CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE COORDINACIÓN DE MÚLTIPLES ROBOTS

Gustavo Raush, Eduardo Todt, Raúl Suárez

Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales
Universidad Politécnica de Cataluña – Av. Diagonal 647, 11ª Pla. 08028 Barcelona – España
e-mails: {raush, todt, suarez}@ioc.upc.es

RESUMEN

La utilización de múltiples robots que comparten un espacio de trabajo puede aumentar la productividad e incrementar la versatilidad de las aplicaciones a tareas complejas. Como contrapartida, cuando más de un robot se mueve en un espacio de trabajo común cada uno de ellos se transforma en un obstáculo móvil para los demás.

La diversidad de enfoques y la falta de una nomenclatura uniforme hacen difícil una buena sistematización de los métodos de coordinación presentados en la bibliografía. En este trabajo se presenta una clasificación y análisis de los métodos utilizados hasta el momento para la coordinación de robots incluyendo una nomenclatura que permite unificar los estudios de los métodos de coordinación.

Palabras clave: coordinación, múltiples robots

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos CICYT TAP98-0471 y TAP96-0868

1 INTRODUCCIÓN

La coordinación de dos o más robots consiste en la compatibilización de la ejecución de sus respectivos movimientos, de forma que ejecuten sus tareas sin que ocurra colisión entre ellos. Esto se logra por medio del ajuste de los caminos geométricos para que nunca se crucen o de los perfiles de velocidad con que los robots se mueven para que no pasen por el mismo sitio al mismo tiempo.

El camino geométrico (GP, de *geometric path*) es la secuencia de configuraciones desde una configuración inicial hasta una configuración final. Por definición, una trayectoria es un camino geométrico que tiene asociada una velocidad en cada uno de sus puntos, dando lugar al perfil de velocidad (VP, de *velocity profile*) que describe la velocidad del robot en función de la configuración en que se encuentra.

Es importante observar que aquí se considera los problemas de coordinación de movimientos, y no del control de la ejecución de los mismos a nivel de seguimiento de sus consignas.

2 ASPECTOS INVOLUCRADOS EN LA COORDINACIÓN

2.1 RELACIÓN ENTRE LA GENERACIÓN Y COORDINACIÓN

Los métodos existentes para la coordinación se clasifican en acoplados y desacoplados según sea la integración de los procesos de generación de los caminos geométricos y de los perfiles de velocidad con el proceso de coordinación.

Observase que aquí se separa el perfil de velocidad del camino geométrico. Así, una modificación de perfil de velocidad implica una modificación espacio-temporal del movimiento, pero manteniendo el camino geométrico definido anteriormente. Esta distinción es necesaria, pues una alteración vectorial del perfil de velocidad podría implicar en una alteración del camino geométrico trazado.

Los métodos acoplados planifican los caminos geométricos y los perfiles de velocidad de todos los robots en una única fase, siendo los procesos de generación y de coordinación de las trayectorias inseparables (figura 1). Por otra parte, los métodos desacoplados presentan una fase de coordinación separada de la planificación de los caminos. Los métodos desacoplados pueden o no ajustar el camino geométrico (figuras 2 y 3). En el caso de que no se ajuste el camino geométrico, la coordinación se realiza introduciendo retardos puros en la ejecución de los movimientos o modificando los perfiles de velocidad. Se debe observar que el retardo puro es un caso particular de modificación de los perfiles de velocidad, que consiste en la introducción de tiempos de espera en instantes donde la velocidad del robot que sufre el retardo es nula. La figura 4 muestra un esquema de la clasificación según este criterio.

Es de destacar que no es posible alterar el camino geométrico sin ajustar el perfil de velocidad, pues de ser el perfil de velocidad una magnitud vectorial la alteración del camino geométrico implica necesariamente una alteración del perfil de velocidad, aunque se conserven los módulos de velocidad originales.

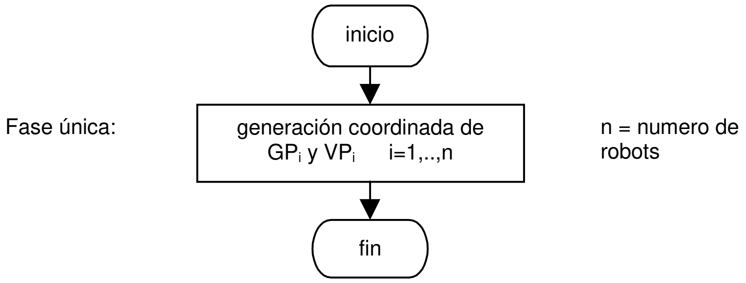

Figura 1: Método acoplado de coordinación de trayectorias

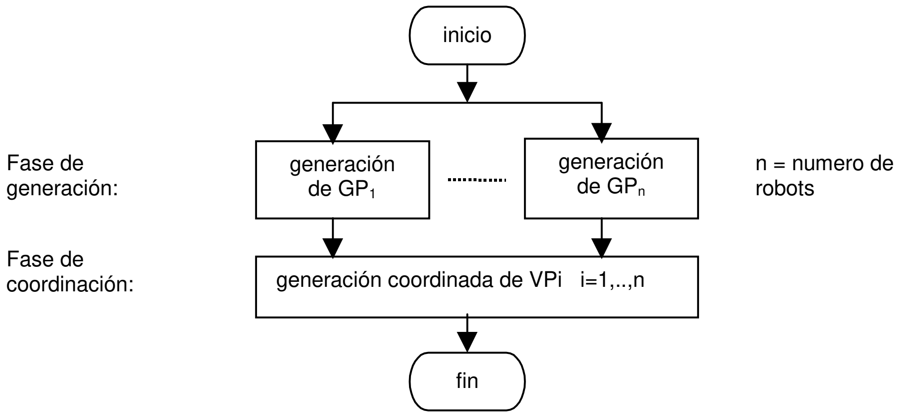

Figura 2: Método desacoplado de coordinación de trayectorias

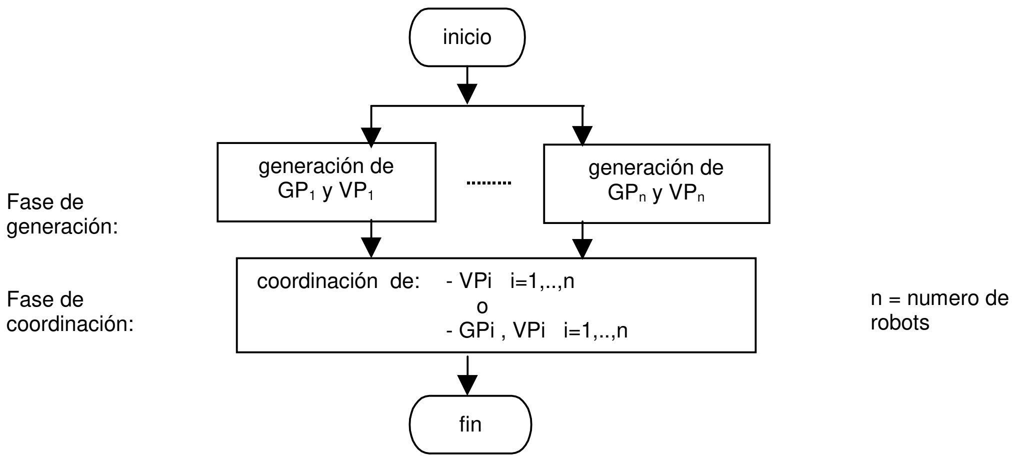

Figura 3: Método desacoplado de coordinación de caminos geométricos

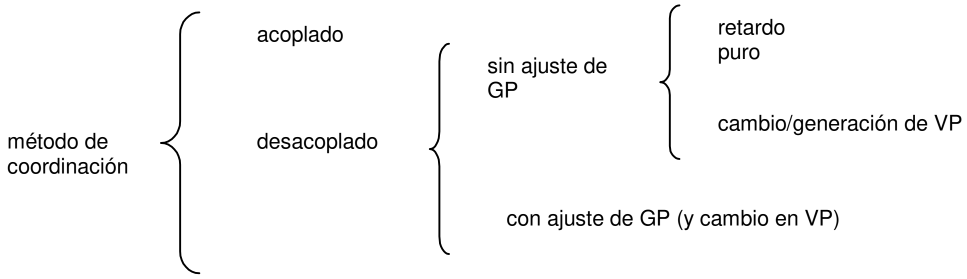

Figura 4: Clasificación de los métodos de coordinación cuanto a la generación y coordinación

2.2 INSTANTE DE REALIZACIÓN DE LA COORDINACIÓN

La coordinación puede ser realizada *a priori* o en tiempo de ejecución de los movimientos de los robots. Cuando es realizada durante la ejecución de los movimientos de los robots se denomina *on-line* y, en caso contrario, se denomina *off-line* (figura 5).

Existen dos casos de coordinación *off-line*. Uno, denominado coordinación *off-line* fija, es cuando la coordinación es determinada a priori y no es alterada hasta el final de la ejecución de las tareas coordinadas. El segundo caso, denominado coordinación *off-line* variable, es una generalización del primero, siendo la coordinación determinada a priori, pero pudiendo elegir alternativas en determinados instantes a lo largo de la ejecución, por ejemplo en función de informaciones adquiridas durante la ejecución de los movimientos. Esto es como si fuera una coordinación *off-line* fija por partes.

$$\text{coordinación}\begin{cases}\text{off-line}\begin{cases}\text{fija}\\ \text{variable}\end{cases}\\[2ex] \text{on-line}\end{cases}$$

Figura 5: Clasificación cuanto al instante de ejecución de la coordinación

2.3 EXISTENCIA DE PRIORIDADES DE COORDINACIÓN

Con Prioridades: en algún momento dado alguno de los robots tiene asignada la prioridad mas alta en la ejecución de sus movimientos, en cuyo caso, los demás deberán adaptar los suyos con el fin de evitar colisiones. Este concepto puede ser aplicado recurrentemente, definiendo una relación de orden de prioridades entre todos los robots del sistema.

Sin Prioridades: ninguno de los robots tiene más prioridad que otro a la hora de resolver los conflictos de trayectoria para evitar la colisión.

2.4 CRITERIOS DE COSTE PARA LA COORDINACIÓN

Minimización de la pérdida total de tiempo: las modificaciones introducidas en las trayectorias, para evitar las colisiones entre robots, son aquellas que introducen un retardo mínimo en la conclusión de todos los movimientos.

Suavizado de la velocidad: los cambios en las trayectorias, para evitar las colisiones entre robots, se hacen con la consigna de minimizar cambios bruscos en las velocidades.

Minimización de la energía: los cambios en las trayectorias, para evitar las colisiones entre robots, se hacen con la consigna de minimizar la energía requerida para la ejecución de los movimientos.

Minimización de la longitud de camino: los cambios en las trayectorias, para evitar las colisiones entre robots, se hacen con la consigna de minimizar la longitud del camino recorrido por todos los robots.

2.5 REPRESENTACIÓN DE LOS ESPACIOS DE TRABAJO

Los algoritmos son aplicados sobre diferentes representaciones del espacio de trabajo, tales como el espacio geométrico, el espacio de configuraciones o el espacio de coordinación. A continuación se presenta una definición sucinta de los diferentes espacios de trabajo utilizados para la solución del problema de coordinación.

2.5.1 ESPACIO FÍSICO (*P-SPACE*)

Espacio físico es el espacio de trabajo del robot representado directamente en terminos del sistema de coordenadas que describen el mundo.

2.5.2 ESPACIO DE CONFIGURACIONES (*C-SPACE*)

Para especificar la posición de los puntos de un objeto rígido es necesario definir un conjunto de *n* parámetros independientes que determinan la posición y orientación del objeto. El espacio *n*-dimensional generado por estos parámetros se denomina espacio de configuraciones (*C-space*) [16] y cada punto de este espacio es una configuración.

El espacio de configuraciones compuesto (*Composite C-space*) es el espacio formado por la combinación de dos o más *C-space* de diferentes robots. En un único espacio se representa las configuraciones de más de un robot.

El espacio de configuraciones-tiempo (*CT-space*) es el espacio de configuraciones (*C-space*) aumentado con la dimensión temporal. El espacio de configuraciones tiempo compuesto (*CCT-space*) es el espacio formado por la combinación de dos o más *CT-space de diferentes robots*. En un único espacio se representa las configuraciones de más de un robot con la dimensión temporal.

2.5.3 ESPACIO BASADO EN LA PARAMETRIZACIÓN DE LOS CAMINOS

En este espacio está definido para cada robot un parámetro de camino. El parámetro de camino identifica de forma unívoca las configuraciones del robot sobre el camino. En general este parámetro esta normalizado, variando entre 0 y 1, desde la configuración inicial hasta la final, que pueden coincidir en una tarea repetitiva.

El espacio camino-tiempo (*ST-space*) es la representación temporal de la evolución del parámetro de camino.

El espacio de coordinación (*SS-space*) es el espacio *n*-dimensional formado por *n* parámetros de camino.

3 TRABAJOS REPRESENTATIVOS DE LOS PRINCIPALES ENFOQUES EXISTENTES

En esta sección se presenta un análisis de trabajos representativos de los principales enfoques existentes para la resolución del problema de coordinación de robots.

3.1 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN EL ESPACIO FÍSICO

Uno de los enfoques más directos para conseguir la coordinación es partir de la idea de identificar en el espacio físico las regiones que pueden ser alcanzadas por cada uno de los robots. La intersección de las regiones de distintos robots representa la parte del espacio donde pueden haber colisiones. A partir de esta identificación se aplican diferentes métodos para evitar las colisiones. Dentro de este enfoque se encuentran los trabajos de Cheng [06], Faverjon y Tournassoud [08], Tornassoud [22], Alison [01], Shih, Sadler y Gruver [19]. Cheng [06] identifica las regiones del espacio barridas por los manipuladores y trata de modificar los caminos planificados a priori con tal de que ambos robots eviten estas regiones simultaneamente. Si esto no es posible entonces se utilizan técnicas de semáforos con el propósito de organizar el secuenciamiento de las tareas de forma que las regiones de conflicto sólo estén ocupadas por uno de los robots a la vez.

Dentro del mismo enfoque, una propuesta diferente es la de Tornassoud [22] y Faverjon y Tournassoud [08], que establece una medida de distancia entre los robots. A partir de la evaluación continua de esta distancia, cuando es necesario se modifican los caminos físicos con tal de impedir que la misma se encuentre debajo de un umbral prefijado.

Shih, Sadler y Gruver [19] transforman el espacio geométrico con la finalidad de facilitar la representación de la región de colisiones. A partir de los puntos de intersección de los segmentos extremos de dos robots se hace la parametrización del espacio físico. En cada uno de estos segmentos, los puntos de intersección con el otro definen una recta, siendo asignado el valor parametrizado "0" en una extremidad de ella y "1" en la otra. Dentro del nuevo espacio parametrizado la región de colisiones resulta un cuadrado unitario y se planifica un camino libre de colisiones que representa la evolución conjunta de los movimientos de los dos robots. A partir del camino hallado se hace la transformación inversa para obtener el camino de cada robot dentro del espacio físico original.

3.2 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN EL ESPACIO DE CONFIGURACIONES

La principal desventaja del espacio de configuraciones es la gran dimensión que puede tener, haciendo que su exploración para buscar caminos libres de colisiones sea muy costosa en términos computacionales. Barraquand, Langlois y Latombe [03] exponen varios métodos de exploración de los espacios de configuraciones compuestos para coordinar múltiples robots. Para evitar las regiones formadas por los obstáculos fijos y móviles se valen de potenciales artificiales que alejan los caminos de coordinación de las regiones de colisión.

No obstante los problemas que acarrea la gran dimensión del espacio de configuraciones cuando se trata de hacer una coordinación de una celda de robots, Li y Latombe [15] presentan un método de coordinación en tiempo real de una celda compuesta por dos robots y una cinta de alimentación de las piezas a ser montadas. Estos robots ejecutan tareas que cambian aleatoriamente con el tiempo, por lo tanto se deben realizar las replanificaciones de ambos según corresponda. Para dar respuestas rápidas, hacen simplificaciones en el espacio de trabajo de los robots, con lo que se limita el número de obstáculos que los robots pueden encontrar a su paso.

3.3 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN EL ESPACIO DE CAMINO PARAMETRIZADO

Con la parametrización del camino de los robots se logra un nivel de abstracción del problema de coordinación superior al utilizado en la representación espacio físico. Kant y Zucker [09], Lee y Lee [10], y Chang, Chung y Lee [05] utilizan el *ST-space* partiendo de una planificación independiente de las tareas de cada robot. El trabajo de Kant y Zucker [09] es uno de los primeros que desdoblan la planificación de la trayectoria en la planificación del camino geométrico y la planificación del perfil de velocidades. El procedimiento seguido produce una significativa reducción de la complejidad en la solución del problema de la coordinación.

Con la representación temporal del parámetro de camino de un robot se construye el *ST-space*. Dentro de este espacio se representan las partes del camino que tienen colisión con el otro robot, llamadas en conjunto región de colisiones. Dentro del *ST-space*, la evolución temporal del camino es una función monótona creciente, dado que no se acepta que el robot retroceda sobre el camino geométrico. Si se comprueba que la curva que representa esta evolución temporal intersecta a la región de colisiones se sabe que los robots no podrán ejecutar sus tareas libre de ellas, por lo tanto se procede a aplicar algún método de replanificación de la trayectoria. Lee y Lee [10] modifican el perfil de velocidades de uno de los robots mediante una sucesión de ciclos de aceleración y desaceleración hasta haber logrado que la evolución temporal deje de intersectar a la región de colisiones.

Por otra parte, Chang, Chung y Lee [05], y Shin y Zheng [20] calculan el valor del retardo puro que debe ser aplicado al inicio de la ejecución de los movimientos de uno de los robots para que no ocurra colisión. Esto equivale a desplazar la curva de la evolución temporal del camino de este robot con tal que la misma no intersecte a la región de colisiones.

3.4 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN EL ESPACIO DE COORDINACIÓN

En el espacio de coordinación (*SS-space*) se representa la región de colisiones y la evolución conjunta de los movimientos de los robots. Las características de representar de igual forma y en el mismo espacio todos los robots, junto con el hecho de tener una única variable por robot, facilitan la obtención de soluciones para el problema de la coordinación. Una curva dentro de este espacio con la propiedad principal de ser monótona creciente se llama curva de coordinación y representa una solución de coordinación dentro del conjunto de soluciones posibles. O'Donnel y

Lozano-Pérez [18] hacen uso del *SS-space* para resolver el problema de la coordinación buscando dentro de este espacio la curva de coordinación que evita la región de colisiones.

Otros autores también utilizan el *SS-space* para encontrar la curva de coordinación, optimizando en tiempo de ejecución de las tareas. Bajo este enfoque Lee, Moradi y Yi [13], y Lee y Kardaras [14] resuelven el problema de la coordinación a partir del trazado de la curva dentro de *SS-space*. La curva buscada se ajusta por medio de una función lineal por tramos, apartando de la región de colisiones cualquier tramo que pase dentro de ella por medio de una función de potenciales artificiales.

Lee, Nam y Lyou [11] y Mohri, Yamamoto y Marushima [17] encuentran la curva de coordinación a partir de la optimización por medio de programación dinámica. Para conseguirlo, se pone la condición principal de minimizar el tiempo de ejecución de las tareas teniendo en cuenta la dinámica de los robots y las restricciones de pares. Con el resultado de esta búsqueda se puede diseñar el perfil de velocidades para cada robot, de tal manera, que al ejecutarse simultaneamente, cada robot lleva a cabo su tarea sin colisionar con el otro.

Bien y Lee [04] hacen uso conjunto del *SS-space y ST-space* para obtener la coordinación de los robots. A partir de la planificación independiente de ambos se obtiene la región de colisiones en el *SS-space.* Con la región definida en *SS-space* y el perfil temporal de la longitud de camino recorrido se hace una proyección de la región desde *SS-space* al *ST-space.* A partir de la imagen en *ST-space* se calcula el retardo puro que se debe aplicar al inicio de la tarea del robot que se penalizará. Luego se invierten los roles de los robots y se aplica el procedimiento anterior, recalculando el retardo que necesita el segundo robot. Como paso final, se elige penalizar el robot que necesita el retardo más pequeño.

3.5 LISTADO DE TRABAJOS REPRESENTATIVOS

En la tabla 1 se presenta un listado de trabajos representativos de los principales enfoques de coordinación, juntamente con la correspondiente clasificación de acuerdo con los critérios definidos en este artículo.

Tabla 1: Trabajos representativos de los principales enfoques de coordinación

Referencias	Método Coord.	On/Off Line	Con Prioridad	Criterio Coste	Espacio Trabajo
Erdmann y Lozano-Pérez 1986 [07]	A	OFF	si	NA	CCT
Tournassoud 1986 [22]	A	ON	si	SV	P
Kant y Zucker 1986 [09]	DCPV	OFF	si	MPTT	ST
Lee y Lee 1987 [10]	DCPV	OFF	si	MPT	ST
Faverjon y Tournassoud 1987 [08]	A	OFF	si	NA	P
O´donnel y Lozano-Pérez 1989 [18]	DRP	OFF	si	MPT	SS
Shih, Sadler y Gruver 1991 [19]	A	OFF	no	MLCR	P
Barraquand y Latombe 1991 [02]	A	OFF	no	MLCR	CC
Barraquand, Langlois y Latombe 1992 [03]	A	OFF	no	MLCR	CC
Bien y Lee 1992 [04]	DRP	OFF	no	MPTT	SS y ST
Shin y Zheng 1992 [20]	DRP	OFF	no	MPTT	ST
Morhi, Yamamoto y Marushima 1993 [17]	DCPV	OFF	no	MPTT	SS
Alison 1994 [01]	DGP	ON	si	MLCR	P
Chang, Chung y Lee 1994 [05]	DRP	OFF	si	MPT	ST
Lee, Nam y Lyou 1995a [12]	DRP	OFF	no	MPTT	SS y ST
Cheng 1995 [06]	DGP	OFF	no	MLCR	P
Lee, Nam y Lyou 1995b [11]	DCPV	OFF	no	MPTT	SS
tenBrink y Popovik 1996 [21]	A	OFF	no	MLCR	CCT
Lee, Moradi y Yi 1997 [13]	DRP	OFF	no	MPTT	SS
Lee y Kardaras 1997 [14]	DRP	OFF	no	MPTT + SV	SS
Li y Latombe 1997 [15]	A	ON	si	MPTT	CC + ST

Nomenclatura:
A: Acoplado
DCPV : Cambio del Perfil de Velocidades
DGP : Desacoplado con cambio del camino geométrico
DRP: Desacoplado con retardo puro
MLCR : mínima longitud de camino recorrido
MPT: mínima pérdida de tiempo para el robot elegido
SV : suavizado de la velocidad
SS: espacio de coordinación
ST: espacio camino-tiempo
CC: espacio de configuración compuesto
CCT: espacio de coordinación compuesto
MPTT : mínima pérdida total de tiempo
OFF : Off Line Fija
ON: On Line
P: espacio físico

4 CONCLUSIONES

Del análisis realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- Hay una evolución en el grado de abstracción del problema de la coordinación a lo largo del tiempo. Los primeros trabajos muestran un tratamiento dentro del espacio geométrico y con los sucesivos trabajos se observa la formulación de espacios mas apropiados para el problema planteado. Se observa una simplificación en la complejidad de los métodos utilizados para resolver un problema que mantiene la complejidad inicial.
- El número de robots considerados en la mayoría de los trabajos analizados no excede de dos.
- Solo se considera el criterio temporal. Los otros posibles criterios no son considerados, como por ejemplo mínima energía y mínima modificación del camino.
- No se menciona la complejidad que tiene la obtención de la región de colisiones.
- Los trabajos actuales se centran mayormente en los métodos desacoplados. Estos métodos no garantizan encontrar siempre una solución aunque esta exista. No obstante son métodos preferidos por la reducción en la complejidad de la determinación de la solución.
- Los métodos acoplados en general hacen los análisis dentro del espacio físico.
- No se observa una especial preocupación por priorizar alguno de los robots.

5 REFERENCIAS

[01] Alison P. and Gilmartin M. J. (1994). Advances in Robot Kinematics and Computationed Geometry, Strategic Collision Avoidance of Two Robot Arms in the Same Work Cell, pp. 467--476, Editors: A. J. Lenarcic and B. B. Ravani, A. J. Lenarcic and B. B. Ravani.

[02] Barraquand J. and Latombe J.-C. (1991), Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach, The Int. Journal of Robotics Research, Vol 10 (6) pp 628-649

[03] Barraquand J., Langlois B. and Latombe J.-C. (1992), Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning, IEEE Trans. on Sys., Man and Cyb., Vol 22 (2) pp 224-241

[04] Bien Z. and Lee J. (June 1992). A Minimum-Time Trajectory Planning Method for Two Robots, IEEE Transaction on Robotics and Automotion, Vol. 8 (3), pp. 414-418.

[05] Chang C., Chung M. J. and Lee B. H. (March 1994). Collision Avoidance of Two General Robot Manipulators by Minimum Delay Time, IEEE Trans. on Sys. Man and Cybernetics, Vol. 24 (3), pp. 517-522

[06] Cheng X. (1995). On-line Collisioon-free Path Planning for Service and Assembly Tasks by a Two-Arm Robot, IEEE Int. Conf. on Rob. and Autom., pp. 1523-1528.

[07] Erdmann M. and Lozano-Pérez T. (1986). On Multiple Moving Objects, Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Autom., Vol. 3, pp. 1419 –1424.

[08] Faverjon B. and Tournassoud P. (1987). A practical approach for pat planning of manipulator with a high number of degree of freedom, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1152-1159

[09] Kant K. and Zucker S. W. (Fall 1986). Toward Efficient Trajectory Planning: The Path-Velocity Decomposition. The Intern. J. of Robotics Research", Volume 5 (3), pp 72-89.

[10] Lee B. H. and Lee, C. S. G. (January/February 1987). Collision-Free Motion Planning of Two Robots, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol SMC-17 (1), pp 21-32.

[11] Lee J., Nam H. S. and Lyou J. (1995). A Practical Collision-Free Trajectory Planning for Two Robot Systems, Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Autom., pp 2439-2444.

[12] Lee J. and Nam S. H. and Lyou J. (1995). A Practical Collision-Free Trajectory Planning for Two Robot Systems, Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Autom., pp. 2439 – 2444.

[13] Lee S., Moradi H. and Yi C. (August 1997). A Real-Time Dual-Arm Collision Avoidance Alghorithm for Assembly, Proc. IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, pp. 7-12

[14] Lee S. and Kardaras G. (1997). Collision-Free Path Planning with Neural Networks, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. and Autom., pp. 3565 – 3570.

[15] Li T.-Y. and Latombe, J.-C. (April 1997). On-Line Manipulator Planning for Two robot Arms in a Dynamic Environment, The Int. Journal of Robotics Research, Vol. 16 (2), pp. 144-167.

[16] Lozano-Pérez T., (February 1983). Spatial Planning: A Configuration Space Approach, IEEE Transaction on Computers, Vol. C-32 (2) pp. 108-120.

[17] Mohri A., Yamamoto M. and Marushima S. (1993). Collision-Free Trajectory Planning for Two Manipulators Using Virtual Coordination Space, Proc. IEEE Conf. on Rob. and Autom., Vol. 2, pp. 674-679.

[18] O'Donnell P. A.and Lozano-Pérez T. (1989). Deadlock-Free and Collision-Free Coordination of Two Robots Manipulator, Proc. IEEE Intern. Conf. on Rob. and Autom., Vol. 1, pp 484-489

[19] Shih C.-L. and Sadler J. P. and Gruver W. A. (April 1991). Collision Avoidance for Two SCARA Robots, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automotion, pp. 674--679

[20] Shin K. G. and Zheng Q.(October 1992).Minimum-Time Collision-Free Trajectory Planning for Dual-Robot Systems, IEEE Trans. on Robotics and Automotion, Vol. 8 (5), pp 641-644

[21] ten Brink C. and Popovic D. (1996). A Collision-Space Approach to Trajectory Planning of Coordinated Robots, 1996 IFAC 13th Triennial World Congress, Vol. 1 , pp. 205 – 210.

[22] Tournassoud P. (1986). A Strategy For Obstacle Avoidance And Its Application To Multi-Robot Systems, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automotion, pp. 1224-1229.