

CAPÍTULO 1

PLANIFICADOR DE OBJETIVOS SUPEDITADOS A UNA MISION PRIORITARIA

D. SANZ, A. BARRIENTOS y C. ROSSI

Grupo de Robótica y Cibernética; Centro de Automática y Robótica-UPM
dsanz@etsii.upm.es, antonio.barrientos@upm.es, claudio.rossi@upm.es

Este capítulo presenta un sistema de planificación de objetivos que se basa en una planificación previa de mayor prioridad para desarrollar una misión secundaria supeditada a la primera. Esta aproximación se aplica tanto en simulación como con una implementación real a un escenario de exploración planetaria. En él, tomando como misión principal el reconocimiento y toma de muestras, se desarrolla como misión secundaria despliegue de una red de sensores inalámbricos.

1 Introducción

Dentro del conjunto de algoritmos y sistemas de planificación de objetivos existentes en la bibliografía, pocos de ellos se aprovechan las oportunidades que ofrece una misión previamente definida esta para llevar a cabo otra misión en paralelo, supeditada a la primera. Este novedoso concepto es aplicable de manera útil a numerosas situaciones, como puede ser sistemas de extinción de incendios en los que se sitúen sensores para monitorizar los rescoldos de las llamas, aplicaciones agrarias donde a la vez que se eliminan infecciones o malas hierbas se riegan zonas secas, o sistemas de vigilancia donde los objetivos a vigilar suponen distintos niveles de amenaza o prioridad (Pukkala, 2002). Concretamente, en el trabajo que se presenta en este capítulo, se aplica este concepto a un escenario de exploración planetaria, donde frente a la misión principal de toma de muestras y movimiento del rover de exploración, aparece una tarea de despliegue de una red de sensores inalámbricos o un sistema de balizas (Pedersern, 1998) (Sun, 2005). Esta se despliega mediante un sistema de lanzamiento trans-

portado por el rover, de manera que el objetivo general es ser capaz de llevar a cabo el despliegue de los nodos minimizando el desvío respecto a la trayectoria original del rover a la par que se optimiza el consumo de energía y el tiempo de realización de la misión (Sanz, 2010).

El sistema ha sido validado en simulación e implementado posteriormente en un sistema físico real.

2 Desarrollo

Como se mencionaba anteriormente, la tarea de despliegue está supeditada a la de exploración planetaria del rover que ha sido previamente definida (Y. Tang, 2004). Además, también son conocidas –gracias a exploraciones anteriores o al análisis de imágenes de satélites– las zonas donde se quieren posicionar los nodos de la red de sensores, dentro de un rango cercano (K. Xu, 2010) (T. Clouqueur, 2003). De esta forma, los datos de partida con los que se cuenta son los que se muestran en la Fig. 1:

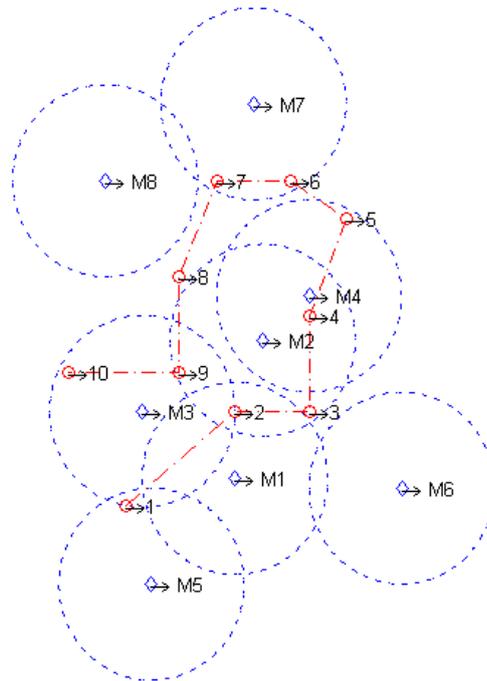


Fig. 1. Escenario de partida

Indicado en rojo se define la misión principal del vehículo, donde las líneas discontinuas suponen la trayectoria y los círculos suponen puntos de parada y/o toma de muestras (OPm), definidos secuencialmente según el número que referencia a cada uno de ellos. Adyacentemente se muestra en azul la parte referente a la misión auxiliar: Los rombos azules, señalados con el prefijo 'M' seguida de un número que indica su orden dentro de la misión secundaria, muestran la posición objetivo donde se deben desplegar los nodos sensores (OSm), mientras que la circunferencia que los circunscribe delimita la zona desde cual el sistema de lanzamiento es capaz de desplegarlos de manera precisa (Amax).

Como es obvio y observable en la figura anterior, el área de alcance no siempre está contenida dentro de la trayectoria original del rover. Por ello, es necesario contemplar la posibilidad de modificar levemente dicha planificación, buscando los puntos óptimos desde los cuales alcanzar estas localizaciones. El algoritmo que se ha utilizado es completo, por lo que el paso previo es hallar todos los posibles puntos subóptimos de despliegue que permitan posteriormente elegir entre unos u otros en función de los parámetros definidos para cada misión concreta. Las localizaciones consideradas han sido las que se ilustran en la Fig. 2:

- *Nodos alcanzables desde puntos de la trayectoria original o desde Objetivos Primarios (OPm):* Sobre la trayectoria original, se calculan los puntos que minimizan la distancia entre cada nodo de la red y cada uno de los segmentos de la trayectoria, y se verifica si estos puntos se encuentran dentro del radio de acción del lanzador (distancia < Amax). Estos puntos, en la Fig. 2 (a) se encuentran marcados en negro, y unidos al nodo OSm al cual se refieren mediante una recta negra continua.

Por otro lado, también se calcula la distancia entre cada uno de los OPm hasta cada OSm, considerando solo aquellos pares cuya distancia sea menor que Amax. Esto queda representado en el gráfico mediante una línea recta discontinua.

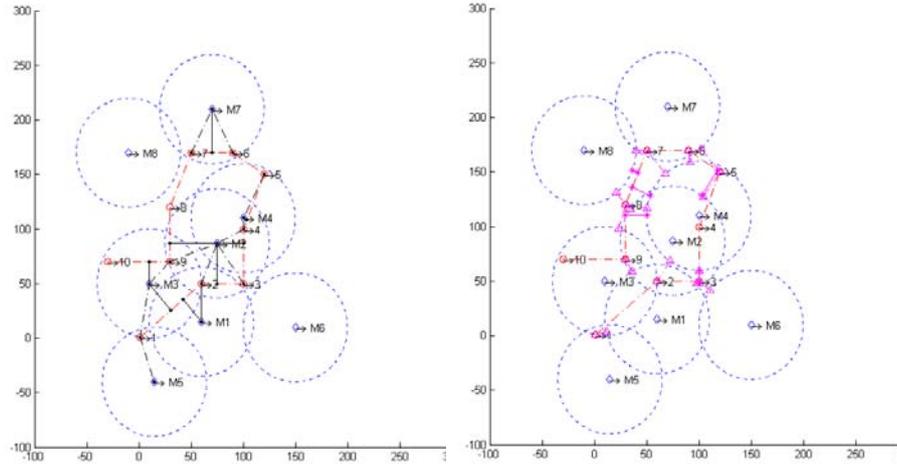
Es importante remarcar que si bien esta tarea implica resolver sistemas de ecuaciones relativamente sencillos, el contemplar cada OSm junto con cada OPm y todos sus segmentos correspondientes, la cantidad de cálculos crece exponencialmente según aumenta el número de nodos o de puntos de paso, por lo que es necesario recurrir a técnicas de optimización.

- *Nodos alcanzables tras un desvío desde la trayectoria original o desde objetivos primarios (OPm):* Cuando en los cálculos realizados en el punto anterior se observa que el OSm está fuera del rango del lanzador, se pasa a realizar una subtarea que calcula los puntos óptimos hasta donde habría que desviarse para posicionarse dentro del rango de lanzamiento, donde el criterio de optimalidad valora el desvío, la distancia de lanzamiento y la multiplicidad del lanzamiento. Las localizaciones se obtienen calculando el punto de tangencia entre la circunferencia de radio A_{max} , centrada en el nodo, y el segmento que une el punto óptimo de lanzamiento sobre la trayectoria en el caso de que el lanzador tuviera un alcance infinito, cuando se calcula el desvío desde la trayectoria, o la línea que une el OPm correspondiente con el nodo, en caso de que se calcule el acceso desde los puntos de paso con una línea continua de color rosa, mientras que en el segundo la recta es de tipo discontinuo (véase Fig. 2 (b)). En ambos casos se representa con un triángulo el punto óptimo hasta el que habría que desviarse para realizar el lanzamiento.

Para ambas opciones se calcula la distancia que habría que desviarse respecto de los puntos de paso de la trayectoria original, considerando únicamente aquellos que estén dentro del margen indicado.

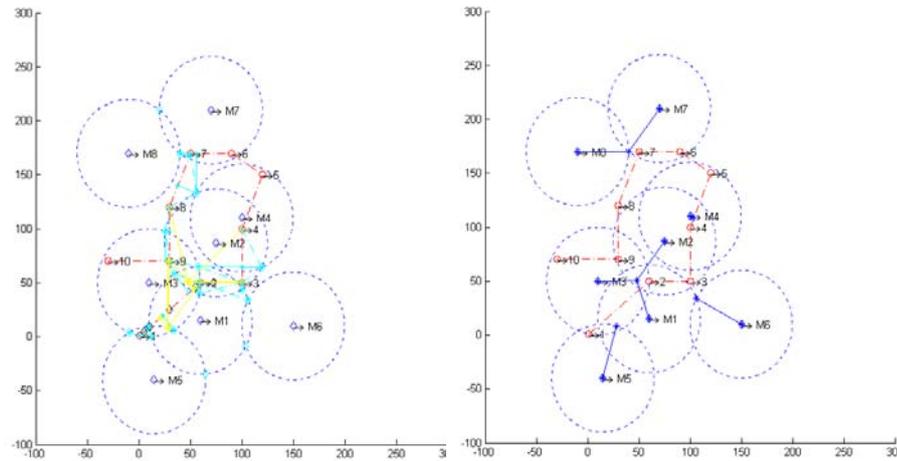
- *Puntos de alcance a varios nodos simultáneamente:* Con el objetivo de optimizar la distancia recorrida por el sistema móvil y el tiempo empleado en el despliegue, se han buscado puntos desde los cuales se puedan alcanzar varios OSm sin necesitar desplazamiento alguno, modificando simplemente la orientación del lanzador: de esta forma se evita tener que desplazarse hasta otro punto y repetir el proceso de lanzamiento.

Después de estudiar las topologías más comunes de despliegue para las WSN, se ha considerado que la probabilidad de que cuatro o más nodos se encuentren dentro del alcance A_{max} simultáneamente es muy baja, por lo que para la planificación de objetivos solo se han tenido en cuenta las intersecciones entre dos y tres nodos.



(a) Nodos alcanzables desde la trayectoria original o desde objetivos primarios (OPm)

(b) Nodos alcanzables tras un desvío desde la trayectoria original o desde objetivos primarios (OPm)



(c) Puntos de alcance a varios nodos simultáneamente

(d) Puntos óptimos para la realización de los lanzamientos

Fig. 2. Proceso de planificación

La forma de hallar estos puntos, en el primer caso, ha sido calculando los puntos de intersección —en el caso de que existan— entre las circunferencias de radio A_{max} de cada una de las posibles parejas de

nodos, lo cual define el área de solapamiento entre circunferencias, y por tanto la zona desde la que ambas motas es alcanzable. Una vez localizados estos puntos, se elige aquel más próximo a la trayectoria original (ambos puntos aparecen unidos mediante una línea continua amarilla en la Fig. 2 (c)) o al OPm correspondiente (ambos puntos aparecen unidos mediante una recta amarilla discontinua en la Fig. 2 (c)). Para ambos casos, al igual que en los epígrafes anteriores, solo se considera aquellos puntos que supongan un desplazamiento que no supere una desviación máxima.

Para el segundo caso, en el cual se intenta alcanzar tres posiciones desde el mismo emplazamiento, el proceso de obtención ha sido mediante el cálculo del baricentro para cada trío de nodos en la red. El punto obtenido se toma en consideración si se encuentra a una distancia menor que A_{max} respecto a cada uno de los nodos evaluados, y si además se encuentra a una distancia que no suponga un desplazamiento que supere una determinada desviación máxima. Esto se ilustra en la Fig. 2 (c), representando en cian, por un lado, las uniones entre los baricentros y los puntos de la trayectoria óptimos para realizar el desvío (línea cian continua), y por otro, los segmentos que unen los baricentros y los OPm desde donde es posible acceder a ellos (recta cian discontinua).

2.1 Algoritmo de planificación

A medida que se van obteniendo todos los puntos descritos en el apartado anterior, estos van siendo introducidos en una lista dinámica de estructuras, de tal forma que para cada uno de los nodos de la red se tiene la información correspondiente a los puntos desde los que se puede acceder, junto con la información de distancia, multiplicidad, desplazamiento, etc.

En la siguiente fase, estos datos se ponderan según una serie de coeficientes, de manera que para cada punto (*'punto'*), cuando este se relaciona con un nodo en concreto (*'nodo'*), se obtiene un índice de mérito para el lanzamiento desde cada punto hasta cada nodo. Este factor hace referencia a la variación del consumo energético respecto del balance de la planificación inicial, por lo que el objetivo del planificador consiste en minimizar dicho índice. Cuanto menor sea el coeficiente, que se obtiene de acuerdo con la Ecuación (1), mayor es la optimalidad y aprovechamiento de la tarea secundaria:

$$\begin{aligned} \text{Merito}(\text{punto}, \text{nodo}) &= \text{coef}_{\text{dist_traslacion}} \\ &* \text{distancia_traslacion}(\text{punto}, \text{nodo}) \\ &+ \text{coef}_{\text{dist_lanzamiento}} \\ &* \text{distancia_lanzamiento}(\text{punto}, \text{nodo}) \\ &+ \text{coef}_{\text{multiplicidad}} \\ &* \text{grado_multiplicidad}(\text{punto}, \text{nodo}) \end{aligned} \quad (1)$$

donde:

‘distancia_ traslacion’ hace referencia a la distancia que se ha debido desviar desde la trayectoria original para alcanzar el punto de lanzamiento

‘distancia_ lanzamiento’ hace referencia a la distancia a la que se va a propulsar el contenedor con los nodos.

‘grado_ multiplicidad’ hace referencia al número de OSm alcanzables desde ese punto.

‘coefxxx’ hace referencia al coeficiente individual con que se ponderan cada uno de los parámetros.

Con el objetivo final de minimizar el factor de mérito, la elección de estos coeficientes define claramente el resultado de la planificación, priorizando más unos comportamientos u otros: si el coeficiente relativo a la distancia de translación aumenta, el sistema optará por soluciones en las que se minimice el desvío respecto a la trayectoria original. Sin embargo, si disminuye, la distancia que se desvía se tendrá menos en cuenta, dando a prioridad a otras consideraciones.

Es importante destacar también que el valor natural del coeficiente de multiplicidad es negativo, de tal forma que cuando aumenta su valor absoluto, se está valorando más las soluciones en las que se aprovechen los puntos de lanzamiento para realizar varios procesos de despliegue. Si su valor absoluto disminuye, también decrece su relevancia frente a otros factores a considerar.

Con todo ello, se ha desarrollado un algoritmo de búsqueda iterativa, que busque el punto óptimo de despliegue no ya para cada nodo, si no para el conjunto del sistema de despliegue. Esta búsqueda exhaustiva garantiza no caer en soluciones locales, si no hallar el óptimo global, en función de los coeficientes definidos.

3 Validación y Test

El algoritmo de planificación ha sido examinado de manera exhaustiva a través de varios conjuntos de pruebas, de tal forma que se han validado sus características tanto de manera conjunta como individual. De esta forma, se pueden diferenciar los test según el comportamiento a validar.

El primer conjunto de test hace referencia a la topología de distribución, tratando de verificar el comportamiento del algoritmo frente a distintas localizaciones espaciales, tanto de los puntos de despliegue como de los OPm del rover. De esta forma, se ha intentado simular varios tipos de escenarios, tanto donde haya gran concentración de nodos como aquellos en los que estén más distribuidos. También se han simulado distintos patrones de trayectorias para el rover, desde lineales, a otras más cerradas o más abiertas. Para todas ellas, se ha observado la distancia total recorrida por la trayectoria propuesta frente a la trayectoria inicial, como índice de la calidad de la solución, siendo la media de la desviación menor del 10%. Otra medida de calidad en cuando a la completitud del algoritmo, deriva del hecho de que si se permite cualquier rango de desviación, ningún nodo ha quedado aislado.

Por otro lado, se han realizado pruebas variando los coeficientes del factor de mérito, de tal forma que el peso de cada una de las características se viera acentuado en las distintas pruebas. De esta forma se ha observado que aun con coeficientes de multiplicidad de valor bajo y signo negativo, el sistema reconoce los puntos de lanzamiento múltiple como emplazamientos apropiados para realizar los lanzamientos, ya que la distancia entre lanzamientos consecutivos se reduce a cero. Así mismo, se observa que, como corresponde, las penalizaciones al desvío respecto a la trayectoria original y a las grandes distancias de lanzamiento (donde se pierde precisión y se aumenta el consumo energético) son opuestas, dando lugar la primera a trayectorias más cercanas a la original, mientras que el segundo factor, siempre limitado por el máximo desvío posible, obtiene puntos de lanzamiento más cercanos a los puntos de despliegue, obteniendo así una ruta con mayor índice de desviación.

Finalmente, las restricciones en cuanto a alcance del lanzador y margen de desviación del vehículo son los factores más limitantes del sistema, ya que no afectan únicamente al comportamiento del mismo si no a la capacidad de cumplir en su totalidad con los objetivos secundarios. Como se ve en la Fig. 3, ante la misma distribución espacial, en el caso de una mayor limitación en el desvío (a) quedan varios nodos sin posibilidad de ser alcanzados. La flexibilidad o rigidez que se imponga para estos parámetros define claramente al sistema.

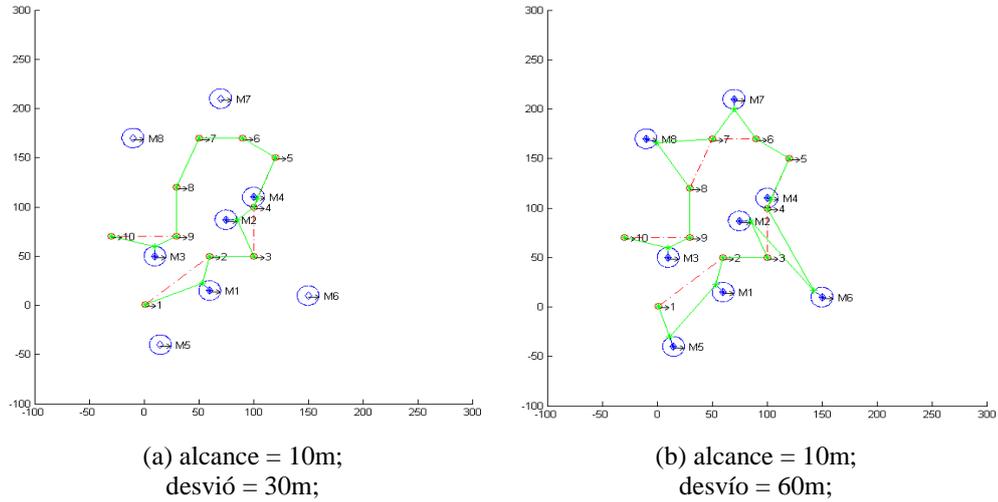


Fig. 3. Según el desvío máximo permitido y el alcance del lanzador

3.1 Implementación real

Tras verificar en simulación el funcionamiento del algoritmo, se ha validado este sobre una plataforma real: Sobre un vehículo móvil Pioneer 3-AT se ha instalado un sistema de lanzamiento específicamente diseñado para este hecho, y se ha ejecutado el test de la Fig. 4, con el planificador trabajando embarcado el servidor del vehículo. Tras definir off-line los puntos de paso y las zonas de despliegue, el algoritmo de planificación halla los puntos óptimos y los transmite hacia el sistema de navegación de vehículo, de tal forma que este, haciendo uso de posicionamiento GPS y odometría se desplace hacia los puntos OPm. Cada vez que se alcanza uno de estas localizaciones, el planificador suministra al sistema de lanzamiento los parámetros del disparo: orientación (como un ángulo relativo a la orientación del robot) y el alcance de posicionamiento. El sistema se configura con estos datos y realiza el lanzamiento. Una vez concluida la tarea, el gestor de despliegue comunica el evento al planificador que proporciona los datos de posición del siguiente objetivo o, en el caso de ser un punto de alcance múltiple, suministra los datos para el siguiente disparo.



Fig. 4. Escenario real para las pruebas de campo

4 Conclusiones

Se ha diseñado un sistema de planificación de objetivos secundarios supereditado a los requisitos establecidos por una misión prioritaria, centrado en el despliegue de una red de sensores desde un rover de exploración planetaria que realiza sus propias tareas. Este sistema es capaz de obtener una solución completa y óptima en función de las limitaciones impuestas al sistema y de la ponderación de los factores de desviación, alcance y multiplicidad.

Para todos los test realizados, siempre que las restricciones impuestas lo han permitido, se ha obtenido una solución completa para la misión secundaria, con una desviación media inferior al 10% con una precisión en el posicionamiento de 30 cm en rangos de 30 m, lo que se supone un error global del 1% en la tarea de despliegue de los sensores.

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de los proyectos ROBOCITY 2030 (S-0505/DPI/ 000235) del Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica (PRICIT) de la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) y el proyecto RF-WIPE - ESA/IPC(2008)11 (item no. 08.1ED.14) de la Agencia Espacial Europea.

Referencias

Chang, C., Sheu, J., Chen, Y. 2009. An Obstacle-Free and Power-Efficient Deployment Algorithm for Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.

Clouqueur, T., Phipatanasuphorn, V., Ramanathan, P., Saluja, K. K. 2003. Sensor deployment strategy for detection of targets traversing a region. Mobile Networks and Applications, vol. 8.

Pedersern, L. 1998 . Robotic Deployment of Electro-Magnetic Sensors for Meteorite Search. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Belgium: s.n.

Pukkala, T. 2002. Multi-objective Forest Planning. Holanda: Kluwer Academic Publishers.

Sanz, D., Garzon, M., Barrientos, A. *et al.* 2010. Robotic Deployment System For Space Exploration. iSAIRAS. Sapiro: s.n.

Sun, T., Chen, L., Ham, C. 2005. Reliable Sensor Networks for Planet Exploration. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, EEUU: s.n.

Tang, Y., Birch, B., Parker, L. E. 2004. Planning Mobile Sensor Net Deployment for Navigationally Challenged Sensor Nodes. International Conference on Robotics and Automation.

Xu, K., Hassanein, H. 2010. Relay Node Deployment Strategies in Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*.