

GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS Y TOMA DE DECISIONES PARA UAVs

Gonzalo Pajares*, **José Jaime Ruz****, **Pablo Lanillos****, **María Guijarro*****, **Jesús Manuel de la Cruz****, **Matilde Santos****

**Dpto. Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial
pajares@fdi.ucm.es*

*Facultad de Informática, Universidad Complutense,
28040 Madrid, España*

***Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática
{jjruz,lanillos,jmcruz, msantos}@dacya.ucm.es*

Facultad de Informática, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España

****Centro de Estudios Superiores Felipe II. Ingeniería Técnica de Sistemas
mgujarro@cesfelipesesegundo.com
28300 Aranjuez, Madrid, España*

Resumen: La generación de trayectorias y la replanificación de las mismas en entornos hostiles para UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) es una disciplina en auge. Los entornos hostiles se caracterizan por la presencia de amenazas, modeladas aquí como radares. Inicialmente se planifica una ruta. Si en vuelo surgen nuevas amenazas, la ruta inicial se replanifica. En ambos casos las rutas se obtienen mediante el algoritmo A*. Ante una replanificación el UAV toma una decisión sobre si continuar por la ruta inicial o por la replanificada. La teoría de la decisión multiatributo proporciona en este caso el mecanismo adecuado. *Copyright © 2008 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Unmanned Aerial Vehicles, plan de vuelo, replanificación, toma de decisiones, teoría de la utilidad, amenazas, riesgo.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más interesantes para la utilización de UAVs (“Unmanned Aerial Vehicles”) resulta ser precisamente la generación de trayectorias en entornos hostiles. En cualquier tipo de entorno existen obstáculos físicos tales como montañas y edificios o lógicos como pueden ser zonas de vuelo prohibido, en este último caso bien por la supuesta presencia de adversarios o bien por prohibiciones expresas de vuelo. Por simplificar, en este trabajo se utilizan solamente elevaciones del terreno, ya que el tratamiento de cualquier obstáculo desde el punto de vista de la generación de la trayectoria se realizaría de la misma manera. Los entornos hostiles se caracterizan por la existencia de amenazas, modeladas aquí como radares de detección situados

en una localización espacial con una cierta área de influencia. La diferencia entre obstáculos y amenazas estriba en que los primeros se traducen en localizaciones inaccesibles por parte del UAV mientras que los segundos determinan zonas de riesgo, de suerte que el UAV puede o no accederlas en función del riesgo que esté dispuesto a asumir. Por otro lado, los entornos pueden ser estáticos y dinámicos. Los estáticos se caracterizan porque los elementos que intervienen (obstáculos y amenazas) son conocidos en el momento de la generación de la trayectoria no habiendo modificaciones durante el vuelo. En este caso, se establece de antemano un plan de vuelo a seguir, que permanece invariable a lo largo de su ejecución. Por contra, los dinámicos tienen la peculiaridad de que durante la ejecución del plan de vuelo inicialmente establecido, pueden aparecer

elementos nuevos en el entorno no contemplados previamente, que obliguen a la replanificación del plan de vuelo inicial (Hussain y col. 2004). La replanificación constituye uno de los retos más importantes de los UAVs en entornos hostiles. En el presente trabajo el dinamismo se restringe a la aparición de amenazas emergentes, conocidas como “pop-ups” en la literatura especializada. En este caso, en el momento en que se tiene conocimiento de la amenaza imprevista se elabora una ruta alternativa que modifica el plan de vuelo. Seguidamente, se ha de tomar una decisión sobre si continuar con la ejecución del plan de vuelo previsto o modificar la ruta con la alternativa obtenida. La decisión se basa en la aplicación de determinados criterios en el momento de la aparición bajo el marco de la denominada teoría de la utilidad multiatributo.

En el problema de la generación de trayectorias en entornos adversos para UAVs, el propósito consiste en completar una misión dada para llegar al objetivo en un tiempo prefijado a la vez que se maximiza su seguridad (LaValle, 2006; Jun and D’Andrea, 2002). Estos son los requisitos adoptados en este trabajo, donde el objetivo lo constituye un radar hostil mientras que la seguridad viene determinada en función del riesgo de detección del UAV por parte del resto de amenazas (radares). Muchos métodos de planificación de trayectorias se fundamentan en técnicas generales que también son ampliamente utilizadas para robots autónomos móviles (Hu, 2004) o vehículos terrestres no tripulados (Hussain y col., 2004). Entre otros destacan: técnicas de búsqueda exhaustivas entre las cuales la más utilizada es el algoritmo A-estrella (A*) (Russell and Norvig, 2004), campos de potencial que asumen la presencia de masas virtuales en un campo de fuerzas también virtuales (Passino, 2005), descomposición celular mediante programación dinámica (Latombe, 1991), optimización que minimiza el riesgo de detección a lo largo de una trayectoria, dicho riesgo se modela como una distribución de probabilidad en determinadas localizaciones (Zabaranin *et al.*, 2001; Hespanha *et al.*, 2001), construcción de árboles de exploración que cubren el espacio libre de colisiones donde se ha de desplazar un objeto móvil (López *et al.*, 2006) o Programación Lineal Entera Mixta (MILP), también dentro de la optimización, mediante la aplicación de restricciones que tienen en cuenta la existencia de obstáculos y el riesgo proporcionado por la presencia de radares (Ruz *et al.* 2006, 2007).

Muchos de los métodos anteriores se centran en la obtención de caminos que evitan los obstáculos y reaccionan ante las amenazas en aras de la supervivencia y éxito de la misión. En este trabajo, tanto para la obtención del plan de vuelo como para la replanificación se utiliza el algoritmo A*, propuesto originalmente por Nilsson (2000) y estudiado ampliamente en la literatura (Russell y Norvig, 2004; Pajares y Santos, 2005). Las dos razones que justifican su elección se exponen a continuación:

1) Es óptimo bajo una heurística que cumple la propiedad de admisibilidad (Russell y Norvig, 2004);

la distancia euclídea, que es la utilizada en este trabajo, cumple dicha propiedad.

2) El espacio de búsqueda es de naturaleza discreta, caracterizado por una serie de celdas o nodos; el algoritmo A* elige nodos como posibles para la trayectoria que está buscando según un criterio de mínima distancia (mejor heurística); cuando se trata de un nodo ocupado por un obstáculo este nodo sencillamente se tornará prohibido para el algoritmo; un nodo bajo la influencia de un radar implicará un cierto riesgo para el UAV, si este riesgo se considera elevado el nodo se hace prohibido para el algoritmo y accesible en caso contrario.

La obtención de trayectorias óptimas, representa en sí misma una gran ventaja. El tratamiento de los obstáculos y amenazas según lo expuesto en el segundo punto supone también una importante ventaja frente a estrategias del tipo MILP por ejemplo que requiere la linealización de las restricciones aplicables.

El trabajo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se caracterizan los elementos que van a intervenir en el entorno. En la sección 3 se define la estrategia de obtención del plan de vuelo en entornos estáticos y la replanificación y toma de decisiones para entornos dinámicos. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos con la estrategia propuesta. Finalmente, en la sección 5 se obtienen las conclusiones pertinentes.

2. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO

Como se ha mencionado anteriormente, el entorno se caracteriza por poseer dos elementos básicos: terreno y amenazas (radares).

En la figura 1 se muestran, en una representación 2D (bidimensional), los componentes básicos que definen el entorno ocupando un espacio de 170x360 celdas, con origen de coordenadas en la esquina superior izquierda.

Sobre el fondo se identifica el mapa digital del terreno representando las alturas relativas del mismo respecto al elipsoide geográfico WGS84. Las partes claras del fondo se identifican con los valores de altura máxima (zona montañosa), mientras que las partes oscuras representan depresiones o valles. Se identifican cinco radares, con su alcance representado en forma de curvas de nivel, uno de ellos hace de objetivo y dos de ellos poseen sus radios de acción solapados. Aparecen dos puntos de control de paso o “way-points” (identificados respectivamente como WP 1 y WP 2) por los que está obligado a pasar el UAV durante su vuelo en busca del objetivo y además en el orden establecido por el dígito partiendo del punto de inicio especificado.

Los radares se sitúan en este caso sobre las laderas de las montañas.

Una posible misión puede asociarse con el hecho de intentar identificar el objetivo y a la vez realizar tareas de vigilancia sobre una zona de radares supuestamente hostil obligándole a transitar por una región altamente peligrosa con una elevada concentración de radares.

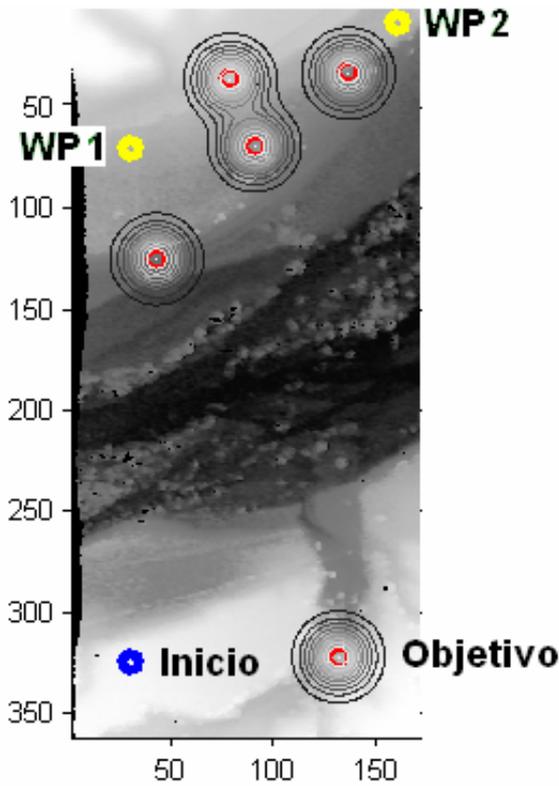


Figura 1. Entorno estático inicial, sobre un terreno digital. Cinco radares estáticos, uno es el objetivo y otros dos poseen zonas de influencia solapadas. Un punto de inicio y dos puntos de control de paso.

2.1 Modelado del terreno.

Uno de los elementos básicos constitutivos del entorno es el terreno. En este caso, se trata de un modelo digital del terreno de forma que las coordenadas de cada localización espacial vienen dadas en unidades de longitud. Para analizar de forma simplificada los resultados experimentales se supone que cada unidad de longitud en la figura representa 500 m en la realidad y por consiguiente el mapa cubre una superficie de 15300 Km² sobre un largo de 180 Km y un ancho de 85 Km. Las alturas representadas son relativas al elipsoide mencionado anteriormente variando entre 360 y 1221 metros. La distribución de alturas interviene en la generación de las trayectorias (plan de vuelo y replanificación). Esto es así porque inicialmente se especifica la altura H prevista de vuelo de forma que aquellas localizaciones espaciales con valores de altura h mayor que H se consideran obstáculos a evitar.

2.2 Modelado de las amenazas.

Las amenazas en este trabajo se identifican con zonas de radares hostiles. Cada radar posee un alcance predeterminado en función de sus características. En los experimentos realizados se fija el radio de alcance del radar en 20.5 kilómetros con respecto al mapa del entorno definido en la figura 1. Esto significa que a partir de la posición del radar, cualquier UAV que sobrevuele la zona de influencia del radar definida por dicho alcance será detectado por éste y por tanto

el propio UAV asume un cierto riesgo de cara a su supervivencia. Es bien sabido que el grado de detección depende de la denominada Radar Cross Section (RCS). En Kabamba *et al.* (2006) y Zabarankin *et al.* (2006) puede encontrarse un exhaustivo estudio sobre el RCS y su influencia en la función de detección teniendo en cuenta los ángulos de elevación, azimut y la velocidad. En una aproximación un tanto simplista el RCS viene a ser la superficie visible que el UAV ofrece al radar, normalizada en el rango $[0,1]$.

El modelado de las amenazas no constituye el objetivo principal de esta investigación, por este motivo se utiliza una aproximación simple de la probabilidad de detección de un UAV por el radar i , que se especifica como sigue a través de la función de densidad de probabilidad Gaussiana, que ha sido utilizada en otros trabajos de investigación con el mismo propósito (Dogan, 2003),

$$p^i(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i\|^2}{\sigma^2}\right) RCS \quad (1)$$

donde $\|\cdot\|$ es la norma euclídea; \mathbf{x} representa las coordenadas de la celda en unidades de longitud donde se sitúa el UAV, \mathbf{r}_i determina la posición del radar. Ambas posiciones \mathbf{x} y \mathbf{r}_i vienen especificadas respecto del origen de coordenadas; σ es un parámetro que determina el ancho de la función Gaussiana, con valor de 15 en este trabajo. Para simplificar, el valor del RCS ha sido fijado a 1. En la figura 1 se muestran las representaciones de las diferentes distribuciones de probabilidad de los radares en forma de curvas de nivel.

Confluencia de amenazas; la ecuación (1) determina la probabilidad de detección del UAV en la posición \mathbf{x} por el radar i , éste localizado en la posición \mathbf{r}_i . En este caso, la posición \mathbf{x} sólo está afectada por el único radar i . No obstante, puede ocurrir que dicha posición \mathbf{x} reciba la influencia de más de un radar, supongamos N . Este es el caso de los dos radares cuyas zonas de influencia aparecen solapadas en la figura 1, donde $N = 2$. La probabilidad de detección en la posición \mathbf{x} aumenta como consecuencia de la presencia de varias amenazas.

Lo anterior tiene su justificación lógica. En efecto, podría ocurrir que uno de los N radares estuviera fallando momentáneamente en el instante en el que se trata de llevar a cabo la detección sin conseguir que esta sea correcta, sin embargo es probable que alguno de los restantes lo consiguiera. Esta forma de modelado se corresponde con la idea de cooperación y colaboración entre radares. Siguiendo con el modelo de detección en el caso de los N radares, se supone que la probabilidad de ser detectado es complementaria a la de supervivencia, así pues, la probabilidad de supervivencia al radar i en la posición \mathbf{x} vendría dada por,

$$p_s^i(\mathbf{x}) = 1 - p^i(\mathbf{x}) \quad (2)$$

La probabilidad de supervivencia en \mathbf{x} ante la presencia de varias amenazas resulta (Eames, 2005),

$$p_s(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^N p_s^i(\mathbf{x}) \quad (3)$$

Finalmente, la probabilidad de que el UAV sea detectado en \mathbf{x} por la confluencia de los N radares resulta ser

$$p_d(\mathbf{x}) = 1 - p_s(\mathbf{x}) \quad (4)$$

El siguiente ejemplo pedagógico puede aclarar este concepto. Supóngase que en la posición \mathbf{x} confluyen dos radares de forma que las probabilidades de detección de cada radar frente a un UAV son respectivamente 0.4 y 0.7. Las correspondientes probabilidades de supervivencia, según la ecuación (2) serán 0.6 y 0.3. La supervivencia conjunta resulta ser 0.18 según la ecuación (3); por tanto, la probabilidad de detección será 0.82 según se deduce de la ecuación (4). Como puede observarse, este valor es superior a los dos valores de probabilidad de detección considerados por separado.

3. PLAN DE VUELO Y REPLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS

Como se ha mencionado en la introducción el plan de vuelo se establece inicialmente cuando los elementos constitutivos del entorno son conocidos. Si durante la ejecución de dicho plan surgen inesperadamente amenazas de tipo “pop-up” el plan de vuelo necesita una revisión con el fin de determinar si continuar con él o realizar una replanificación del mismo. Esto se hace en base a una decisión que se toma según dos criterios: tiempo y riesgo. Los métodos para obtener el plan de vuelo y su replanificación se abordan seguidamente.

En ambos casos, la trayectoria se determina por aplicación del algoritmo A*, que evalúa cada nodo n candidato a formar parte del camino combinando el coste para alcanzar el nodo n , $g(n)$, y el coste de ir desde el nodo n hasta el siguiente punto de paso o al nodo objetivo, en este segundo caso si se está en el último tramo; este coste se denomina función heurística, $h(n)$. La combinación de ambos costes resulta ser: $f(n) = g(n) + h(n)$.

El algoritmo elige dentro de los posibles nodos el de menor $f(n)$. Se excluyen de la búsqueda los nodos ocupados por cualquier tipo de obstáculos y aquellos otros que implican un alto riesgo para el UAV por estar bajo la influencia de un radar. Las funciones $g(n)$ y $h(n)$ son distancias euclídeas en el espacio 2D cumpliendo por tanto la propiedad de admisibilidad tal y como se ha mencionado durante la introducción. Como puede deducirse de lo expuesto hasta este momento, no se han aplicado las restricciones de naturaleza cinemática o dinámica tal y como se describe en Ruz *et al.* (2007) con el explícito propósito de evitar cambios de velocidad y rumbo bruscos en cualquier punto de la trayectoria buscada.

Este hecho hace que las trayectorias obtenidas presenten algún punto de esta naturaleza, que debe considerarse en fase de simulación aplicando restricciones dinámicas del UAV y que en este trabajo quedan fuera del objetivo de los experimentos que se han realizado.

3.1 Plan de vuelo inicial

En esta sección se aborda el problema de establecer un plan de vuelo suponiendo que el entorno es conocido a priori y por tanto las características y ubicación de los elementos que lo componen. Se elige como estrategia base el algoritmo A* según se menciona en la introducción y por las razones allí expuestas.

En el esquema de la figura 2 se sintetiza el proceso a seguir.

- 1) Definir el entorno y los elementos que lo caracterizan: terreno, localización de radares, objetivo, inicio, “way-points”. Ver Figura 1 con los detalles mencionados.
- 2) Establecer los “sub-paths”, que están constituidos por cada dos “way-points”, así como entre el inicio y el primer “way-point” y entre el último “way-point” y el objetivo
- 3) Fijar una altura de vuelo H y comprobar que la orografía del terreno no supone un obstáculo, es decir el algoritmo A* encuentra un camino para cada “sub-path”. En caso contrario, incrementar H hasta encontrar un camino, al menos para el “sub-path” donde no existía camino alguno.
- 4) Fijar un umbral de probabilidad P , que determinará el riesgo en función del valor de la probabilidad de detección que se está dispuesto a asumir en el plan. Esto significa que el UAV puede acceder a localizaciones espaciales con valores de probabilidad por debajo de P . Aplicar el algoritmo A* para cada “sub-path” con los valores de H y P .
- 5) Computar el riesgo total de detección que el UAV está dispuesto a asumir a lo largo de la trayectoria total. Este riesgo se calcula a lo largo de todos los puntos de la trayectoria obtenida donde existe un valor de probabilidad de detección distinto de cero. El riesgo total se obtiene a través de la ecuación (5) derivada del trabajo de Jun y D’Andrea (2002),

$$Riesgo_{total} = \sum_{i=1}^K -\log(1 - p_d(\mathbf{x}_i)) \quad (5)$$

\mathbf{x}_i representa cada localización donde existe algún valor de probabilidad de detección distinto de cero. En el caso de localizaciones afectadas por un único radar la probabilidad se obtiene por medio de la ecuación (1), donde haya confluencia de radares la probabilidad viene dada por la ecuación (4). A partir de la ecuación (5), cuando la probabilidad de detección es nula no existe aumento de riesgo, no obstante si dicha probabilidad es máxima, la contribución al riesgo

tiende a infinito, en cuyo caso esa localización espacial estaría prohibida.

- 6) Si $Riesgo_{total}$ supera un umbral R prefijado disminuir el umbral de probabilidad P para que el *UAV* asuma un riesgo menor.

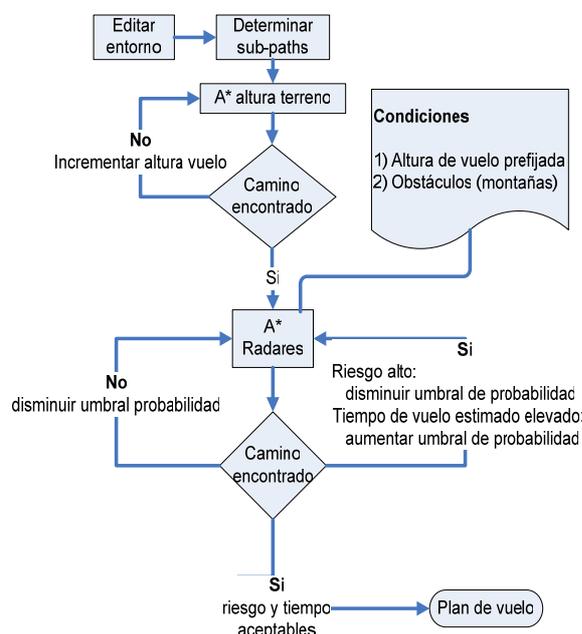


Figura 2. Estrategia para elaborar el plan de vuelo.

- 7) Si la longitud de la trayectoria total obtenida supera un valor L , de forma que el *UAV* no pueda alcanzar el objetivo en el tiempo establecido y para una velocidad dada, entonces obtener un camino de menor longitud permitiendo que el *UAV* atravesara zonas de influencia de radares, lo que se consigue aumentando P . Como consecuencia de esta acción, se incrementará el valor de $Riesgo_{total}$. Esto implica que es necesario llegar a un compromiso entre esta opción y la anterior. El criterio utilizado en este trabajo consiste en determinar que el riesgo prevalece sobre el tiempo, es decir el tiempo tiene menor relevancia que las amenazas. Se trata, pues de que el *UAV* evite las zonas de radares aún a costa de incrementar el tiempo de vuelo.
- 8) Si finalmente se encuentra un camino entre las posiciones inicial y objetivo para un riesgo y tiempo aceptables según las características de la misión, entonces devolver el plan de vuelo obtenido, que será la trayectoria deseada. En este plan de vuelo se incluye el tiempo T mínimo estimado para recorrer el camino y como consecuencia la velocidad media a la que se puede recorrer dicho camino.

Como curiosidad, si el *UAV* atravesara una zona de influencia de un único radar (figura 1) a lo largo de uno de sus diámetros el riesgo que asume por aplicación de la ecuación (5) resulta ser de 63.34. Para este cálculo, se considera que la probabilidad de supervivencia en el punto donde se encuentra localizado el radar es de 10^{-5} , o equivalentemente que

la probabilidad de detección en dicho punto es de 0.99999.

3.2 Replanificación: elección de alternativas

Ante la aparición de amenazas emergentes como consecuencia del “encendido” de un radar que inicialmente estaba “apagado”, se hace necesaria una replanificación del plan de vuelo inicial. Como consecuencia de ello se elabora un plan alternativo. En este momento el *UAV* debe tomar una decisión en el sentido de optar por seguir con la ejecución del plan de vuelo previsto u optar por el plan alternativo. A continuación se esboza el problema, para seguidamente elaborar una estrategia basada en la toma de decisiones.

Planteamiento del problema; tomando como referencia la figura 3, supóngase que el *UAV* se encuentra siguiendo la trayectoria original marcada por el plan de vuelo. En un instante determinado conoce, bien a través de sus propios sensores o por la información recibida a través de su centro de control, la ocurrencia de un evento, que se traduce en la aparición de una zona de influencia de radio r procedente de un radar hostil afectando a su trayectoria original. El *UAV* tras evaluar esta nueva situación tiene que tomar una decisión. La decisión consiste en seguir la trayectoria original arriesgándose a ser detectado con un valor de riesgo alto o modificar la trayectoria desde el punto donde haya tomado la decisión hasta el siguiente “way-point”, siempre y cuando éste no esté bajo la influencia del radar hostil. Si esto ocurriera sería el siguiente “way-point” libre de amenazas el punto a considerar. Este tipo de situaciones se encuadran dentro de los denominados entornos dinámicos. Este tipo de entornos han sido tratados en la literatura desde el punto de vista de evitar los obstáculos con el menor riesgo posible (Fraichard, 1999; Tews *et al.*, 2004). El segundo trata el problema desde el punto de vista de los UGVs (“Unmanned Ground Vehicles”), siendo sus planteamientos aplicables a este problema.

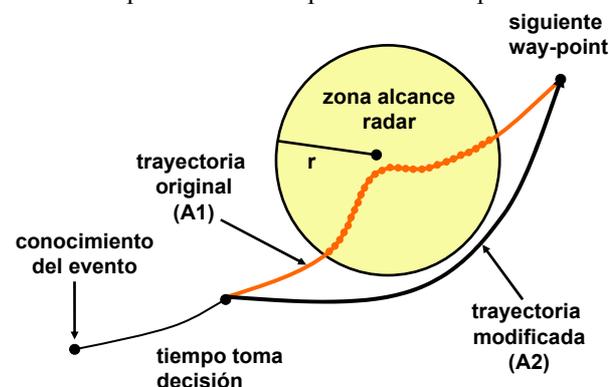


Figura 3. Toma de decisión ante una amenaza emergente (“pop-up”).

En Zengin y Dogan (2004) se construye un mapa de probabilidad para determinar la probabilidad de supervivencia del *UAV*. Este mapa cambia con el

tiempo, siendo los caminos generados funciones del tiempo. El problema se plantea no sólo desde el punto de vista de que el UAV tiene que seguir un camino sino, cómo tiene que ajustar la velocidad en el camino mientras se satisfacen las restricciones de velocidad impuestas previamente. El planteamiento llevado a cabo en este trabajo difiere de los mencionados anteriormente en cuanto que se toma una u otra opción mediante una estrategia basada en la teoría de la toma de decisiones.

Toma de decisiones; siguiendo con el problema expuesto en la figura 3, se trata de elegir una de las dos alternativas: A1 o A2. Para A1 se conoce el camino, ya que se obtuvo durante la elaboración del plan de vuelo y como consecuencia de ello también se conoce el riesgo R_1 al que estaría sometido el UAV si siguiera dicha trayectoria. Sin embargo, el camino de A2, en el momento de aparición del evento, resulta desconocido. Por tanto, antes de tomar una decisión es necesario conocer el camino de la alternativa A2. Para establecer una nueva trayectoria volvemos a aplicar el algoritmo A*. Como ya se ha mencionado anteriormente, este algoritmo requiere un punto de comienzo y un punto objetivo, además del conocimiento de la nueva amenaza y el resto de elementos conocidos previamente durante la obtención del plan de vuelo (elevaciones del terreno y amenazas previas). El punto de comienzo se establece en función de la velocidad v del UAV que lleva en el momento del conocimiento del evento. Es decir, sabiendo que la toma de decisión consume un tiempo t_d el punto de comienzo viene determinado por la relación dinámica espacio, velocidad, tiempo. El punto objetivo es en este caso el siguiente “way-point” o si éste está afectado por la amenaza del radar sería el inmediatamente posterior y así sucesivamente. La probabilidad de detección de la nueva amenaza viene caracterizada, como en el resto de amenazas, por la ecuación (1). De esta forma, conociendo la nueva configuración del entorno, el algoritmo A* devuelve el camino para la segunda alternativa A2.

Conocidos ambos caminos es necesario tomar ahora la decisión. Para ello resulta obligado establecer los criterios con los que se va a tomar la misma. En este trabajo se utilizan dos: tiempo requerido y riesgo de detección para el recorrido de los caminos A1 y A2.

El proceso se sintetiza como sigue:

1) Consideraciones sobre el tiempo: se asume que el tiempo previsto para conseguir el objetivo y por tanto para recorrer el camino especificado por el plan de vuelo es T con una posible desviación ΔT . Esto significa que la elección de la alternativa A1 no supondría ningún coste adicional de tiempo con respecto al plan de vuelo previsto. Por el contrario, la alternativa A2 sí representa un consumo adicional de tiempo con respecto al tiempo empleado si se optara por A1, estos consumos de tiempo adicionales generados por la alternativa A2 se acumulan en la variable d_t (inicialmente puesta a cero) como sigue,

$$d_t = d_t + (t_{A2} - t_{A1})_i \quad (6)$$

donde t_{A1} y t_{A2} son los tiempos estimados para recorrer las trayectorias de las alternativas A1 y A2 respectivamente ante la presencia de la amenaza i . Con ello se obtiene el denominado coeficiente de tiempo C_t , que viene expresado a través de la ecuación (7).

$$C_t = \begin{cases} \frac{(T + \Delta T)d_t}{(T + d_t)\Delta T} & \text{si } d_t \leq \Delta T \\ 1 & \text{si } d_t > \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

esta relación expresa un criterio de coste, escalado en el rango $[0,1]$, para la toma de decisiones. Esto significa que cuando el tiempo acumulado d_t , si se opta por una o más alternativas del tipo A2, es mayor o igual que el margen de tiempo ΔT el coste es máximo, es decir, se estaría ante la condición más desfavorable para este criterio; por el contrario, cuando no hay desviaciones de tiempo ($d_t = 0$) el criterio toma el mínimo valor, que representa la condición más favorable para dicho criterio.

2) Consideraciones sobre el riesgo: se parte del hecho de que el riesgo máximo asumido como aceptable para el plan de vuelo es R , es decir se trata del umbral máximo de riesgo aceptable. Si se eligiera la alternativa A2 no existiría aumento de riesgo con respecto a R mientras que si se eligiera la A1 se produciría un aumento del riesgo d_r que se computa aplicando la ecuación (5) para las diferentes localizaciones de la trayectoria A1 influenciadas por la amenaza emergente. Inicialmente ($d_r = 0$) de suerte que según se vayan tomando alternativas A1 el riesgo se va acumulando en la variable d_r como se expresa a continuación,

$$d_r = d_r + R_{A1}^i \quad (8)$$

donde R_{A1}^i representa el riesgo que supone atravesar la amenaza i . Con esto, ante la presencia de una nueva amenaza se calcula el coeficiente de riesgo C_r para dicha amenaza en función del riesgo total que se puede asumir, el riesgo real (R_r) y d_r como sigue,

$$C_r = \begin{cases} \frac{R_r + d_r}{R} & \text{si } R_r + d_r < R \\ 1 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (9)$$

este coeficiente expresa, como en el caso anterior, un criterio de coste escalado en el rango $[0,1]$ de modo que el máximo valor 1 expresa un elevado coeficiente de riesgo en función del riesgo considerado aceptable para la misión y por tanto una elección desfavorable. Por el contrario, si d_r es nulo esto significa que no se va a incrementar el riesgo, siendo el coeficiente de riesgo también nulo, en este caso se trata de una opción favorable frente a este criterio.

Como puede deducirse, en el cómputo de ambos coeficientes se introduce un concepto histórico en el sentido de acumulación de valores pasados tanto en d_t como en d_r . A la vez se deja un margen para acontecimientos futuros por la intervención de los valores de tiempo $T+\Delta T$ y riesgo R establecidos en el

plan de vuelo. Evidentemente, los valores ideales para ambos criterios se corresponden con valores nulos de C_t y C_r .

3) Consideraciones sobre la decisión a tomar: el problema ahora consiste en tomar la decisión de elegir una de las dos alternativas posibles A1 o A2 en función de los criterios C_t y C_r . Uno de los problemas que se plantean consiste en valorar un criterio frente al otro. Si como se afirma en Zengin y Dogan (2004) la prioridad es garantizar la supervivencia, entonces el criterio de riesgo prevalece sobre el de tiempo. No obstante, si lo que se considera prioritario es justamente llegar al objetivo en el tiempo especificado, la prioridad la asume el criterio de tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior se puede abordar el problema desde el punto de vista de la teoría de la decisión, concretamente desde la teoría de la utilidad multi-atributo (*“Multi-Attribute Utility Theory, MAUT”*) (Schafer, 2001; Rios, et al., 2001). Desde la perspectiva de la MAUT se construye la siguiente matriz de decisión D ,

$$D \equiv \begin{matrix} & \begin{matrix} C_t & C_r \end{matrix} \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{1t} & c_{1r} \\ c_{2t} & c_{2r} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

$$\begin{matrix} w_t & w_r \end{matrix}$$

donde el objetivo consiste en elegir una de las dos alternativas A1 o A2 para los valores de los criterios (atributos) c_{ij} con $i = 1, 2$ y $j = t, r$; teniendo en cuenta además la importancia relativa de cada criterio (w_t, w_r), con $w_t + w_r = 1$. De acuerdo con la MAUT la evaluación de una alternativa se define como una suma ponderada de los criterios con respecto a su importancia relativa,

$$d_i = \sum_{j=t,r} w_j c_{ij} \quad (11)$$

La decisión se toma en base al siguiente criterio,

$$m = \arg \min_{i=1,2} \{d_i\} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (12), se elige la alternativa A1 si $m = d_1$ o la alternativa A2 si $m = d_2$.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de ilustrar el comportamiento de la estrategia planteada en los apartados anteriores, se considera el escenario de la figura 1 como ejemplo de discusión en profundidad. Posteriormente, se proporcionan resultados sobre su comportamiento frente a diversas configuraciones del entorno. Los experimentos se han realizado bajo el lenguaje interpretado de MATLAB.

El modelo del terreno se ha detallado en la sección 2.1, de suerte que aplicando la metodología descrita en la sección 3.1, se determina que es posible obtener un plan de vuelo para una altura de vuelo del UAV de 1100 metros según el escenario de la figura 1. Esta

altura representa por tanto, el valor fijado para el plan de vuelo.

Seguidamente se establecen las especificaciones dadas en la tabla 1 también en relación al mencionado plan de vuelo. Se determina la velocidad máxima (v_{max}) en Km/h a la que puede volar el UAV; el tiempo (T) en horas requerido para alcanzar el objetivo junto con una posible desviación (ΔT) también en horas y el riesgo máximo (R) que se puede asumir.

Tabla 1 Especificaciones del plan de vuelo

v_{max} (Km/h)	$T + \Delta T$ (horas)	R
300	1.5 + 0.25	250

Con los valores dados en la tabla 1 se inicia el proceso de búsqueda de los caminos entre los puntos inicio, “way-points” y objetivo. Tras un proceso de prueba y error para cumplir las especificaciones anteriores se establece que el valor de la probabilidad de detección es 0.3; es decir las posiciones con estos valores de probabilidad son accesibles para el algoritmo A*. En la zona de solape de los radares se supera el valor de 0.3, siendo el mínimo 0.42. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos tras el proceso de búsqueda definido en la sección 3.1; L es la longitud de la trayectoria total en kilómetros; por tanto se puede calcular la velocidad estimada a la que puede viajar el UAV dado que $T = 1.5$ horas, obteniendo el valor indicado por v , cumpliendo así con la restricción de que $v < v_{max}$. También se cumple con la restricción de que $R_r < R$.

Tabla 2 Valores de la búsqueda

L (Km)	$v=L/T$ (Km/h)	R_r
393.00	262	78.20

El resultado de este proceso desemboca en el plan de vuelo mostrado en la figura 4.

Conviene resaltar un hecho importante que se pone de manifiesto en el escenario de la figura 4 relativo al solapamiento de los dos radares que aparecen. Lo lógico hubiese sido que el camino atravesara por el centro de los dos radares buscando la distancia más corta entre los puntos de paso 1 y 2, sin embargo se observa que se realiza un rodeo como consecuencia de dicho solapamiento, esto es así porque en la zona de solape la probabilidad de detección aumenta hasta 0.42 con respecto a los valores individuales (0.3) debido a la cooperación entre ambos, según se explica en la sección 2.2.

Establecido el plan de vuelo, se procede a la ejecución del mismo sin considerar restricciones cinemáticas o dinámicas del UAV exceptuando las definidas en el plan de vuelo para la velocidad-tiempo. Una vez iniciado el vuelo, entre la posición inicial y el punto de control de paso número 1, así

como entre el punto de control 2 y el objetivo surgen sendos “pop-ups”, figura 5. En ambos casos la decisión tomada ha sido la de evasión.

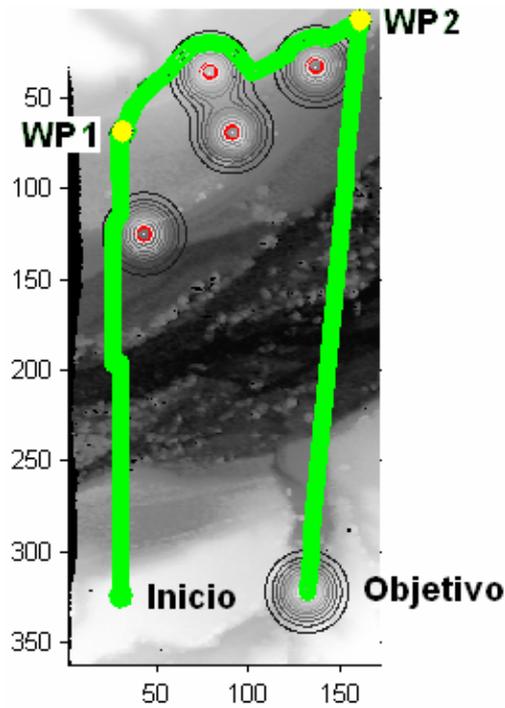


Figura 4. Plan de vuelo obtenido para el escenario definido en la figura 1.

En la tabla 3 se muestran los valores de los pesos asignados a los criterios utilizados para la toma de decisiones. Para que el riesgo de bordear las nuevas amenazas emergentes no sea exactamente nulo se ha considerado la posibilidad de asumir una probabilidad de detección de 0.3 como la fiada para el plan de vuelo. En cuyo caso el riesgo asumido en este bordeado de amenazas resulta ser 15.21 en cada una de ellas. El riesgo de atravesar cada amenaza emergente por su parte central resulta ser 63.34 siendo el mismo que el obtenido para las fijas se indicó en la sección 3.1.

Tabla 3 Valores de los parámetros para la decisión

# <i>pop-up</i>		C_i $w_i = 0.3$	C_r $w_r = 0.7$	d_i Eq. (11)
1	A1	0.000	0.566	0.396
	A2	0.393	0.400	0.374
2	A1	0.000	0.820	0.574
	A2	0.787	0.434	0.540

Por otro lado, asumiendo que el UAV tiene asignada una velocidad de vuelo de 262 Km/h, tabla 2, ante cada amenaza emergente de radio $r = 20.5$ Km, resultan los siguientes valores $t_{A1} = 0.1565$ y $t_{A2} = 0.2458$, ambos medidos en horas; por tanto el incremento de tiempo empleado para bordear cada

amenaza emergente resulta ser de 0.0893 horas. A partir de la ecuación (7) se pueden calcular los coeficientes de tiempo para ambas amenazas. De este modo, resulta para la primera amenaza, $d_1 = 2.03$ mientras que para la segunda resulta, $d_2 = 4.06$. Las importancias relativas se establecen bajo la suposición de que el riesgo es prioritario frente al tiempo en una proporción aproximada de 3 a 1.

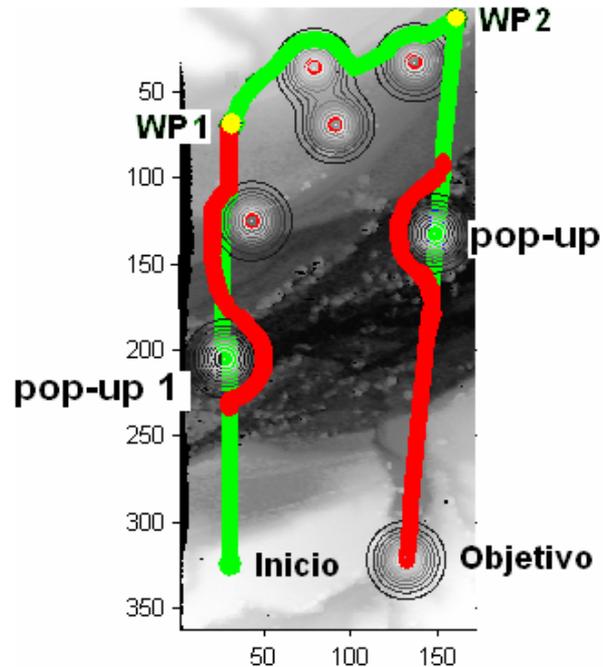


Figura 5 Planificación de trayectoria a partir del plan de vuelo de la figura 4.

Aplicando la ecuación (12) se deduce que para los dos “pop-ups” se ha elegido la alternativa A2 por ser $d_2 < d_1$ en ambos casos.

Se han realizado en total 1000 ejecuciones con otras tantas configuraciones de escenario. Cada configuración se establece sobre la misma base del terreno que en el caso anterior, variando tanto las amenazas fijas como las emergentes.

En la tabla 4 se muestra en la primera fila el número de amenazas fijas utilizadas; el número de amenazas emergentes ha sido en todos los casos variable entre cero y cuatro apareciendo en el escenario de forma aleatoria; en la segunda fila se muestra el número de ejecuciones realizadas con cada configuración de escenario; en la segunda fila se muestra el tiempo medio empleado por el algoritmo A* para establecer el plan de vuelo; en la cuarta fila se muestra el tiempo medio por amenaza utilizado por el UAV en tomar la decisión, es decir en elegir una de las dos alternativas posibles; finalmente en la quinta fila se muestra el porcentaje de veces que se ha elegido la alternativa A2. Por otro lado, las velocidades previstas en los 1000 planes de vuelo obtenidos han variado entre 163 y 298 Km/h. Los tiempos referidos previamente se miden en segundos de CPU, naturalmente bajo la consideración de su ejecución en el entorno de MATLAB.

Tabla 4 Configuración de escenarios y tiempos medios empleados para el plan de vuelo y la toma de decisiones

# amenazas fijas	2	4	6	8
# configuraciones escenario	240	260	290	210
tiempo medio plan de vuelo (s)	14.3	28.2	48.3	59.8
tiempo medio elección alternativa (s)	4.2	10.1	16.4	21.3
% elección A2	91	86	79	68

A la vista de los resultados mostrados en la tabla 4 se puede deducir lo siguiente:

1) Suponiendo que el tiempo de CPU se puede aproximar al real y a partir de los tiempos medios empleados en la toma de la decisión, se deduce que el caso más desfavorable se produce con 8 alternativas fijas con un tiempo de 21.3 segundos. Dado que la máxima velocidad prevista en los planes de vuelo es de 298 Km/h \approx 8.2 m/s y teniendo en cuenta dicho tiempo máximo, resulta que la distancia recorrida por el UAV mientras toma la decisión con los valores anteriores es de aproximadamente 170 metros, es decir no llega ni a recorrer la mitad de una celda que como se ha mencionado previamente es de 500 m.

2) A mayor complejidad del escenario (mayor número de amenazas fijas y emergentes), mayores son los tiempos medios empleados en la toma de decisiones. El tiempo medio para obtener un plan de vuelo también se incrementa con el número de amenazas fijas.

3) La complejidad del escenario también afecta a la elección de las alternativas de forma a mayor complejidad, menor número de veces se opta por la alternativa A2 debido principalmente a que las distancias a recorrer se incrementan.

Los resultados anteriores varían naturalmente con la resolución del terreno. En efecto, a mayor resolución mayor número de nodos y por tanto el algoritmo A*, que se basa en la búsqueda de caminos a través de nodos mayor tiempo emplea y viceversa; este hecho se refleja tanto en la elaboración del plan de vuelo como en la búsqueda de la alternativa A2. Precisamente, uno de los inconvenientes del algoritmo A* estriba en su coste computacional particularmente en entornos tridimensionales de alta resolución como se refleja en (Ruz *et al.*, 2007).

Las trayectorias obtenidas mediante el algoritmo A* se han comparado con las obtenidas por método MILP tanto para los entornos estáticos (Ruz *et al.*, 2006) como los dinámicos (Ruz *et al.*, 2007). En el caso dinámico la estrategia utilizada difiere de la empleada en este trabajo en cuanto que las amenazas emergentes se consideran situadas en determinadas localizaciones espaciales con una cierta probabilidad de aparición. En este caso se proporcionan varios planes de vuelo alternativos que se establecen de antemano, no en vuelo, evitando la posible aparición de dichas amenazas, posteriormente ante la aparición

de las mismas se opta por elegir la alternativa prevista. La propuesta de cada plan alternativo se elabora en función del tiempo empleado para recorrer el camino definido por el plan, el consumo de combustible y las alternativas que se han elegido previamente.

La validación de las trayectorias obtenidas se lleva a cabo teniendo en cuenta el criterio de los expertos en este tipo de análisis. Las trayectorias obtenidas por ambos métodos resultan ser satisfactorias y muy similares. Las diferencias que aparecen son debidas al cumplimiento de las restricciones establecidas en cada caso de tal manera que cuando éstas se cumplen, las trayectorias generadas son satisfactorias en cualquier caso. En este sentido, resulta factible el hecho de que las trayectorias obtenidas por los dos métodos pueden aproximarse entre sí hasta hacerse prácticamente similares sin más que ajustar los parámetros que intervienen en su generación.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una nueva estrategia que aborda la búsqueda de caminos en entornos estáticos mediante la elaboración de un plan de vuelo y proporciona una solución para la generación de trayectorias en los entornos dinámicos donde aparecen amenazas imprevistas y no contempladas en el primer caso.

En ambos planteamientos se emplea el algoritmo A*, utilizando como funciones de evaluación distancias euclídeas en el espacio 2D. Los nodos se eligen en función del mínimo coste desde el origen al nodo y desde éste hasta la meta, excluyendo los nodos identificados como obstáculos o de alto riesgo. En el futuro se pueden excluir nodos que sean inaccesibles por las restricciones dinámicas del UAV, tales como cambios bruscos de rumbo, velocidades o aceleraciones.

Cuando una amenaza hostil emergente o “pop-up” surge en el camino previsto en el plan de vuelo, el UAV debe tomar una decisión con el fin de cumplir con los criterios de tiempo y supervivencia especificados. Para la toma de decisiones se utiliza la teoría de la utilidad multiatributo, que permite englobar varios criterios para adoptar varias alternativas. Las estrategias de planificación inicial y replanificación proporcionan una solución al problema de realización de misiones con UAVs en entornos hostiles donde este tipo de tareas está cobrando mayor interés cada día en labores tales como vigilancia y reconocimiento.

Como investigación futura se apuntan dos líneas de trabajo encuadradas principalmente en el campo de la toma de decisiones multi-atributo, a saber: *a)* introducción de más criterios de decisión en lugar de los dos únicos utilizados en el presente trabajo y *b)* aprendizaje automático de los pesos involucrados en la ecuación (11), por ejemplo mediante el algoritmo ID3 (Pajares y Santos, 2005). La ampliación a planificación para formaciones de UAVs y control de varios vehículos es otra posibilidad de investigación abierta (Hao, 2004).

AGRADECIMIENTOS

La investigación realizada ha sido financiada por el proyecto "COSICOLOGI" S-0505/DPI-0391 de la Comunidad Autónoma de Madrid, así como por el Ministerio de Educación y Ciencia bajo el proyecto "Planificación, simulación y control para cooperación de múltiples UAVs". También ha sido desarrollada al amparo del proyecto 353/2005 titulado Evaluación de Técnicas de Inteligencia Artificial para toma de Decisiones y Optimización de Estrategias entre la Universidad Complutense de Madrid y la empresa EADS-Casa con la participación por parte de ésta de los ingenieros D. Tomás Puche, D. Ricardo Salgado, D^a Gemma Blasco y D. Daniel Pinilla. Un agradecimiento especial a los revisores por sus constructivos comentarios.

REFERENCIAS

- Dogan, A. (2003). Probabilistic approach in path planning for UAVs. En: *Proc. IEEE international symposium on intelligent control*, pp. 120-126, Houston, TX.
- Eames, A. M. (2005). Enabling path planning and threat avoidance with wireless sensor networks. *PhD Thesis*. Dpt. Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, MA, USA.
- Fraichard, T. (1999). Trajectory planning in a dynamic workspace: A 'state-time space' approach. *Advanced Robotics*, **13**(1), pp. 75-94.
- Hao, Y. (2004). A practical framework for formation planning and control of multiple unmanned ground vehicles. *PhD Thesis*. Dpt. Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, USA.
- Hespanha, J.P., H.H. Kizilocak, and Y.S. Ateskan (2001). Probabilistic map building for aircraft-tracking radars. En: *Proc. of the American Control Conference*, pp. 4381-4386, Arlington, VA.
- Hussain, T., D. Montana and G. Vidaver (2004). Evolution-Based Deliberative Planning for Cooperating Unmanned Ground Vehicles in a Dynamic Environment. En: *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'04)*, pp. 1017-1029, Seattle, WA.
- Jun, M. and R. D'Andrea (2002). Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in uncertain and adversarial environments. En: *Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms* (S. Butenko, R. Murphey and P. M. Pardalos. (Eds)), 95-111. Kluwer Academia Publishers. The Netherlands
- Kabamba, P.T., S.M. Merkov, and F.H. Zeitz (2006). Optimal path planning for unmanned combat aerial vehicles to defeat radar tracking. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, **29**, pp. 279-288.
- LaValle, S.M. (2006). *Planning Algorithms*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Latombe, J.C. (1991). *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- López, D., F. Gómez-Bravo, F. Cuesta y A. Ollero (2006). Planificación de trayectorias con el algoritmo RRT. Aplicación a robots no holónomos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **3**(3) pp. 56-67.
- Nilsson, N.J. (2000). *Inteligencia Artificial: una nueva síntesis*, McGraw Hill. Madrid.
- Pajares, G. y M. Santos (2005). *Inteligencia Artificial e Ingeniería del conocimiento*, RA-MA. Madrid.
- Passino, K. M. (2005). *Biomimicry for Optimization, Control and Automation*, Springer-Verlag, London.
- Rios, S., C. Bielza y A. Mateos (2001). *Fundamentos de los Sistemas de Ayuda a la decisión*, RA-MA. Madrid.
- Russel, S. and P. Norvig (2004). *Inteligencia Artificial: un enfoque moderno*, Prentice Hall. Madrid.
- Ruz, J. J., O. Arévalo, J.M. de la Cruz and G. Pajares (2006). Using MILP for UAVs Trajectory Optimization under Radar Detection Risk. In *Proc. 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2006)*, pp. 1-4, Prague, Czech.
- Ruz, J. J., O. Arévalo, G. Pajares and J.M. de la Cruz (2007). Decision making among alternatives routes for UAVs in dynamic environments. In *Proc. 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2007)*, pp. 1-4, Patras, Greece.
- Schafer, R. (2001). Rules for using multi-attribute utility theory for estimating a user's interests. In *Proc. of the workshop on Adaptivity and User Modelling in Interactive Systems (ABIS)*, University of Dortmund, Germany.
- Tews, A., M.J. Mataric and S. Sukhatme (2004). Avoiding Detection in a Dynamic Environment. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3773-3778, Sendai, Japan.
- Zabarankin, M., S. Uryasev and P. Pardalos (2001). Optimal risk path algorithm. Technical Report 2001-4, Department of Industrial Systems Engineering, University of Florida, USA.
- Zabarankin, M., S. Uryasev and R. Murphey (2006). Aircraft routing under the Risk of detection. *Naval Research Logistics*, **53**(8) pp. 728-747.
- Zengin, U. and A. Dogan (2004). Probabilistic Trajectory Planning for UAVs in Dynamic Environments. In *proceedings of AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit*, pp. 1-12, Chicago, Illinois.