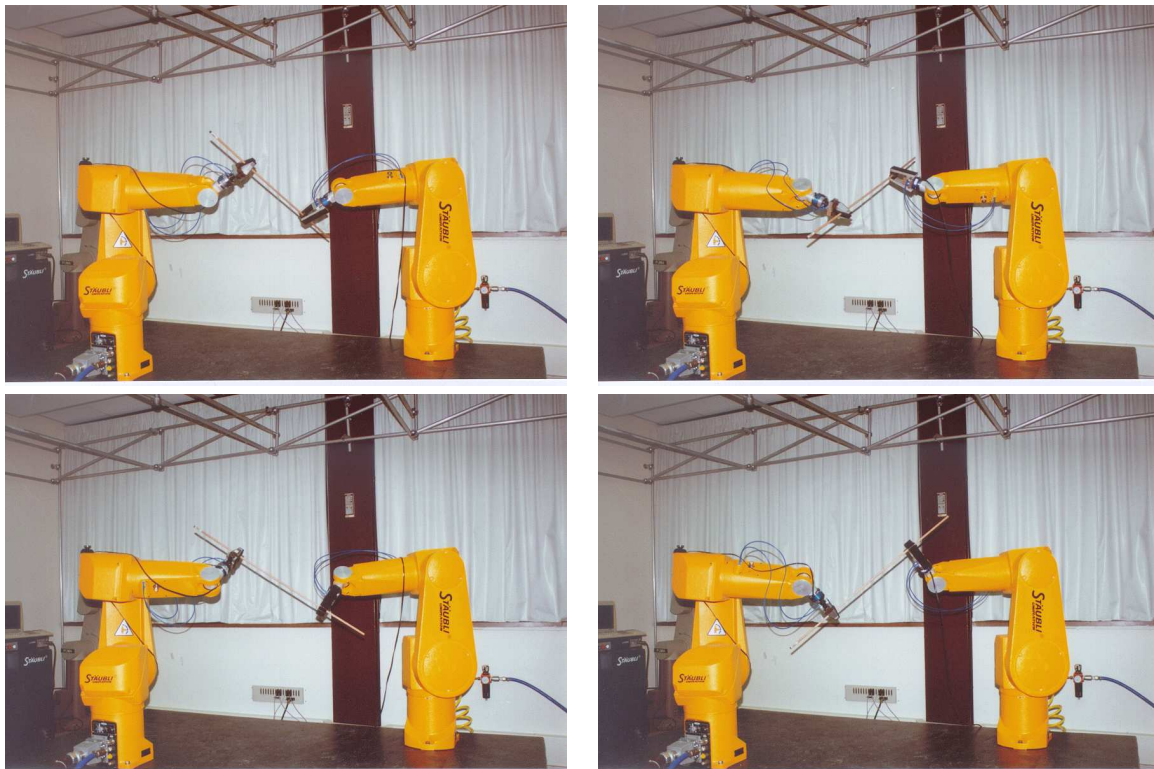


Figura 9. Manipulación conjunta: diferentes orientaciones de la pieza para una misma posición de su punto de referencia.

ciertos aspectos, como el tiempo que requiere el movimiento o los pares que deben aplicar los diferentes actuadores (Tausac *et al.*, 1994)(Cox and Tesar, 1994).

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:

2.2.1. Aproximaciones sucesivas (Barraquand and 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 se introducen las restricciones. Todo ello se realiza mediante programación dinámica.

Barraquand and 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 de la presión del objeto.

2.2.2. Descomposición del movimiento (Koga and 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 últimos 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 enlace 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.

2.2.3. Heurísticas (Fischer, 1994).

Otro posible enfoque es la utilización de heurísticas para evitar tanto posibles colisiones como la caída en mínimos locales. Su objetivo es evitar la utilización del espacio de configuraciones.

3. ALGORITMOS DE CONTROL PARA ENTORNOS MULTIROBOT

El control de robots es un problema al que se ha dedicado considerable trabajo y que ha dado lugar a numerosas propuestas para su resolución (Sciavicco and Siciliano, 2000) (Craig, 1986) (Asada and Slotine, 1986). La variable controlada puede ser la posición o la fuerza del elemento terminal del robot (An, 1986), o bien puede realizarse un control híbrido de posición y fuerza (Fisher and Mujtaba, 1992).

Tal como se ha comentado, las cadenas cinemáticas a que dan lugar dos o más robots manipulando un objeto se caracterizan por ser cerradas. Otro aspecto importante es la necesidad de controlar las fuerzas internas que actúan sobre el objeto manipulado. La forma de tratar estos aspectos establece 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 and Zheng, 1987).

El enfoque maestro-esclavo tiene una implementación simple y con algoritmos de control sencillos (Tao and Luh, 1991), pero no aprovecha muchas de las ventajas introducidas por la manipulación multirobot, como por ejemplo el reparto de la carga entre los manipuladores. Este tipo de planteamiento es aplicable tanto a robots controlados a bajo nivel (acceso a pares) como a robots industriales que incorporan un control de posición individual.

Siguiendo esta filosofía se han utilizado diferentes esquemas de control, como el control óptimo (Zheng and Luh, 1988), control de línea de base (Clark and Stark, 1986), linealización por realimentación (Tarn *et al.*, 1986), *Virtual Internal Mode* (Furuta *et al.*, 1987), y control adaptativo (Arimoto *et al.*, 1987), entre otros.

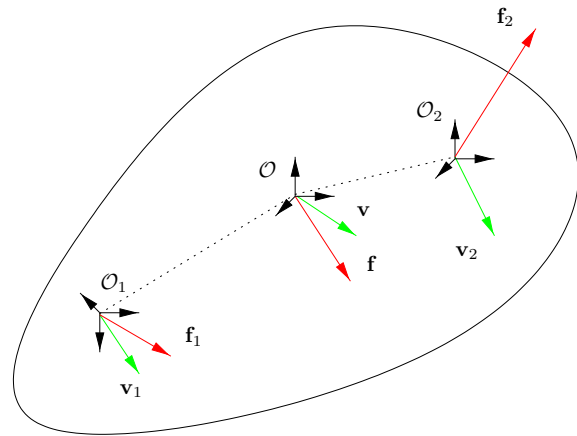


Figura 10. Sistemas de coordenadas, velocidades y fuerzas utilizados en el modelado de la prensión.

3.2 Control Conjunto

A diferencia del caso anterior, aquí se considera la cadena cinemática como un todo. Para ello se modela (Khalil and Bennis, 1995) y controla (Tarn *et al.*, 1987) el sistema completo. Existen trabajos sobre el control de posición, el control de fuerza (Wen and Kreutz, 1989) y el control híbrido de posición y fuerza (Uchiyama and Dauchez, 1988).

La principal ventaja de este enfoque es que la coordinación necesaria se trata de forma natural y optimizando criterios establecidos. El principal inconveniente es que dentro de la cadena se encuentra el objeto 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 and Pfeiffer, 1994), el proporcional derivativo (Luecke and Gardner, 1994), el control adaptativo (Ibrahim Uzmaya and Sarikayac, 2004), el control óptimo (Zefran *et al.*, 1994), el control robusto (Derventzis and Davison, 1992), y el control de estructura variable (Özgüner *et al.*, 1987).

3.3 Inyección de Fuerza

En este enfoque se trabaja directamente sobre el modelo del objeto manipulado, suponiendo que las consignas de control son las fuerzas a realizar por los diferentes manipuladores (Dellinger and Anderson, 1992) (Figura 10). 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 and

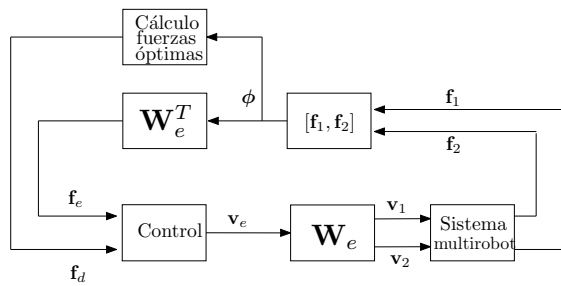


Figura 11. Esquema de un sistema de control híbrido con optimización de fuerzas internas.

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 *et al.*, 1994), así como sus posiciones óptimas (Nakamura *et al.*, 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 fuerzas internas que actúan sobre el objeto manipulado (Walker *et al.*, 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 *et al.*, 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 and Cannon, 1992), las técnicas de aprendizaje (Zilouchian, 1994), el control adaptativo (Hu and Goldenberg, 1989), el control óptimo (Hu and Goldenberg, 1993), la linealización y el desacoplamiento por realimentación (Ramadorai *et al.*, 1992), y el control deslizante (Costa-Castelló *et al.*, 1995).

3.4 Control híbrido

Un enfoque tradicional en robótica es el control híbrido. En este control el espacio se descompone en direcciones en las que se pretende controlar fuerza y otras en las que pretende controlar posición. En el caso de la manipulación multirobot esta descomposición se puede aplicar de forma relativamente simple, es decir se controla por un lado la trayectoria del objeto manipulado y, por otro, las fuerzas internas que actúan sobre el mismo (Boleko *et al.*, 2001). En la figura 11 se presenta el esquema de una implementación práctica de este tipo de control. El proceso seguido es en primera instancia descomponer las fuerzas sensadas en su componente de fuerza interna

(que no genera movimiento) y su componente activa, para realizar esta descomposición se utiliza la matriz de aprehensión (\mathbf{W}_e). La componente activa se utiliza para cerrar un lazo de control de movimiento, mientras con la componente de fuerza interna se cierra otro lazo cuyo objetivo es mantener dichas fuerzas en el valor indicado. La referencia de fuerza interna es en general incierta pues existen movimientos o situaciones en la que fuerzas internas nulas implican un mal reparto de la carga. Por dicho motivo, para obtener la referencia de fuerza interna se calcula cuál es la fuerza interna óptima de acuerdo con un cierto criterio predefinido. Un criterio que puede aplicarse (Boleko *et al.*, 2001) es la minimización del consumo energético.

Para ajustar el lazo de control de las fuerzas internas es necesario disponer de modelos de comportamiento que relacionen las fuerzas y las velocidades internas. Aunque tradicionalmente se han relacionado de forma proporcional, en los trabajos realizados en el IOC se ha desarrollado un método de ensayo que permite obtener dichos modelos experimentalmente (Boleko *et al.*, 2001). Estos modelos tienen en cuenta de forma natural los diferentes elementos existentes en el sistema (sensores y actuadores). Una vez obtenido el modelo es posible diseñar la ley de control siguiendo métodos tradicionales.

Finalmente la acción de control generada por el sistema de control de las fuerzas internas y la que proviene del control de posición deben fusionarse en una única consigna de movimiento para cada uno de los robots.

Este método permite llevar a cabo un control explícito de las variables que se pretende controlar. En contrapartida es necesario disponer de un buen conocimiento de la geometría del sistema y de la prensión del objeto.

3.5 Control de Impedancia

El control de impedancia impone a cada uno de los robots del sistema el comportamiento de un sistema físico compuesto por una masa, un muelle y un amortiguador [Figura 12]. Es decir en el caso en que no se apliquen fuerzas sobre el elemento terminal del robot éste sigue su trayectoria nominal, y en caso de aparición de fuerzas el robot modifica dicha trayectoria de la forma en que lo haría una masa sometida a dichas fuerzas y ligada a la trayectoria nominal mediante un muelle y un amortiguador. Dado que el comportamiento del robot está definido en el espacio, dichos elementos deben tener en cuenta la estructura del sistema (Fargas-Marques *et al.*, 2000) (Caccavale and Villani, 2000). El

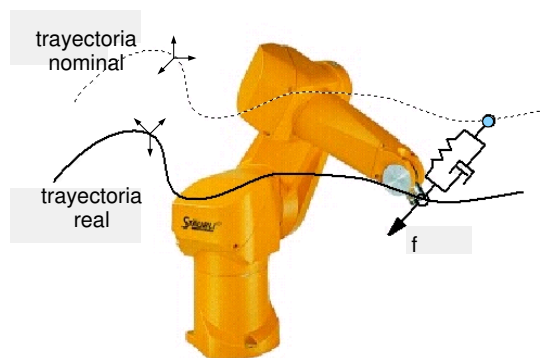


Figura 12. Trayectorias nominal y real de un robot con comportamiento de impedancia.

planteamiento está basado en el hecho de que todos los elementos del sistema son pasivos y por lo tanto el sistema completo también lo es. Ello garantiza la estabilidad del sistema completo. A diferencia del control híbrido, la información requerida del sistema es prácticamente nula, por tanto es ideal para sistemas poco estructurados o en los que se dispone poca información sobre su estructura geométrica.

En los trabajos llevados a cabo en el IOC al respecto se ha realizado una extensión del control de impedancia que permite tener en cuenta la estructura geométrica del espacio de trabajo, lo que hace que la modificación de las trayectorias esté más acorde con la física del problema (Fargas-Marques *et al.*, 2000).

En contrapartida, el control de las variables es indirecto. Otra cuestión que puede dificultar la implementación de este tipo de control es que las características de pasividad no suelen conservarse al implementar el sistema en tiempo discreto (Stramigioli *et al.*, 2004) (Fargas-Marques *et al.*, 2000).

4. APLICACIONES INDUSTRIALES Y PERSPECTIVAS

A pesar de que muchos de los temas comentados en las secciones anteriores son todavía objeto de estudio, existen desde hace algún tiempo diferentes aplicaciones en las que se utilizan varios robots para llevar a cabo una cierta tarea industrial aunque todavía, en muchos casos, con carácter experimental.

Algunas aplicaciones que han marcado avances en este campo son la manipulación con precisión de objetos de gran peso utilizando un pórtico y un manipulador articulado (Osumi and Arai, 1994), la manipulación de láminas metálicas flexibles de gran tamaño con dos manipuladores articulados (Al-Jarrah *et al.*, 1995), y las tareas

de ensamblado en la fabricación de automóviles (Yamada *et al.*, 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 real. En la actualidad esto está lejos de conseguirse para entornos genéricos, 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. Para ello, será imprescindible definir el tipo de información necesaria y cómo obtenerla y procesarla.

Dentro del campo del control se requiere el desarrollo de 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 en general no es aconsejable 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 aspectos necesarios para alcanzar 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 los proyectos CICYT DPI2002-03540 y CICYT DPI2001-2202.

REFERENCIAS

- Al-Jarrah, Omar, Yuan F. Zheng and Keon-Young Yi (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.H. (1986). Trajectory and force control of a direct drive arm. Report ai-tr-912 (phd thesis). MIT Artificial Intelligence Laboratory.
- Arimoto, S., F. Miyazaki and S. Kawamura (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, Haruhiko and Jean-Jacques E. Slotine (1986). *Robot Analysis and Control*. John Wiley Sons, Inc.
- Barraquand, Jérôme and Pierre Ferbach (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, Jérôme and Pierre Ferbach (1993). Path planning through variational dynamic programming. 33. Digital Equipment Corporation, Paris Research Laboratory. Paris.
- Barraquand, Jérôme, Bruno Langlois and Jean-Claude Latombe (1990). Robot motion planning with many degrees of freedom and dynamic constraints. *Robotics Research* (5), 435–444.
- Bicchi, A. and D. Prattichizzo (1998). Manipulability of cooperating robots with passive joints. In: *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation*. pp. 1038–1044.
- Blume, Christian, Stefan Krisch and Wilfried Jakob (1994). Robot trajectory planning with collision avoidance using genetic algorithms and simulation. In: *Proc. Of the 25th Int. Symposium on Industrial Robots*. Hannover. pp. 169–175.
- Boleko, Salvador, Ramon Costa-Castelló and Luis Basañez Villaluenga (2001). On the identification and control of internal forces in multirobot manipulation. In: *Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics)*. Seoul (Korea). pp. 108–113.
- Brooks, R.A. (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.A. and T. Lozano-Pérez (1985). A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics* **15**(2), 224–233.
- Caccavale, F. and L. Villani (2000). Impedance control for multi-arm manipulation. In: *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 4. pp. 3465 – 3470.
- Canny, J.F. (1985). A voronoi method for the piano-movers problem. In: *Proc. of the 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. St Louis, Missouri. pp. 530–535.
- Chang, Cheol, Myung Jin Chung and Bum Hee Lee (1994). Collision avoidance of two general robot manipulators by minimum delay time. *IEEE Trans. On Systems, Man And Cybernetics* **24**(3), 517–522.
- Clark, C.J. and L. Stark (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.H. and F. Pfeiffer (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, Ramon and Luis Basañez (1999). Understanding workspace structure of multi-robot systems. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ET-FA'99)*. Barcelona. pp. 129–135.
- Costa-Castelló, Ramon and Luis Basañez (2001). Robots optimal placement for cooperatively manipulation. In: *Preprints 6th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO'00)*. Vienna University of Technology. pp. 621–626.
- Costa-Castelló, Ramon and Luis Basañez (2003). Part position and orientation in cooperative multirobot manipulation. In: *Proceedings of 7th IFAC Symposium on Robot Control(SYROCO'03)*. Wroclaw (Poland). pp. 467–472.
- Costa-Castelló, Ramon, Raúl Suárez and Luis Basañez (1995). Control deslizante de la posición de un objeto manipulado cooperativamente por varios robots. In: *Memoria Técnica del Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial*. Tarragona, Spain. pp. 447–450.
- Costa-Castelló, Ramon, Robert Griñó and Luis Basañez (1998). Constrained methods in modelling constrained robotic systems. *Computación y Sistemas* **1**(3), 145–160. ISSN 1405-5546.
- Cox, Daniel J. and Delbert Tesar (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, John J. (1986). *Introduction to Robotics, Mechanics Control*. Addison Wesley.
- Dellinger, W.F. and J.N. Anderson (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.A. and E.J. Davison (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.B. and D.I. Jones (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.
- Fargas-Marques, A., R. Costa-Castelló and L. Basañez (2000). Spatial impedance control in coordinated manipulation. In: *Preprints*

- 6th IFAC Symposium on Robot Control (SY-ROCO'00). Vienna (Austria). pp. 615–620.
- Fischer, Max (1994). Efficient path planning strategies for cooperating manipulators in environments with obstacles. In: *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. San Diego, California. pp. 2418–2423.
- Fisher, W. and M. Mujtaba (1992). Hybrid position/force control: A correct formulation. *The Int. Journal of Robotics Research* **11**(4), 299–311.
- Freund, E. and H. Hoyer (1988). Real-time pathfinding in multirobot systems including obstacle avoidance. *The Int. Journal Of Robotics Research* **7**(1), 42–70.
- Freund, E. and J. Rossmann (2003). The basic ideas of a proven dynamic collision avoidance approach for multi-robot manipulator systems. In: *Proceedings of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'03)*. Vol. 2. pp. 1173 – 1177.
- Furuta, Katsuhisa, Kazuhiro Kosuge, Yoshinori Shiote and Hiromu Hatano (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, Kamal Kant and Xinyu Zhu (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, Samad (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, Vicent, Stéphane Aubry, André Foisy and Yasmine Ghallab (1995). Efficient collision prediction among many moving objects. *The Int. Journal of Robotics Research* **14**(2), 129–143.
- Hayward, Vincent (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.
- Hu, Yan-Ru and A.A. Goldenberg (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, Yan-Ru and Andrew A. Goldenberg (1993). Dynamic control of coordinated redundant robots with torque optimization. *Automatica* **29**(6), 1411–1424.
- Hwang, Yong 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.
- Ibrahim Uzmaya, Recep Burkanb and Hurvet Sarikayac (2004). Application of robust and adaptive control techniques to cooperative manipulation. *Control Engineering Practice* **12**, 139148.
- Jing, Hsu Wen (1994). Two arms are faster than one. *The Int. Journal Of Robotics Research* **13**(4), 364–368.
- Khalil, Wisama and Fouad Bennis (1995). Symbolic calculation of the base inertial parameters of closed-loop robots. *The Int. Journal Of Robotics Research* **14**(2), 112–128.
- Khosla, Pradeep and Richard Volpe (1988). Superquadratic 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, Yoshihito (1994). On Computing Multi-Arm Manipulation Trajectories. PhD thesis. Stanford.
- Koga, Yoshihito and Jean-Claude Latombe (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, Jean-Claude (1991). *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers.
- LaValle, S. M. (1999-2004). *Planning Algorithms*. [Online]. Available at <http://msl.cs.uiuc.edu/planning/>.
- Lin, Chi-Fang and Wen-Hsiang Tsai (1991). Motion planning for multiple robots with multi-mode operations via disjunctive graphs. *Robotica* **9**, 393–408.
- Lozano-Pérez, Tomás (1983). Spatial planning : A configuration space approach. *IEEE Trans. on Computers* **32**(2), 108–120.
- Lozano-Pérez, Tomás (1987). A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators. *IEEE Journal of Robotics and Automation* **3**(3), 224–238.
- Luecke, G.R. and J.F. Gardner (1994). Experimental results for force distribution in cooperating manipulator systems using local joint control. *The Int. Journal of Robotics Research* **13**(6), 471–480.
- Luh, J.Y.S. and Y.F. Zheng (1987). Constrained relations between two coordinated industrial robots for motion control. *The Int. Journal Of Robotics Research* **6**(3), 60–70.
- McClamroch, N. Harris (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, Scott, P. Sadayappan and David E. Orin (1994). Efficient dynamic simulation of multiple manipulator systems with singular configurations. *IEEE Trans. On Systems, Man And Cybernetics* **24**(2), 306–313.
- Mohri, Akira, Motoji Yamamoto and Shinya Marushima (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, Tadashi, Kunihiko Honda and Yoshiaki Teramoto (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, Yoshihiko, Kiyoshi Nagai and Tsuneo Yoshikawa (1989). Dynamics and stability in coordination of multiple robotics mechanisms. *The Int. Journal of Robotics Research* **8**(2), 45–61.
- O'Donnell, Patrick A. and Tomás Lozano-Pérez (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, Hisashi and Tamio Arai (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, Ü., S. Yurkovich, F. Al-Abbass and Hiromu Hatano (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, Eric, Xiapoing Yun and Vijay Kumar (1994). Control of rolling contacts in multi-arm manipulation. *IEEE Trans. On Robotics And Automation* **10**(4), 441–452.
- Park, F.C. and Jin Wook Kim (1998). Manipulability and singularity analysis of multiple robot systems: A geometrical approach. In: *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation*. pp. 1032–1037.
- Ramadorai, A.K., T.J. Tarn and A.K. Bejczy (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, John W. and Michael Boaz (1987). Coordinating the motions of robot arms in A common workspace. *IEEE Journal Of Robotics And Automation* **RA-3**(5), 437–444.
- Schneider, Stanley A. and Robert H. Cannon (1992). Object impedance control for control for cooperative manipulation: Theory and experimental results. *IEEE Trans. on Robotics and Automation* **8**(3), 383–394.
- Sciavicco, L. and B. Siciliano (2000). *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. 2nd ed. ed.. Springer Verlag.
- Shih, Ching-Long, J. Peter Sadler and William A. Gruver (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.E. and M. Gini (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.
- Stramigioli, Stefano, Cristian Secchi, Arjan v.d. Schaft and Cesare Fantuzzi (2004). Sampled data systems passivity and sampled port-hamiltonian systems. *IEEE Transactions of Robotics and Automation*.
- Tao, Jian M. and J.Y.S. Luh (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.J., A.K. Bejczy and X. Yun (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.J., A.K. Bejczy and X. Yun (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., E. Tabarah, E. Dombre and B. Benhabib (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, Masaru and Pierre Dauchez (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, Ian D., Robert A. Freeman and Steven I. Marcus (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, Ian D., Robert A. Freeman and Steven I. Marcus (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, Charles (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, John T. and Kenneth Kreutz (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.
- Wen, John T. and Lee S. Wilfinder (1998). Kinematic manipulability of general constrained rigid multibody systems. In: *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation*. pp. 1020–1025.
- Yamada, Y., S. Nagamatsu and Y. Sato (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, Milos, Vijay Kumar and Xiaoping Yun (1994). Optimal trajectories and force distribution for cooperating arms. In: *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. On Robotics And Automation*. Vol. 1. San Diego, California. pp. 874–879.
- Zhe, Jiang Yu, Qian Chen and Saburo Tsuji (1991). Active camera guided manipulation. In: *Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Sacramento, California. pp. 632–638.
- Zheng, Yuan F. and J.Y.S. Luh (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.