



**I
N
A
O
E**

Generación de Formaciones Estáticas en Robótica Colectiva

Yazid León Fernández de Lara
Angélica Muñoz Meléndez

Reporte Técnico No. CCC-04-008
02 de diciembre de 2004

© Coordinación de Ciencias Computacionales
INAOE

Luis Enrique Erro 1
Sta. Ma. Tonantzintla,
72840, Puebla, México.



Generación de Formaciones Estáticas en Robótica Colectiva

Yazid León Fernández de Lara
Angélica Muñoz Meléndez
Computer Science Department
National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics
Luis Enrique Erro # 1, Santa María Tonantzintla, Puebla, 72840, México
{yazid,munoz}@inaoep.mx

2 de diciembre de 2004

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de coordinación entre agentes o robots móviles mediante formaciones geométricas. Se realizó una simulación en StarLogo© [1] de dos tipos de formaciones geométricas entre agentes, una circular y otra en forma de V. La generación y el mantenimiento de formaciones por un grupo de robots es importante en aplicaciones como la exploración y la vigilancia de espacio aéreo o de terreno.

Palabras clave: robot móvil, formaciones geométricas, coordinación espacial.

1. Introducción

La robótica colectiva busca diseñar sistemas compuestos de múltiples robots capaces de resolver conjuntamente un problema. Los robots componentes de estos sistemas multi-robot son en general simples en términos de diseño y de control, homogéneos y de bajo costo. Están orientados a la resolución de problemas en los cuales la intervención de un único robot no es suficiente o resulta muy costosa en términos de tiempo y de diseño por ejemplo, como puede ser el transporte de objetos voluminosos, la manipulación de material peligroso, la exploración o vigilancia de terreno.

La generación y el mantenimiento de formaciones por un grupo de robots es una línea de investigación dentro del vasto campo de la robótica colectiva.

Las formaciones son estructuras espaciales constituidas por un conjunto de robots en donde cada uno representa un punto o vértice de la estructura en cuestión y las líneas entre los vértices representan los contornos de la estructura. Estas formaciones son típicamente lineales o poligonales.

Sin embargo, 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. Por tal motivo, se requiere de coordinación entre los robots. En este trabajo se aborda el problema de coordinación entre agentes o robots móviles mediante formaciones geométricas.

El resto de este artículo está organizado en la siguiente forma, en la sección 2 se presenta un panorama sobre coordinación en sistemas multi-robot, en la sección 3 se presentan trabajos relacionados, la sección 4 aborda la metodología utilizada, en la sección 5 se discuten resultados preliminares y finalmente en la sección 6 se presentan conclusiones y perspectivas.

2. Coordinación de Sistemas Multi-robot

La coordinación de dos o más robots consiste en la sincronización de sus respectivos movimientos, de forma tal que ejecuten sus tareas sin que ocurra colisión entre ellos. Esto se logra por medio del ajuste de los caminos geométricos y de los perfiles de velocidad para que nunca se crucen, variando las velocidades de los motores de los robots. 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.

2.1. Métodos de Coordinación

Los métodos existentes para la coordinación de robots 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. El VP se relaciona con el GP, ya que una modificación éste implica una modificación espacio-temporal del movimiento, pero manteniendo el GP definido anteriormente. Una alteración vectorial del VP podría resultar en una alteración del GP trazado. Los métodos acoplados planifican los GP y los VP de todos los robots en una única fase, siendo los procesos de generación y de coordinación de las trayectorias inseparables. 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 GP. En el caso de que no se ajuste el GP, la coordinación se realiza introduciendo retardos puros en la ejecución de los movimientos o modificando los VP. El retardo puro es un caso particular de modificación de los VP, que consiste en la introducción de tiempos de espera en instantes donde la velocidad del robot que sufre el retardo es nula.

No es posible alterar el GP sin ajustar el VP, debido a que este último es una magnitud vectorial, la alteración del GP implica necesariamente una alteración del VP, aunque se conserven los módulos de velocidad originales.

2.2. Tiempo de Ejecución de la Coordinación

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

Existen dos casos de coordinación *off-line*. Uno, denominado coordinación *off-line* fija, 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 de las tareas coordinadas.

3. Trabajo Relacionado

Se han presentado diversos trabajos orientados a la coordinación de sistemas multi-robot. Para coordinar una celda compuesta de robots, Li y Latombe [2], 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. Bien y Lee [3] hacen uso conjunto de 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. El conjunto SS-space es el espacio de coordinación n-dimensional formado por n configuraciones del robot sobre un camino, y el conjunto ST-space es una representación temporal de la evolución de las configuraciones del robot sobre el camino.

Por lo que respecta a la generación de formaciones, Sugihara y Suzuki [4] crean diversas formas geométricas definiendo algoritmos simples que se ejecutarán por una gran cantidad de agentes; robots simulados que pueden formar líneas, círculos, polígonos y distribuirse dentro de un círculo o de un polígono convexo en el plano. Ünsal [5] utiliza una marca de la meta e introduce un método para formar equipos de robots simulados separados alrededor de varias marcas. Un robot se acerca a una marca hasta cierta vecindad predefinida $d + \varepsilon$. Cuando un robot se encuentra dentro de la región circular definida por $d - \varepsilon$, es rechazado. En la región ε , cada robot se mueve a una distancia predeterminada de su compañero más cercano.

4. Formaciones Geométricas Estáticas

4.1. Descripción

En esta sección se describe una serie de experimentos realizados con robots simulados que deben distribuirse y permanecer en una formación espacial. Esta tarea se inscribe dentro del área de coordinación multi-robot, pues se trata de un problema cuyo objetivo a alcanzar es una estructura espacial formada por los robots, los cuales deben coordinar sus movimientos para integrar la formación y evitar colisión entre ellos.

La simulación de formaciones se realizó en StarLogo©, un ambiente de simulación desarrollado en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) por Resnick [6]. Se realizaron formaciones geométricas de tipo circular y en forma de “V”. El número de agentes participante de estas formaciones fue variable, del orden de 40, 60 y 80. Cada uno de los agentes tiene un identificador (ID) y un conjunto de propiedades descritas en el cuadro 1.

Agente	
<i>Percepción</i>	<i>Actuación</i>
Señales de vecinos	Emitir su tipo
Posición propia	Emitir su posición
Posición de la meta	Dirigirse hacia la meta

Cuadro 1: Propiedades de un agente. Las señales transmitidas entre los agentes corresponden al tipo de agente, ya sea marca o vecino, y se transmiten en un radio de 5 posiciones en el ambiente

Un agente es representado como un punto en un espacio bi-dimensional, puede desplazarse un número determinado de posiciones y cambiar su orientación en un ángulo específico.

Un agente determinado juega el papel de marca para reunir a su alrededor a los demás agentes y crear en ese punto las distintas formaciones. Los puntos de reunión pueden variar entre uno y cuatro, según el número de formaciones que se requieran.

4.2. Metodología

Para realizar la simulación de formaciones geométricas en StarLogo©, primero se programó una función que distribuye aleatoriamente los agentes en el espacio de trabajo. Posteriormente se programaron las funciones reunión, círculo y formación-V, que se describen a continuación.

La función de `reunión` se basa en el número de agentes y en el ID de cada uno de ellos, cada agente calcula la distancia y caminará hacia la meta dejando un cierto margen para evitar colisiones entre ellos. De acuerdo al número de formaciones que se requieran, el número total de agentes se divide entre el número de formaciones, y los agentes se distribuyen equitativamente entre éstas.

La función `reunión` debe preceder cualquier formación como puede observarse en el algoritmo correspondiente (algoritmo `reunión`), el método utilizado para coordinar los movimientos de los agentes es acoplado.

La función de `círculo` se lleva a cabo cuando los agentes se encuentran alrededor de un punto de reunión. En esta función, los 360^0 de un círculo se dividen entre el número de agentes alrededor de la marca y se multiplican los grados resultantes por el ID de los agentes para establecer la posición alrededor de la marca, cada agente va hacia la marca y se posiciona de acuerdo al radio y ángulo calculados. En este caso, los movimientos de los robots se coordinan antes de la ejecución, por lo que el método es acoplado (ver algoritmo `círculo`).

La función `formación-V` requiere también que los agentes estén reunidos alrededor del agente marca. En cuanto un agente se acerca a este último, el agente marca inicial decide aleatoriamente cuantas columnas tendrá la formación. El agente marca retrocede entonces a una de las columnas y deja al nuevo agente el "liderazgo" actual, es decir, el nuevo agente se convierte en el agente marca. Este proceso se repite sucesivamente hasta llegar el último agente. En este caso, los movimientos de los robots se deciden en tiempo de ejecución por ellos mismos, por lo que se requiere de un método de coordinación desacoplado (ver algoritmo `formación-V`).

Algoritmos generales

```
Reunión
Inicio
  Dividir el total de agentes entre el número
  de marcas.
  Comunicar la posición de cada agente.
  Localizar las metas dentro de un intervalo
  según el ID.
  Dirigirse a la meta correspondiente.
Fin
```

```
Círculo
Inicio
  Separación = 360 grados entre el número
  de agentes en una marca.
  Repetir para el número total de agentes
  {Girar separación.
  Avanzar (separación x ID)}
Fin
```

```
Formación-V

Inicio
  Turno = 0
  agente marca = agente con mayor ID
  Inicializar agente marca // función del mismo nombre
  Mientras los agentes no esten formados // acción a
  //ejecutar por cada agente
```

```

Case
  estado del agente = marca // ID agente marca
  Monitorear // función del mismo nombre
  estado del agente = turno // ID agente turno
  Formarse //función del mismo nombre
  estado del agente = formado// formado = verdadero
  Reorganizar formación //función del mismo nombre

De otra manera
  Permanecer en la misma posición

agente marca = turno
incrementar turno
Fin

Inicializar agente marca
  Inicio
  V = [] // vector de posiciones del agente marca
  Elegir el número de ramas, n, entre 1 y 3.
  Contruir vector V=[col1 ... coln+1]
  Dividir el espacio de formaciones de 180 grados
  detrás de él, entre n + 1 para obtener la orien-
  tación de las columnas.
  Elegir una posición k en uno de los elementos de V
  Fin

Monitorear
  Inicio
  Si otro agente está en un rango de 180 grados al frente.
  Transmitir el vector de posiciones actualizado
  al agente situado frente a él
  Retroceder a la posición k elegida con respecto
  a V.
  Formado = verdadero
  De otra forma
  Mantener posición
  Fin

Formarse
  Inicio
  Avanzar hacia la marca
  Recibir el vector de posiciones del agente marca
  Tomar la posición de agente marca
  Formado = verdadero
  Fin

Reorganizar formación
  Inicio
  Si otro agente está a un paso y está orientado en la
  misma dirección
  Retroceder 2 espacios
  De otra forma
  Mantener posición

```

5. Resultados Preliminares

Se ejecutaron diversos experimentos variando el número y la posición de 1 a 4 puntos de reunión.

La figura 1 muestra imágenes de diversos experimentos variando el número de agentes y de marcas en la función de reunión.

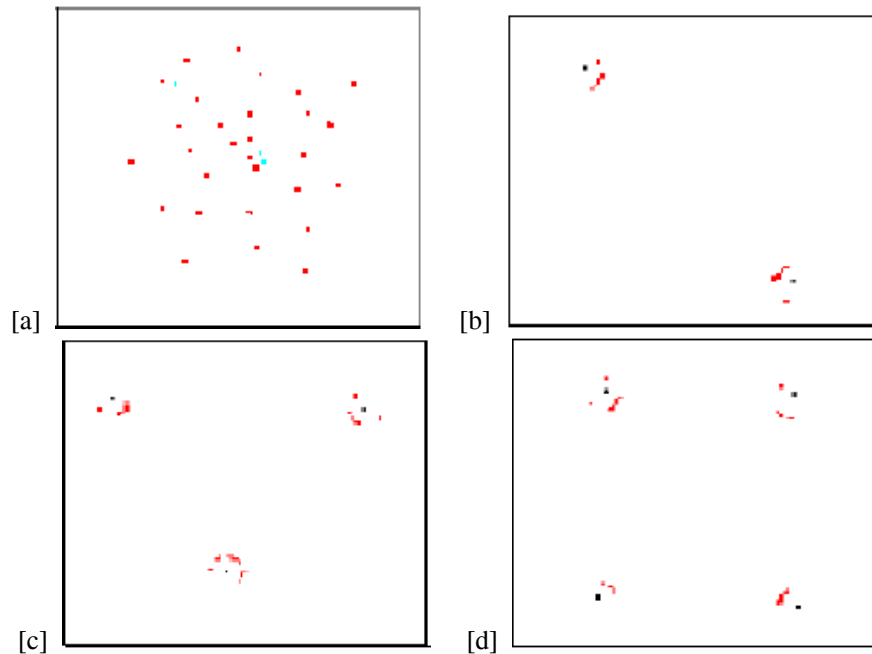


Figura 1: a) Posición inicial de un grupo de agentes, b) 2 puntos de reunión de los agentes, c) 3 puntos de reunión de los agentes, d) 4 puntos de reunión de los agentes

La función *círculo* se probó también con distintas metas y variando los valores de los radios entre 5 y 20. Resultados de simulaciones de la función *círculo* se presentan en la figura 2.

Los tiempos obtenidos para las funciones de *reunión* y *círculo* con 40, 60 y 80 agentes utilizando de 1 a 4 marcas se muestran en la figura 3.

La idea de variar el número de marcas y de agentes era estudiar el desempeño de los agentes (medido en tiempo) para generar las formaciones.

Como se puede apreciar en la figura 3a), en promedio un agente invierte 0.031 segundos para reunirse alrededor de una marca, 0.036 para reunirse alrededor de dos marcas, 0.037 alrededor de tres marcas y 0.04 alrededor de 4 marcas.

El número de marcas incrementa el tiempo invertido en promedio por los agentes para reunirse.

Para la función de *círculo*, los agentes invierten en promedio 0.03, 0.03, 0.04 y 0.04 para generar la formación alrededor de 1, 2, 3 y 4 marcas respectivamente (ver figura 3b)).

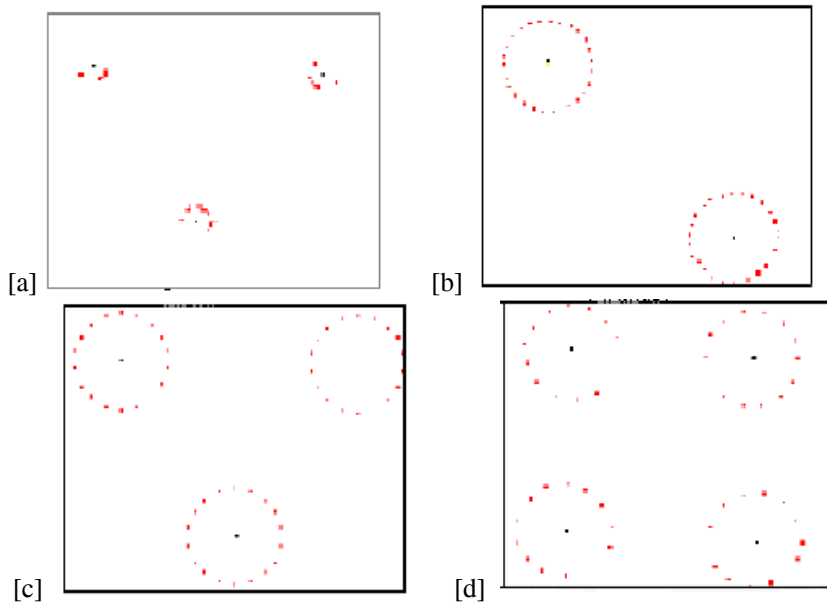


Figura 2: a) Posición inicial de un grupo de agentes reunidos, b) formación círculo en 2 marcas, c) formación círculo en 3 marcas, d) formación círculo en 4 marcas

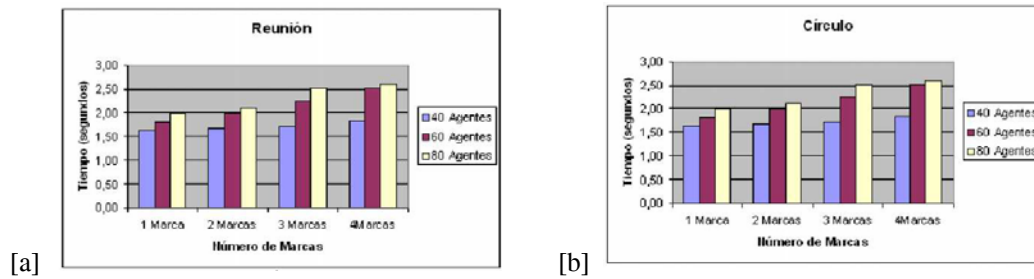


Figura 3: a) Gráfica de tiempo en segundos de reunión, b) Gráfica de tiempo en segundos de la formación círculo

La función de formación-V se probó en un punto de reunión teniendo distintos ángulos de formación y ramificaciones de 1 a 3 con variaciones entre ellas de 0 grados a 180 grados (ver figura 4).

Es importante señalar que los métodos propuestos para la generación de formaciones son esencialmente descentralizados. Los agentes disponen de información general y sentido local, para la distribución y generación de formaciones espaciales. Esto es especialmente remarcado en la formación-V.

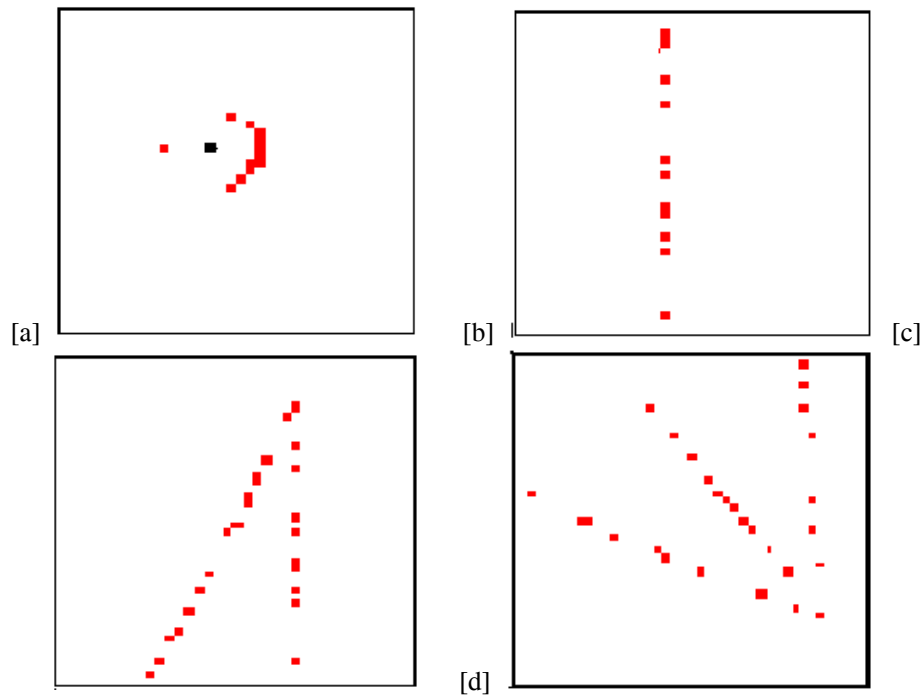


Figura 4: a) Posición inicial de un grupo de agentes reunidos alrededor de una marca, b) *Formación tipo V* en una columna, c) *Formación tipo V* en 2 columnas, d) *Formación tipo V* en 3 columnas. El número de ramificaciones y la orientación de la formación son decididos por los agentes en tiempo de ejecución

6. Conclusiones y Perspectivas

Las formaciones geométricas se inscriben dentro del área de la coordinación espacial de sistemas multi-agente o multi-robot.

El diseño y la implementación de mecanismos simples de coordinación, basados principalmente en percepción e intercambio de información local, es importante para un número de aplicaciones tales como el control de robots autónomos y para la vigilancia o exploración de terreno.

En un futuro inmediato, se experimentará con el mantenimiento de formaciones dinámicas, esto es, poder conservar la formación geométrica mientras el grupo de robots se desplaza de un punto a otro.

7. Agradecimiento

El primer autor es financiado por CONACyT bajo el número de Beca 182899.

Referencias

- [1] StarLogo 2.1 <http://education.mit.edu/starlogo>
- [2] Li T.-Y. and Latombe, J.-C. (1997). On-Line Manipulator Planning for Two Robot Arms in a Dynamic Environment, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 16 (2), pp. 144-167
- [3] Bien Z. and Lee J. (1992). A Minimum-Time Trajectory Planning Method for Two Robots, *IEEE Transaction on Robotics and Automotion*, Vol. 8 (3), pp. 414-418
- [4] Sugihara K. and Suzuki I. (1990). Distributed Motion Coordination of Multiple Robots, *IEEE International Symposium Intelligent Control*, pp. 138-143
- [5] Ünsal C. and Bay J. S. (1994). Spatial Self-Organization in Large Populations of Mobile Robots, *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Columbus, Ohio
- [6] Resnick M. (1996). StarLogo: An Environment for Decentralized Modeling and Decentralized Thinking, *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems: Common Ground*, pp.11-12