

Integración de los paradigmas geométricos y topológicos de creación de mapas: Generación jerárquica de mapas del entorno

Antonio Bandera y Cristina Urdiales
Dpto. Tecnología Electrónica, ETSI Telecomunicación,
Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071

30th April 2002

RESUMEN

En este artículo se presenta una estructura que permite albergar de forma eficiente distintas representaciones del entorno. El nivel de abstracción de estos mapas varía desde la exactitud física del mapa geométrico generado directamente de la interpretación de las medidas sonar, hasta la mucho más eficiente representación de los mapas topológicos. Básicamente, el método obtiene, partiendo de una representación en grid uniforme del entorno, un conjunto de mapas donde la información del entorno se codifica en un número cada vez menor de nodos. De esta forma, un mismo entorno puede, por tanto, analizarse a distintos niveles de abstracción, con la ventaja de que todas estas representaciones están disponibles al unísono, pudiéndose hacer uso de la que resulte más interesante en función de la tarea que deba llevar a cabo el agente autónomo. Finalmente, el mapa topológico obtenido y su grafo de conectividades asociado ha sido empleado satisfactoriamente en aplicaciones de path-planning.

I. INTRODUCCIÓN

La capacidad de un agente autónomo para memorizar un determinado entorno y, de esta forma, poder llevar a cabo de forma deliberada determinadas acciones como navegación o localización, se basa en representar el entorno en una estructura de datos posteriormente procesable. Además, si se pretende emplear en entornos dinámicos, no siempre totalmente explorados, esta estructura de datos debe tener dos características fundamentales: i) poder ser actualizada fácilmente conforme el agente autónomo se mueva por el entorno, y ii) facilitar el procesado cuando se pretenda realizar una acción compleja, como puedan ser la búsqueda de camino mínimo o el proceso de

autolocalización.

El método propuesto integra las dos aproximaciones más empleadas en generación de mapas para entornos de interiores, denominadas paradigmas geométrico y topológico [1] [22]. En el primero se obtiene una representación exacta del entorno, en el que los obstáculos y zonas libres se modelan de acuerdo a relaciones geométricas absolutas. Dentro del conjunto de métodos que siguen este paradigma, el más empleado consiste en dividir el entorno en celdas cuadradas de tamaño constante a las que se asigna una determinada probabilidad de ocupación (*occupancy grid*) [9] [15]. El principal problema de estos métodos es que, para poder conseguir una representación útil para navegación o localización, deben emplear celdas de tamaño pequeño, con lo cual el volumen de información que almacenan es relativamente elevado y, por tanto, costoso de procesar. La ventaja obvia es que constituyen la representación más fideligna del entorno explorado. Por otro lado, las representaciones topológicas transforman el entorno en un conjunto de regiones que se caracterizan por la dificultad que presentan al ser atravesadas. Estas regiones forman un grafo o representación simbólica del entorno, donde los nodos son las distintas regiones en que se divide el entorno y los arcos indican las relaciones espaciales entre ellas [13]. Este tipo de representación presenta un volumen de información mucho menor que la anterior, por lo cual el procesamiento de alto nivel (p. ej., el cálculo de caminos) será computacionalmente mucho menos costoso.

Si se analizan en detalle, ambos paradigmas se caracterizan por su complementariedad. Así, ya que la representación geométrica refleja directamente la información sensorial captada por el agente, resulta relativamente fácil de aprender y mantener, bastando para ello con tener un mapa bidimensional donde reflejar las lecturas de los sensores en función de estrategias de actualización que no son especialmente costosas [26] [20]. Evidentemente, este tipo de representación es muy vulnerable a errores que alteren la información métrica (p. ej., errores odométricos o de *slippage*), pero estos errores se pueden prevenir con técnicas de autolocalización eficientes [11]. Por otro lado, la representación topológica modela el entorno de forma más compacta [21], siendo la complejidad del mapa obtenido directamente proporcional a la del entorno. Esto permite optimizar, tanto en tiempo como en recursos, el procesamiento de alto nivel. Además, ya que el mapa topológico no es una representación física exacta del entorno, resulta mucho menos vulnerable a errores de medida. Lógicamente, el problema radica en obtener, de la información sensorial, el conjunto de nodos y arcos que constituyen dicha representación.

Dadas las características de ambas representaciones, la tendencia actual es tratar de combinar de algún modo ambos paradigmas [7] [24] [1] [22], generando representaciones del entorno que, en cierta forma, se pueden considerar como topológicas, y que se basan en la información procedente

de mapas geométricos locales o globales. Esta combinación, sin embargo, no siempre se consigue satisfactoriamente. Así, un conjunto importante de los métodos de representación desarrollados se basan en la estructura del *quadtree* [27], que se construye dividiendo toda región no uniforme en cuatro cuadrantes iguales. El proceso de división se repite de forma recursiva hasta que todas las regiones que representan el entorno son uniformes o tienen un tamaño mínimo. Según lo expuesto, este tipo de representaciones no son estrictamente topológicas, además, plantean dos problemas fundamentales. El primero de ellos es que toda región se caracteriza ahora por su centroide, por lo que la búsqueda de caminos, por ejemplo, depende enormemente de las posiciones relativas de los obstáculos, especialmente si estos están localizados en las fronteras de cuadrículas de distintos tamaños [7] [24]. Por otra parte, otro problema es que el proceso de partición opera con la misma estructura métrica siempre, sin tener en cuenta la verdadera distribución de probabilidades de ocupación del entorno. El hecho de no tener en cuenta la información de la probabilidad de ocupación para determinar la forma de las regiones, origina la aparición de numerosos nodos, de pequeño tamaño, en torno a los obstáculos presentes, lo cual se opone frontalmente al paradigma topológico, que presupone la existencia de un nodo por región del espacio [13]. Para tratar de corregir el primer problema, se han propuesto dos soluciones: i) el desplazamiento del origen del *quadtree* [18], que no soluciona totalmente el problema, pues si lo solventa para un determinado obstáculo, puede causarlo en cualquier otro; y ii) el empleo de los *framed-quadtree* [7], que consiste en rodear cada región uniforme (*quad*) con un conjunto de celdas de mínimo tamaño. De esta forma, el camino puede atravesar la región desde cualquier punto hasta cualquier otro, permitiendo la obtención de caminos prácticamente óptimos [7] [24]. La estructura *framed-quadtree* propuesta sigue sin solucionar, sin embargo, el principal problema del método de representación, que es su gran dependencia respecto a la filosofía de división del entorno.

Aunque siguen otra filosofía de actuación, los métodos basados en los *roadmaps* también tratan de reducir la complejidad que presentan los mapas geométricos [4] sin generar un mapa puramente topológico. Básicamente, la representación generada por el método del *probabilistic roadmap* es una red de caminos que conectan una serie de nodos o posiciones libres de obstáculos, obtenidas aleatoriamente muestreando el espacio de posibles posiciones. Este método presenta el problema de que estos nodos no siempre están correctamente ubicados para poder representar eficientemente el entorno, por lo que actualmente se están desarrollando nuevas estrategias para situarlos de forma más óptima [12].

El método de la partición de resolución variable *variable-resolution partitioning* [1] usa una técnica de interpretación neuronal de la lectura de los sensores para obtener un mapa métrico

local, que luego usa para modelar los contornos de los obstáculos mediante líneas rectas. Estas líneas, al ser propagadas, permiten segmentar el entorno de forma bastante óptima. El problema del método surge cuando los contornos de los obstáculos no son sólo paralelos o perpendiculares, sino que adoptan distintos ángulos. El mapa métrico-topológico propuesto por Thrun [23] actúa de forma similar, pues también usa un mapa métrico local para modelar el espacio que rodea al agente. Sin embargo, este método usa dicha información para obtener un mapa geométrico global, y sólo se obtiene una representación topológica cuando se ha explorado todo el entorno.

Dentro del conjunto de métodos que integran de forma estricta métodos geométricos y topológicos, posiblemente la mejor referencia sea la aproximación estadística propuesta por Thrun [22]. En este método se mezclan técnicas geométricas muy similares a las propuestas por Lu y Millios [14], con algoritmos topológicos que se encuentran muy influenciados por los trabajos de Shatkay y Kaelbling [19]. Sin embargo, el método propuesto no genera un único mapa, sino que emplea un mapa topológico para localización y otro geométrico para navegación. El principal problema es que la ubicación de los nodos del mapa topológico no es obvia, por lo que la construcción correcta de dicho mapa está aún por resolver.

El método que se propone trata de concentrar la información del mapa geométrico en un conjunto de nodos. Cada uno de estos nodos representará a una región de celdas con valor de probabilidad de ocupación homogéneos, pero cuya forma puede ser irregular. Para obtener este conjunto final de nodos se emplea una estructura jerárquica de niveles que tiene como base el mapa geométrico, y que reduce en cada nivel el conjunto de nodos respecto al nivel inferior mediante la agrupación de celdas próximas y con valores de probabilidad de ocupación similares. El resultado obtenido en cada nivel es un mapa topológico con nodos que poseen asociada una región en la base, y que define un grafo de conectividades o líneas de paso entre regiones. Para generar esta representación jerárquica del entorno se dispone actualmente de dos estructuras distintas, la primera de ellas se basa en algoritmos de visión artificial, sobradamente analizados en aplicaciones de visión activa y segmentación de imagen [2]. La segunda de las estructuras actúa bajo los mismos principios de generar regiones de forma irregular y homogéneas en su valor de probabilidad de ocupación, pero su construcción es totalmente distinta, solventando ciertos problemas que aparecían en la primera de las estructuras.

El resto del artículo se ha organizado como sigue. En el apartado II se introducen las estructuras jerárquicas de datos que soportan al método de representación propuesto, ampliándose la información sobre el comportamiento de estas estructuras en el apartado III. El apartado IV analiza la aplicación de un algoritmo de navegación sobre la estructura de representación del entorno propuesta. Finalmente, los apartados V y VI muestran los resultados y conclusiones

obtenidas.

II. PRELIMINARES

La forma más eficiente de reducir el tamaño del mapa geométrico, basada en la filosofía inherente al paradigma topológico, consistiría simplemente en agrupar los conjuntos de celdas conectadas que tuvieran una probabilidad de ocupación similar en un único nodo, cuya probabilidad de ocupación sería la de este conjunto. El nodo resultante también proporcionaría información sobre la probabilidad de ocupación pero, al contrario que la celda, ese valor debería acompañarse por información sobre las celdas asociadas a él. Si la región de celdas asociadas al nodo no tiene una forma regular, su contorno o distribución deberá ser conocida. Toda esta información podría representarse mediante tablas o listas enlazadas [7], pero este tipo de estructuras son variables en el espacio y no resultan compatibles generalmente con la mayoría de las herramientas de procesamiento.

En este trabajo se propone el empleo de dos estructuras distintas que permiten reducir la información del mapa geométrico en un conjunto de niveles con un número de nodos exponencialmente decreciente. De esta forma, se podrá disponer en la misma estructura de un mapa geométrico, fácilmente actualizable y donde se podría llevar a cabo, por ejemplo, el trazado final del camino, y de un mapa topológico, con un número de nodos fijo y donde se podría realizar la búsqueda de dicho camino. La primera de las estructuras empleadas se basa en las pirámides de enlace adaptativo propuestas por Burt y Rosenfeld [5] [6] para el tratamiento de imagen, modificadas para esta aplicación en particular, mientras que la segunda de las estructuras está más enfocada al modelado del entorno, y resuelve algunos de los problemas que se planteaban al usar la primera de las estructuras.

II.1. PIRÁMIDES DE ENLACE ADAPTATIVO PONDERADAS POR DISTANCIA

Una pirámide básica es una secuencia de mapas generados a resolución progresivamente menor partiendo de una base o mapa inferior uniforme (mapa geométrico inicial). Por lo tanto, cada mapa o nivel de la pirámide básica tiene resolución uniforme. En la Fig. 1.a se muestran los niveles obtenidos empleando una estructura de enlaces 4-a-1, que implican que cada nodo-padre del nivel $l+1$ tendrá un valor obtenido como la media de los 2×2 nodos inmediatamente inferiores en el nivel l -hijos-. Como se puede observar, la pirámide ofrece la importante ventaja sobre

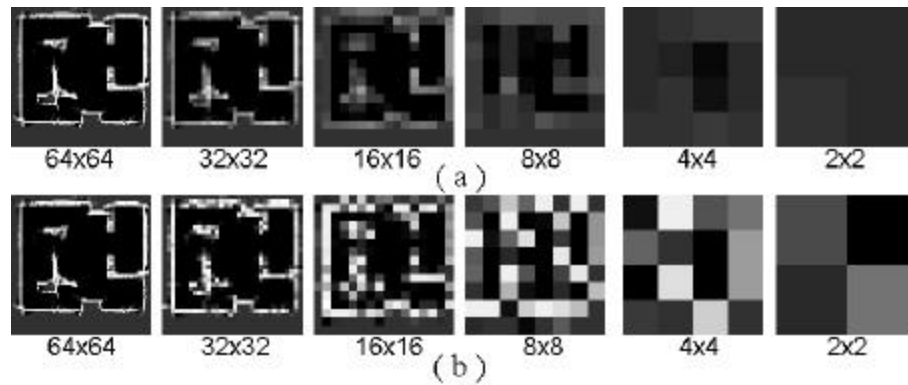


Figure 1: Distintos niveles disponibles en: a) una pirámide básica; y b) una pirámide adaptativamente estabilizada.

el grid uniforme de disponer de un conjunto de mapas a distinta resolución. De esta forma, se puede seleccionar el mapa más adecuado para cada aplicación, llevando a cabo de forma eficiente procesado local o global. Sin embargo, la estructura piramidal básica presenta un importante problema en su propia construcción, ya que, como se observa en la Fig. 2.a lo único que se hace para obtener cada nodo de un mapa de resolución menor es promediar valores de probabilidad de ocupación de los niveles inferiores, por lo que no se hace nada para que dicho nodo no tenga asociado, simultáneamente, celdas libres y ocupadas.

Para evitar este problema se puede emplear el principio del Enlace Adaptativo (*pyramid linked*). Básicamente, este método consiste en redefinir iterativamente las relaciones entre nodos padres e hijos establecidas en la pirámide básica de manera recursiva y partiendole desde los niveles más inferiores hacia los superiores. Esta redefinición de enlaces se llevará a cabo de manera que los nodos de cada nivel se enlacen con los padres que presenten una probabilidad de ocupación más similar. Si se analiza el algoritmo que lleva a cabo esta redefinición, el proceso consiste en permitir que todo nodo pueda elegir como padre el que presente una probabilidad de ocupación más parecida de entre los cuatro nodos del nivel superior. Este proceso se repite para cada nivel de la estructura hasta que no hay cambios de enlaces, y entonces pasa a ejecutarse en el nivel superior a éste. Después de que toda la pirámide ha sido estabilizada, el nodo de cualquier nivel estará enlazado a una región irregular de celdas en la base de la estructura. Todas estas regiones tienen celdas con valores de probabilidad de ocupación similares, por lo que el espacio libre o los obstáculos estarán agrupados en un conjunto de nodos lo más reducido posible. La Fig. 1.b muestra los distintos mapas obtenidos tras el proceso de reenlazado, en los que se puede notar como los nodos de los distintos niveles conservan un valor de probabilidad de ocupación definido, lo cual indica, como se observa en la Fig. 2.b, que ahora cada nodo está enlazado a una región de forma irregular en la base pero con celdas de valor de probabilidad de ocupación homogéneo

(*irregular partitioning*).

Finalmente, las Figs. 3.b y 3.e muestran el nivel 8x8 de la pirámide antes y después de la estabilización adaptativa, respectivamente. Las Figs. 3.c y 3.f presentan las regiones en la base asociadas a los nodos de los niveles 8x8 de las pirámides sin estabilización y con estabilización, respectivamente, siendo el nivel de gris proporcional a su probabilidad de ocupación. De esta forma, los valores más oscuros se corresponden a probabilidades bajas y los más claros con niveles de probabilidad más altos. Se puede observar claramente como la descomposición en regiones que implica la pirámide no estabilizada no es válida, mientras que la generada por la pirámide estabilizada sí que lo es. Para reforzar esta idea, en las Figs. 3.d y 3.g se muestra el grafo de conexiones que generan las regiones asociadas a los nodos de las Figs. 3.b y 3.e. Este grafo se construye suponiendo que las regiones con un nivel de probabilidad de ocupación suficientemente alto son obstáculos. El grafo mostrado en la Fig. 3.d presenta el problema de que las regiones asociadas incorporan tanto espacio libre como ocupado, y al abundar más el primero, la mayoría de los nodos son transitables. En la Fig. 3.g se genera un grafo más acorde al mapa real. Como se verá en el apartado III este grafo, así como las probabilidades de ocupación de los nodos que lo forman, constituirán el mapa topológico del entorno.

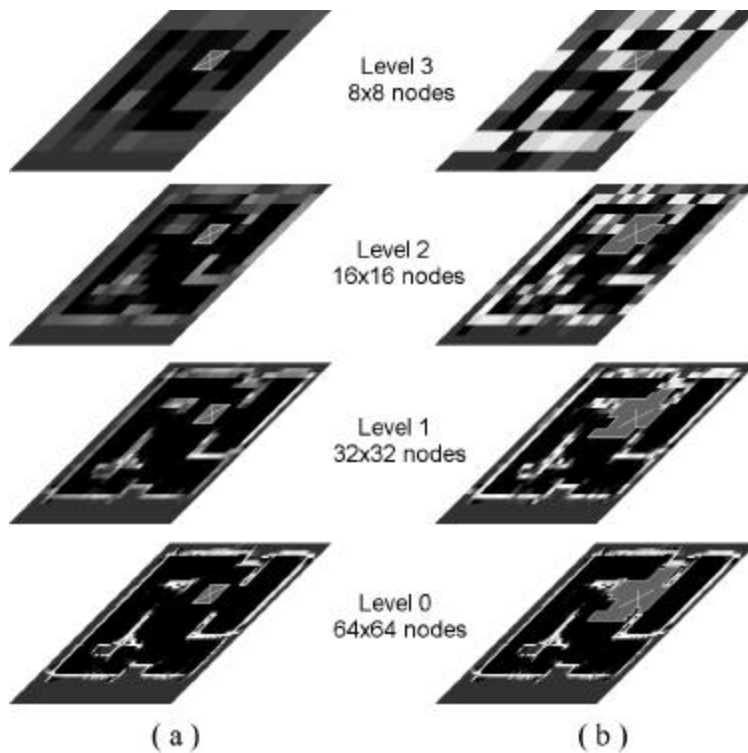


Figure 2: Nodos enlazados al nodo (2,4) del nivel 8x8 de: a) la pirámide básica; y b) la pirámide adaptativamente enlazada.

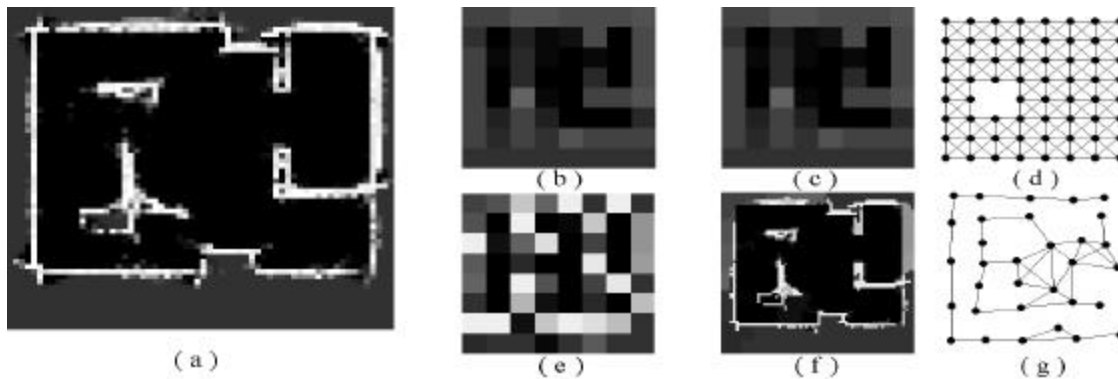


Figure 3: a) Grid uniforme de 64x64 nodos; b) nivel 8x8 de la pirámide no estabilizada; c) regiones en la base de la pirámide asociadas a los nodos en b); d) mapa topológico que generaría b); e) nivel 8x8 de la pirámide estabilizada; f) regiones en la base de la pirámide asociados a los nodos en d); y g) mapa topológico que generaría e).

El principal problema del proceso de reenlazado propuesto es que las regiones en la base, enlazadas a un único nodo en un nivel superior de la estructura, no tienen porqué estar conectadas. La existencia de regiones no conectadas no es posible en representaciones topológicas, ya que entre los nodos del nivel de la pirámide empleados para buscar un camino se debe poder definir arcos que definan la relación espacial entre ellos. La Fig. 4 presenta un ejemplo que ilustra este problema. Los niveles de la pirámide que se muestran en las Figs. 4.b y 4.c han sido obtenidos usando la estabilización adaptativa clásica. En la Fig. 4.d se puede observar cómo la región asociada al nodo marcado con una **X** en la Fig. 4.b no está conectada internamente. Para evitar la ruptura de caminos, los cambios de enlaces que afecten a la conectividad de las regiones pueden ser penalizados, haciendo que el proceso de reenlazado no sólo tenga en cuenta información acerca de la probabilidad de ocupación, sino también información espacial. De esta forma, la medida de parecido entre probabilidades se pondera por un factor de distancia que depende de la proximidad entre nodos padre e hijo. La Fig. 5 muestra el conjunto de padres a los que se puede enlazar un determinado nodo hijo, siendo el factor d_1 de valor $\sqrt{2}/2$, el factor d_2 igual a $\sqrt{10}/2$ y el factor d_3 de valor $3 \cdot \sqrt{2}/2$. El nodo hijo se enlazará al padre más cercano, estando la distancia entre dos nodos definida por el producto entre la diferencia de sus valores de probabilidad y el factor de ponderación espacial mencionado.

A pesar de la influencia de la proximidad espacial en el proceso de reenlazado, algunas celdas aisladas en el nivel base podrían conectarse a otras regiones que si están internamente conectadas. Estas celdas se asocian generalmente a reflexiones sonar o regiones residuales cuya probabilidad se debe a obstáculos móviles o regiones no exploradas totalmente, y deben ser eliminadas para evitar errores posteriores del algoritmo de navegación. Para ello, después de la estabilización

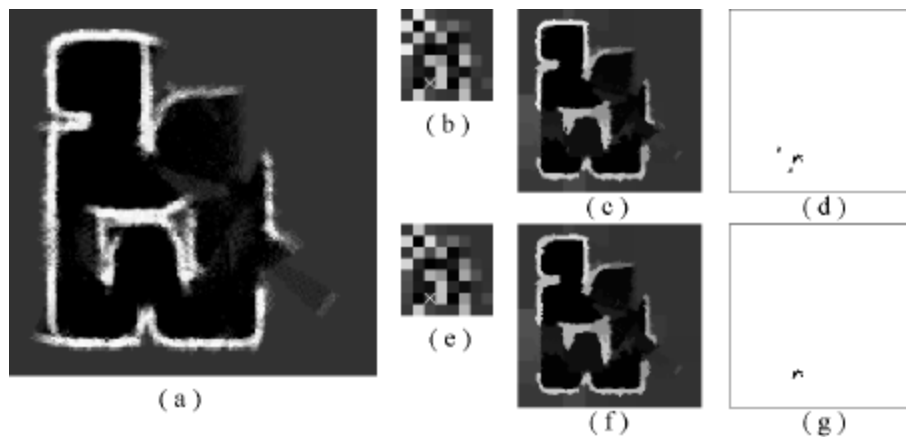


Figure 4: a) Grid uniforme de 256x256 nodos; b) nivel 8x8 de la pirámide estabilizada; c) regiones en la base de la pirámide asociadas a los nodos en b); d) región asociada al nodo marcado en b); e) nivel 8x8 de la pirámide estabilizada con peso por proximidad física; f) regiones en la base de la pirámide asociados a los nodos en e); y g) región asociada al nodo marcado en e).

de la pirámide, se lleva a cabo un proceso descendente que mezcla las celdas aisladas con las regiones vecinas que presenten valores de probabilidad de ocupación más similares. La pirámide que se muestra en las Figs. 4.e y 4.f ha sido estabilizado usando el principio de enlace adaptativo modificado propuesto. Se puede observar como, en este caso, la región enlazada al nodo **X** de la Fig. 4.e es conectada (Fig. 4.g).

Finalmente, en la Fig. 6 se muestra como la complejidad del mapa topológico aumenta conforme se selecciona un nivel de trabajo de mayor tamaño. Se puede observar como la codificación del entorno es correcta en los tres mapas mostrados.

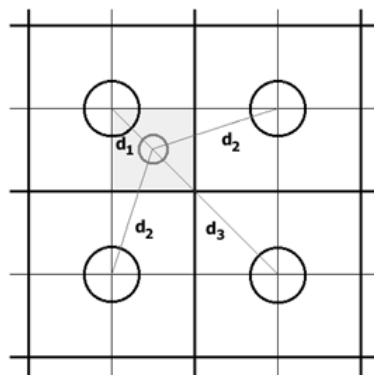


Figure 5: Relaciones entre un nodo hijo y sus cuatro posibles nodos padres.

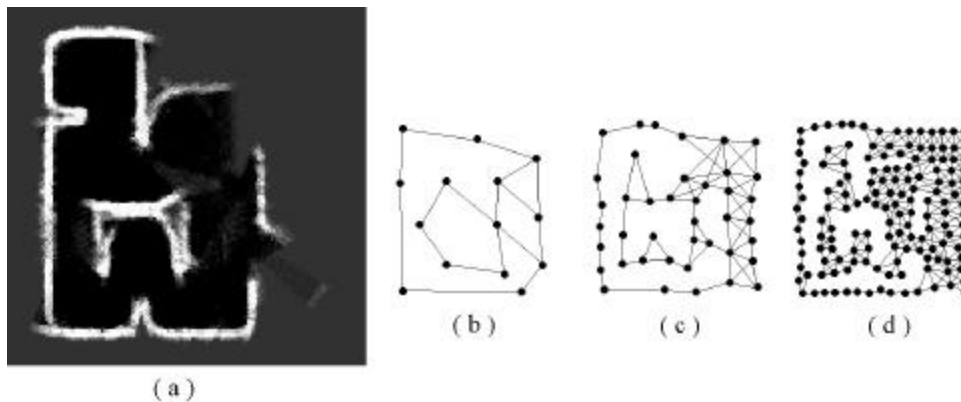


Figure 6: a) Grid uniforme de 256x256 nodos; y b-d) mapas topológicos obtenidos en los niveles 2x2, 4x4 y 8x8, respectivamente, de la pirámide.

II.2. PIRÁMIDES DE ENLACE ADAPTATIVO INTERNAMENTE CONECTADAS

Para forzar la conectividad de las regiones que luego formaran el mapa topológico, la estructura presentada en el epígrafe II.1 necesitaba de un paso final de reenlazado de celdas aisladas, que asegura la no existencia de regiones no conectadas. Este paso puede llegar a ser excesivamente costoso si la estructura piramidal presenta un conjunto de niveles elevado entre base y nivel de trabajo. Además, el hecho de obligar al usuario a seleccionar un determinado nivel de trabajo presupone la existencia de un conocimiento previo sobre el espacio que va a ser o ha sido explorado, e implica una uniformidad en el tamaño de las regiones que forman dicho espacio. De hecho, en determinados trabajos de visión artificial se emplean algoritmos que realizan la búsqueda de los potenciales objetos en distintos niveles de la estructura tridimensional [2].

La estructura que se propone a continuación está plenamente adaptada para su uso en la construcción de mapas topológicos del entorno. Para ello parte de un conjunto de premisas entre las que se encuentran:

- Despreciar la información de los nodos detectados como obstáculos, pues el agente móvil jamás podrá atravesar por uno de estos nodos.
- Binarizar la información sobre ocupación del mapa. Aunque los nodos puedan conservar el valor real de probabilidad de ocupación, a la hora de formar regiones conectadas los nodos se agruparan en regiones libres o no exploradas.
- Definir el conjunto final de nodos del mapa topológico de manera totalmente no supervisada, de forma que el tamaño final de éste no dependa de la decisión del usuario sino de la geometría del entorno.

La estructura tridimensional que soporta esta nueva representación del entorno tiene una forma física muy similar a la analizada en el epígrafe II.1, pero la definición de los enlaces obedecerá a un algoritmo completamente distinto. Dicho algoritmo consta de cuatro pasos básicos:

1. Umbralización de los valores de la base. Los nodos se clasifican, en función de su valor de probabilidad, en nodos libres, ocupados y no explorados. Esta umbralización se realiza definiendo dos valores de umbral (Fig. 7). Todos los nodos de la base serán entidades homogéneas.
2. Generación del resto de niveles de la estructura. En este caso no existe proceso iterativo, actualizándose para cada nodo de la estructura cuatro campos importantes:
 - Homogeneidad. Si la región de cuatro nodos hijos inmediatamente bajo el nodo a crear presenta valores de probabilidad iguales y los cuatro se catalogan como homogéneos, entonces el nodo creado será homogéneo.
 - Probabilidad de ocupación. Valor medio de probabilidad de ocupación de los cuatro nodos inmediatamente bajo el nodo a crear. Dicho valor estará ponderado por las áreas respectivas de estos nodos.
 - Area. Suma de los valores de área de los cuatro nodos hijos.
 - (X,Y). Se inicializan a valor nulo.

Cabe reseñar que, paralelamente al cálculo de estos valores por nodo, si se determina que un nodo es homogéneo, los campos (X,Y) de los cuatro hijos que lo forman se actualizan al valor del padre. Una vez finalizado este paso, la estructura de enlaces ya distingue regiones homogéneas, pero éstas presentan una forma regular, y no reflejan la verdadera distribución presente en el espacio (Fig. 8.a).

3. Fusión de nodos homogéneos. Este paso descendente se encarga de reenlazar, si es posible, nodos homogéneos aún no enlazados a ningún padre. Básicamente, se trata de enlazar este nodo al padre de alguno de sus nodos vecinos. Para que se cree este enlace se deberán de cumplir dos condiciones:
 - El valor de probabilidad de ambos nodos, futuro padre e hijo, sea igual.
 - La distancia entre los centroides de las regiones que ambos nodos representan en la base no supere un determinado umbral, *DistMax*, que dependerá del tamaño máximo de región que se desee crear finalmente en la base.

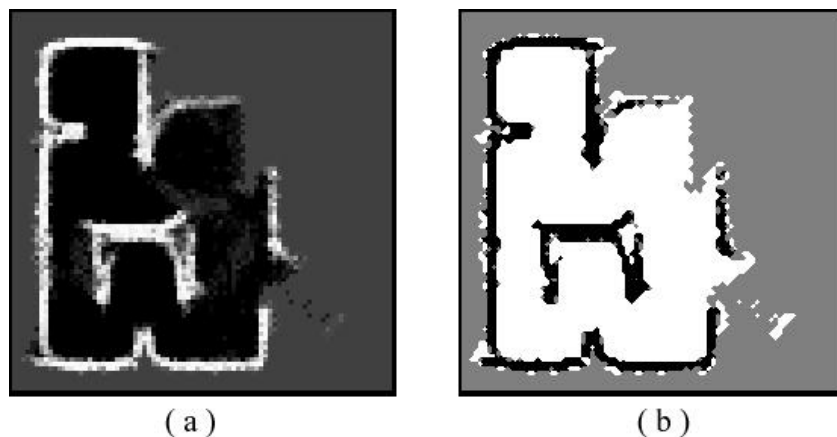


Figure 7: a) Grid uniforme de 256x256 nodos; y b) grid umbralizado (Negro - Obstáculo, Gris - No explorado, Blanco - Espacio libre).

Tras la fusión de estos nodos se completa parte de la estructura de enlaces, obteniendo ahora nodos superiores que representan a regiones no homogéneas en la base (Fig. 8.b). Sin embargo, aún quedan zonas en la base de probabilidad uniforme y que no se encuentran fusionadas.

4. Clasificación de nodos raíz. Los nodos homogéneos se fusionan si están conectados y presentan probabilidades de ocupación iguales. Este paso completa totalmente la estructura de enlaces (Fig 8.c).

Por lo tanto, el algoritmo sólo posee un parámetro interno importante seleccionable por el usuario, que es el valor del umbral que determina el tamaño máximo de las regiones, *DistMax*. Dicho umbral no resulta, sin embargo, decisivo a la hora de conformar el conjunto de regiones del mapa topológico. Así, en la Fig. 9 se muestran tres representaciones obtenidas partiendo de un mismo entorno con valores de *DistMax* distintos. Se puede apreciar cómo las tres representaciones son muy similares.

Como se anotó al inicio del presente apartado, las dos ventajas de este algoritmo de construcción de mapas topológicos son: i) que las regiones que forman el mapa están forzosamente conectadas, y, dado que esta premisa forma parte de la creación del mapa, para conseguirlo no se consume un tiempo excesivo; y ii) que la selección de los nodos del mapa topológico se lleva a cabo de forma no supervisada en los distintos niveles de la estructura jerárquica. En la Fig. 10 se muestra la ubicación de los nodos del mapa topológico en una estructura jerárquica PAIC. Se puede apreciar como los nodos se reparten por cuatro niveles distintos de la estructura.

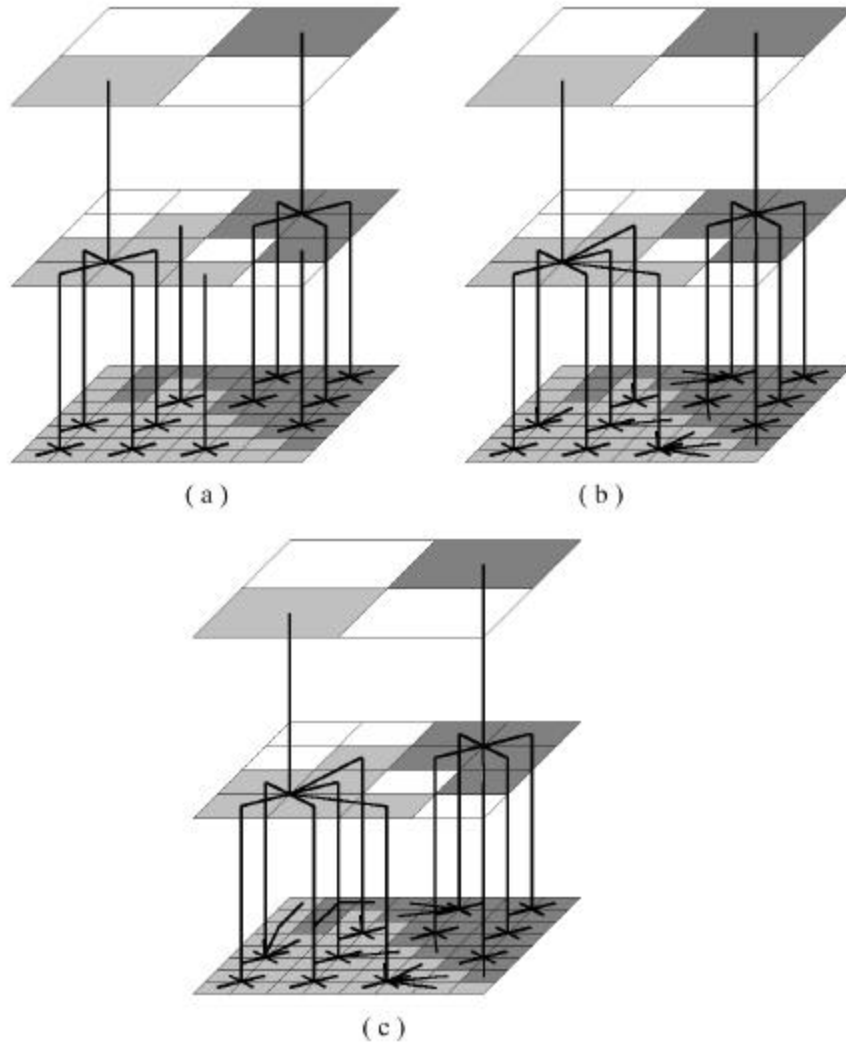


Figure 8: a) Estructura de enlaces inicial; b) estructura de enlaces tras la fusión de nodos homogéneos; y c) estructura de enlaces tras la clasificación de nodos raíz.

III. CREACIÓN DEL MAPA DEL ENTORNO

Los dos métodos propuestos permiten que un robot modele su entorno creando una partición P del mismo, que se caracterizará por estar formada por elementos de tamaño irregular. Así, cada elemento $p \in P$ será una región del entorno cuyo valor de probabilidad de ocupación reflejará el comportamiento de toda la región. El correcto funcionamiento del método implica que todas las regiones tengan un nivel de probabilidad homogéneo. Como se ha comentado en el apartado II, el método de la pirámide adaptativa ponderada por distancia (PAPD) permite obtener distintos mapas del entorno en función del nivel de trabajo escogido, por lo que se puede seleccionar como mapa de trabajo el que ofrezca las mejores prestaciones para la aplicación en particular. Por otro lado, el método de la pirámide adaptativa internamente conectada (PAIC) no permite

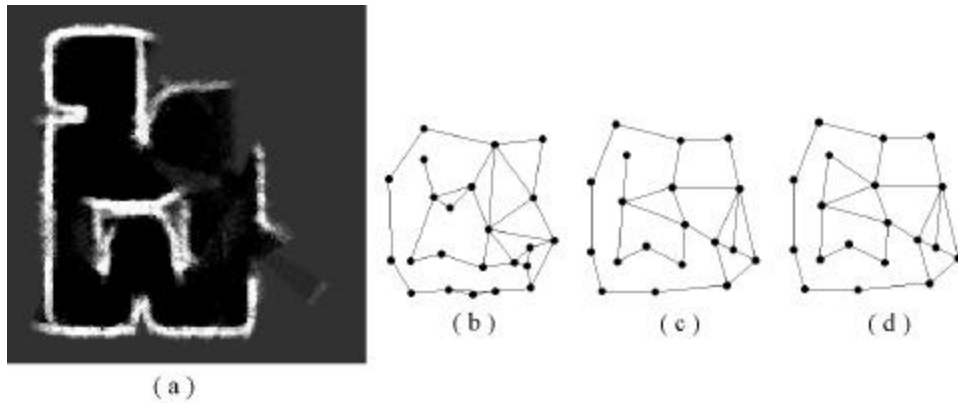


Figure 9: a) Grid uniforme de 256x256 nodos; y b-d) mapas topológicos obtenidos usando *DistMax* igual a 40.0, 60.0 y 80.0, respectivamente.

la selección del nivel de trabajo, generando de forma no supervisada el mapa o representación topológica.

Una característica importante de ambos métodos es que, debido al proceso de obtención de las regiones, no presentan los problemas de tener que establecer ninguna hipótesis previa sobre la forma de los obstáculos [1], ni de presentar un grado de descomposición dependiente de la distribución de los mismos [7]. Estas características permiten la aplicación de los dos métodos en entornos no estructurados, sin que el tiempo empleado en la generación del mapa sea dependiente del grado de complejidad del mismo.

A continuación se presentan, de forma esquemática, los dos algoritmos de construcción de mapas topológicos.

III.1. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA TOPOLÓGICO USANDO PAPD

Básicamente, el algoritmo de construcción del mapa consta de los siguientes pasos:

- Cálculo del mapa probabilístico. Este mapa se construye usando la aproximación clásica [10], asignando valores de probabilidad de ocupación altos a las celdas ocupadas y bajos a las celdas libres.
- Aplicación de un algoritmo de realzado de obstáculos. Este paso es necesario para trabajar con celdas de tamaño menor que la base del agente móvil. Este algoritmo [25] pondera las probabilidades en la vecindad de la celda procesada: si el valor resultante P (véase Ec. (1)) es mayor que un umbral prefijado, la probabilidad de la celda se pone a uno,

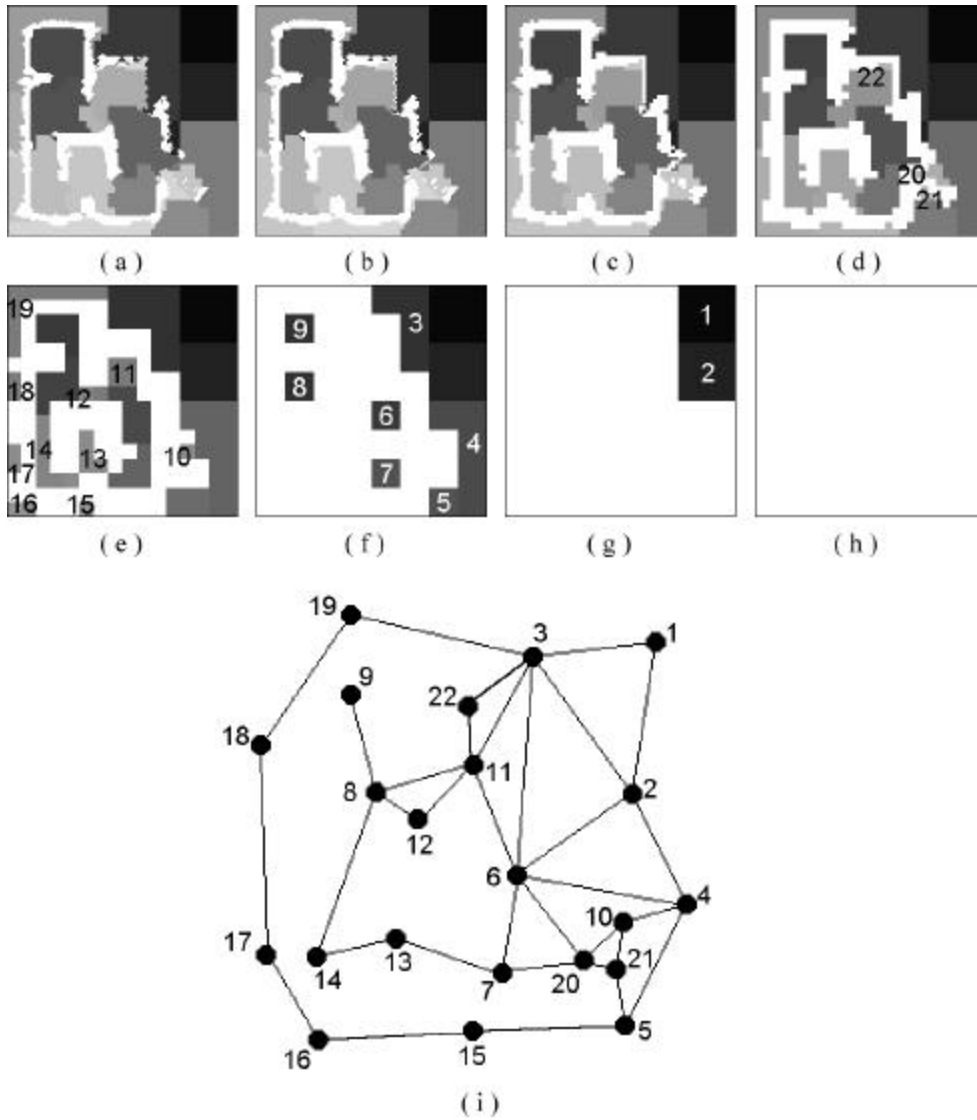


Figure 10: a-h) Niveles segmentados de la estructura jerárquica PAIC (256x256, 128x128, 64x64, 32x32, 16x16, 8x8, 4x4 y 2x2) en los que se han marcado los nodos origen de las distintas clases en que se segmenta el mapa; e i) mapa topológico asociado.

marcándose como un obstáculo. En cualquier otro caso, se reemplaza por P :

$$P = \frac{\sum_{i=x-N}^{x+N} \sum_{j=y-N}^{y+N} p_{ij}}{4N^2} \quad (1)$$

donde $4N^2$ es el número de celdas procesadas, y p_{ij} es el valor de probabilidad de cada celda.

- Generación de una pirámide multinivel. El mapa probabilístico se toma como la base de la pirámide. Inicialmente, la pirámide se construye como una estructura 4-a-1, de forma que todos los nodos de niveles por encima de la base se enlazan con los cuatro nodos

inmediatamente debajo de ellos. El valor de probabilidad de cada nodo es la media de aquellos nodos enlazados a ellos.

- Estabilización de los enlaces. Usando el principio de enlace adaptativo, se enlazan los nodos de cada nivel con el nodo del nivel superior más similar dentro de una vecindad preestablecida. Todos los nodos de niveles inferiores al nivel 1x1 de la estructura presentan cuatro padres posibles, y cada padre podrá tener hasta 16 nodos hijos posibles enlazados a él. En este caso, para cada nodo se identifica el valor de padre más similar de manera iterativa, y se establece un enlace entre padre e hijo. Cuando este paso finaliza, todos los nodos de la pirámide están enlazados con los nodos de la base.
- Selección del nivel de la pirámide más adecuado para trabajar. El nivel seleccionado será el de menor número de nodos de la pirámide que cumpla que no haya nodos con celdas de valores de probabilidad de ocupación muy distintos. Los nodos de este nivel, así como las relaciones espaciales entre ellos, constituirán el mapa topológico.

Un ejemplo de creación de este mapa se puede apreciar en la Fig. 11. En dicha figura se observa como el algoritmo de obstacle enhancement (Fig. 11.b) filtra, ligeramente, el mapa probabilístico geométrico obtenido del entorno. Una vez se tiene este mapa filtrado, se estabiliza, usando el principio de enlace adaptativo, una estructura piramidal cuya base es dicho mapa. En este caso, el nivel de 8x8 nodos (Fig. 11.d) es válido para representar el entorno, pues no existen en él fusiones indeseadas de regiones de nivel de probabilidad de ocupación similares. La proyección sobre el mapa geométrico de las regiones asociados a estos nodos genera un grafo de conexiones o arcos de paso, representado en la Fig. 11.e. Finalmente, el mapa topológico se muestra en la Fig. 11.f. Como se puede observar, este mapa está constituido, básicamente, por los nodos del nivel elegido y los arcos que genera el conjunto de regiones en la base.

III.2. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA TOPOLÓGICO USANDO PAIC

El algoritmo de creación del mapa topológico usando PAIC consta de los siguientes pasos:

- Cálculo del mapa probabilístico y aplicación de un algoritmo de realzado de obstáculos. Este paso coincide con los dos primeros pasos del algoritmo presentado en el subapartado III.1.
- Umbralización del mapa probabilístico. Las celdas que constituyen el mapa pueden adoptar tres posibles valores: espacio libre, espacio no explorado u obstáculo. Si los valores de

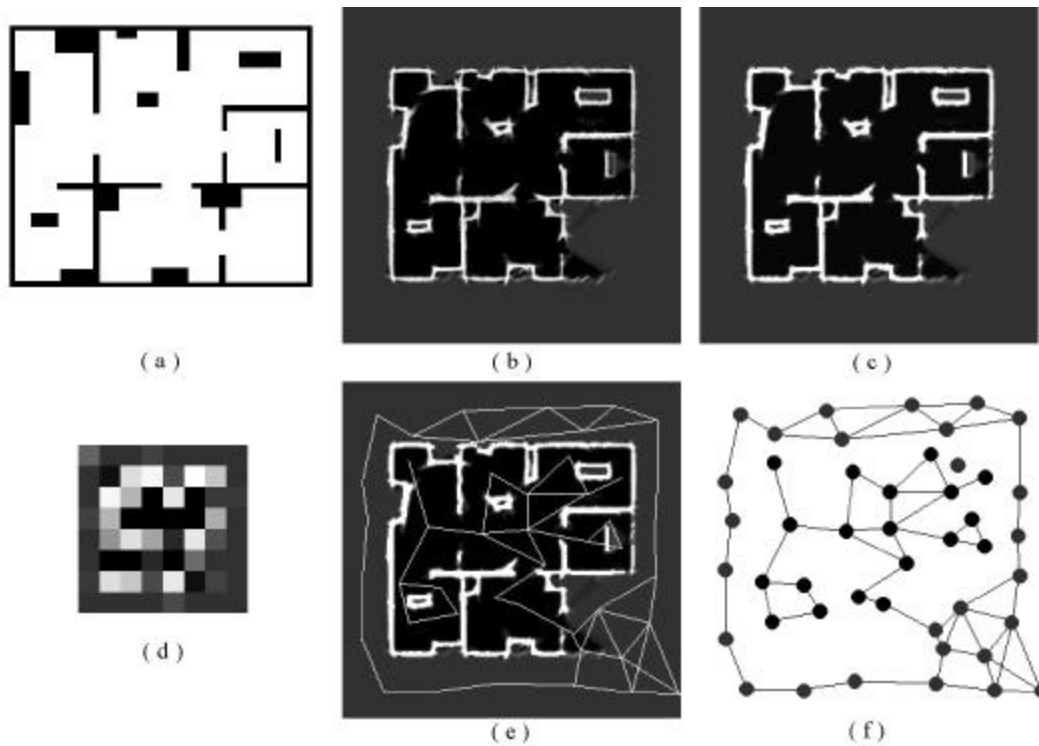


Figure 11: a) Mapa real del entorno simulado; b) mapa geométrico asociado a a) (256x256 celdas); c) aplicación del algoritmo de obstacle enhancement; d) nodos del nivel 8x8 de la pirámide estabilizada; e) grafo generado por el mapa topológico impreso sobre el geométrico; y f) representación del mapa topológico.

probabilidad de ocupación se definen en el intervalo $[0,256]$, las celdas de espacio libre tendrán probabilidades en el intervalo $[0,110]$, las no exploradas en $[110,150]$ y las asignadas a obstáculo en el intervalo $[150,256]$.

- Generación de una pirámide multinivel parcialmente enlazada. El mapa umbralizado se toma como la base de la pirámide, considerándose sus celdas con area unitaria y homogéneas. Los nodos de los niveles por encima de la base de la pirámide se construyen como una estructura 4-a-1, pero sólo se enlazan al nodo padre que generan si éste es homogéneo. De esta forma la estructura sólo queda parcialmente estabilizada. En este proceso de enlazado no entran a formar parte los nodos definidos como obstáculos, que serán despreciados a lo largo de todo el algoritmo.
- Estabilización del resto de enlaces. Se completa la estructura de enlaces en dos fases:
 - En primer lugar se buscan los nodos homogéneos cuyos vecinos, también homogéneos, si se encuentran enlazados a un nodo padre. Si la probabilidad de este nodo homogéneo es igual que el del padre y la distancia entre los centroides de las regiones

que representan en la base no supera un cierto valor, el nodo se enlaza al nodo padre de su vecino.

- Una vez completado el paso anterior para todos los niveles de la estructura, se procede a fusionar nodos vecinos que presenten valores de probabilidad iguales.
- Selección del conjunto de nodos raíz de regiones. Una vez completada la estructura de enlaces, se localizan los nodos que no están enlazados a ningún nodo de su mismo nivel o de un nivel superior. Estos nodos constituyen los nodos raíz de regiones en la base y son, por tanto, los nodos del mapa topológico.
- Obtención de los arcos de paso entre nodos. Se analizan qué regiones están conectadas, determinándose así los arcos de paso del mapa topológico. Este paso, que podría ser el más costoso en tiempo del algoritmo, se simplifica empleando la información de *bounding-box* de las regiones, y analizando, para cada dos regiones, sólo la zona de intersección de sus *bounding-boxes* correspondientes.

En la Fig. 12 se puede observar un ejemplo de construcción de mapa topológico. El algoritmo selecciona de forma no supervisada el conjunto de regiones que forman el mapa topológico, y su proyección sobre el mapa geométrico genera un grafo de conexiones o arcos de paso, representado en la Fig. 12.d. Finalmente, el mapa topológico se muestra en la Fig. 12.e. Como se puede observar, este mapa está constituido, básicamente, por los nodos y los arcos que genera el conjunto de regiones en la base.

IV. NAVEGACIÓN

En nuestro contexto, se define navegación como el guiado de un robot desde un punto de partida hasta uno de destino, evitando durante dicho trayecto cualquier obstáculo presente. Debido a que las situaciones que se pueden presentar en el mundo real son especialmente complejas, difíciles de predecir e inmediatas, la navegación debe estructurarse como un conjunto de procesos, deliberados y reactivos, que operen en paralelo, oponiéndose así al tradicional secuenciamiento en serie de los algoritmos clásicos de inteligencia artificial. Para conseguir este paralelismo, se pueden emplear dos planificadores que trabajen a distintos niveles. Así, un planificador global busca el camino a alto nivel, usando una representación del entorno, de forma rápida y sin preocuparse de su posterior seguimiento. Por otro lado, un planificador local se encarga de que el robot vaya alcanzando correctamente determinados puntos del camino, reaccionando en

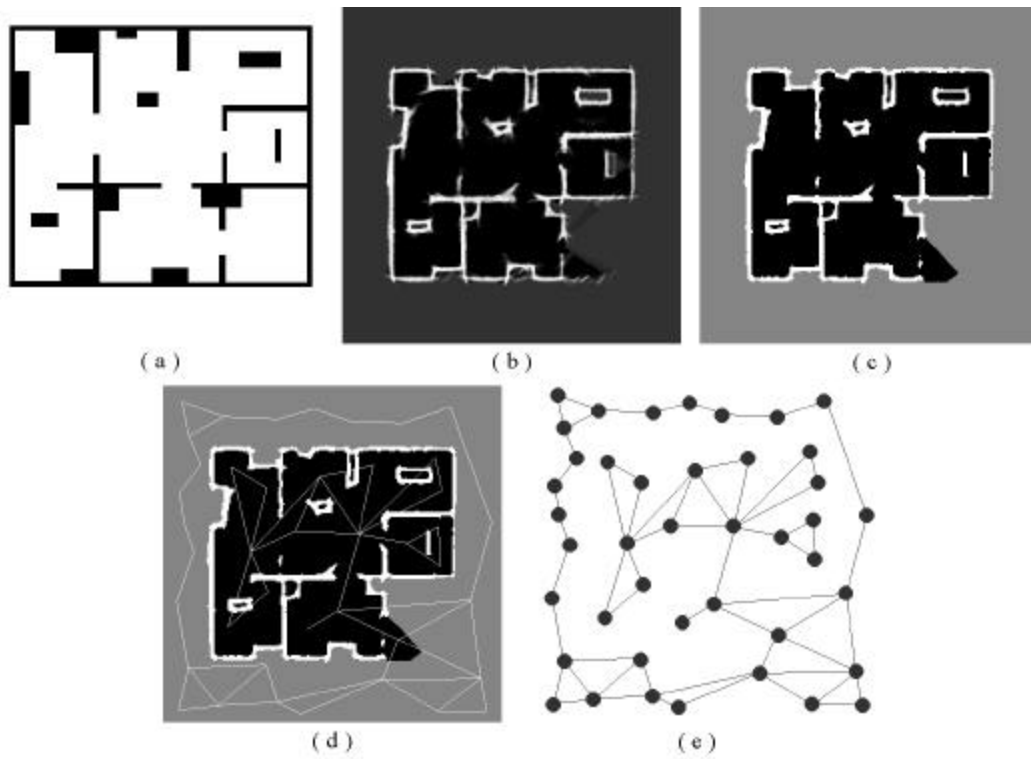


Figure 12: a) Mapa real del entorno simulado; b) mapa geométrico asociado a a) (256x256 celdas); c) aplicación del algoritmo de *obstacle enhancement* y del proceso de umbralización; d) grafo generado por el mapa topológico impreso sobre el geométrico; y e) representación del mapa topológico.

función de las lecturas que se vayan adquiriendo de los sensores. En este apartado se analiza el diseño de un planificador global, válido para las dos estructuras de datos propuestas en el apartado II, pues se aplica directamente sobre el mapa topológico creado, que trabaja en dos fases: primero selecciona a alto nivel los nodos del mapa topológico por los que debe pasar la ruta y, posteriormente, emplea el método de los campos de potencial [3] para detallar la ruta a seguir.

IV.1. PRIMERA ETAPA DEL PLANIFICADOR GLOBAL

El cálculo de los nodos del mapa topológico por los que pasará el camino puede emplear cualquiera de los algoritmos de *path planning* presentes en la literatura. En este trabajo se emplearán los algoritmos de Dijkstra [8] y el algoritmo A* [17], que son suficientemente conocidos y representativos. La principal diferencia entre estos algoritmos son que mientras que el primero de ellos proporciona caminos óptimos, el segundo se basa en un método heurístico que no garantiza la mejor solución, pero que obtiene la solución en un tiempo mucho más reducido.

A la hora de encontrar el conjunto de nodos del mapa topológico que hay que visitar para describir una determinada trayectoria, habrá que tener en cuenta que el mapa topológico creado presenta dos importantes características:

- Al contrario que en la mayoría de los métodos [1] [7] [24], la base de partida no es un mapa binario, lo que permite incluir información de probabilidad en la distancia internodo. Incluso el método basado en PAIC mantiene dicha información en los nodos de la base sin que esto aumente el coste computacional (aunque si supone un coste en memoria de almacenamiento). Dado que esta información esta disponible, el algoritmo de *path planning* no sólo buscará el camino más corto, sino también el más fácil de seguir. Además, esto permite solucionar el problema de introducir en el mapa información sobre regiones parcial o deficientemente exploradas [27], que obviamente serán más fácilmente atravesables que los obstáculos, pero no tanto como las zonas libres. En la Fig. 13.a se muestra el mapa probabilístico obtenido en un determinado entorno. En su representación topológica, Fig. 13.d, se puede observar la existencia de nodos asociados a regiones parcial o totalmente no

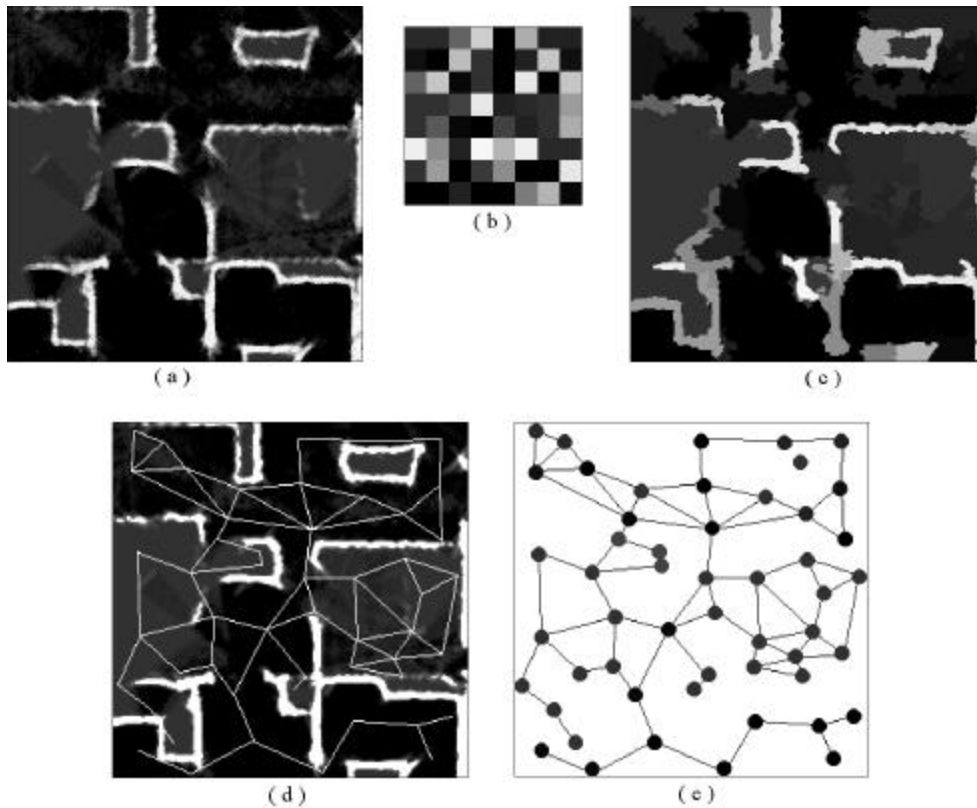


Figure 13: a) Mapa parcialmente explorado; b) nodos del mapa topológico; c) mapa de regiones definido por el mapa topológico; d) grafo topológico impreso sobre el mapa a); y e) mapa topológico.

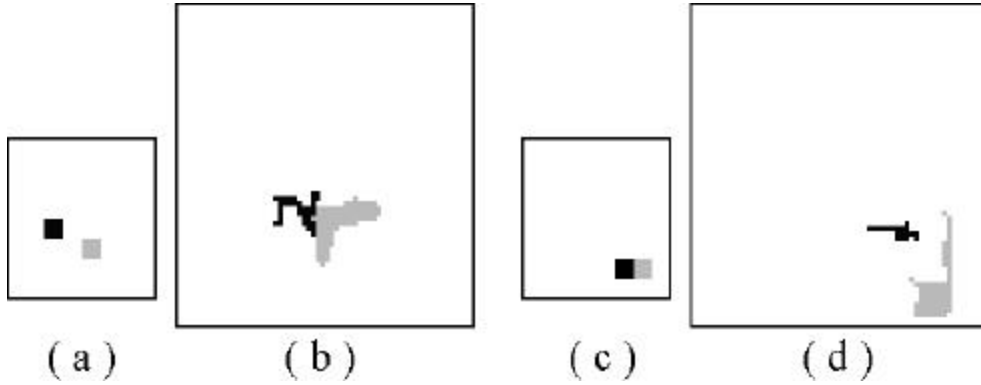


Figure 14: Algoritmo PAPD: a) Nodos separados en el mapa topológico; b) regiones enlazadas a los nodos en a); c) nodos en contacto en el mapa topológico; y d) regiones enlazadas a los nodos en c).

exploradas (Fig. 13.c). Como se aprecia en las Figs. 13.d y 13.e, estos nodos permiten al agente trazar caminos incluso en situaciones de no exploración total del entorno, así como el desarrollo de estrategias de exploración deliberadas.

- El conjunto de nodos seleccionados (al elegir un determinado nivel o al seleccionar los nodos raíz) constituye una representación topológica del entorno y, por tanto, en él no se definen conectividades entre nodos por proximidad espacial, sino que éstas vendrán definidas desde la base o mapa probabilístico del entorno. Debido a esto, nodos que están en contacto físico en su nivel de la pirámide no tienen que estar enlazados a regiones conectadas en la base (Figs. 14.c y 14.d). De igual forma, regiones en contacto en la base no tienen porqué corresponderse con nodos raíz físicamente en contacto (Figs. 14.a y 14.b). Por ello, la distancia entre dos nodos será de valor infinito si: i) las celdas de las regiones enlazadas a estos nodos no están en contacto en la base; ii) cualquiera de los nodos no está conectado a una región en la base; y iii) alguno de los nodos se corresponde a un obstáculo.

Atendiendo a estos dos factores, y siempre que su valor no sea infinito, la distancia internodo empleada se define como:

$$D[i][j] = \frac{\sqrt{(X_i - X_j)^2(Y_i - Y_j)^2}}{\max D[i_m][j_m] \forall i_m, j_m} \left(1 + \frac{\max(P_j, P_i)}{\max P_{i_m} \forall i_m}\right) \quad (2)$$

siendo (X_i, Y_i) y (X_j, Y_j) las coordenadas de los centroides de las regiones en la base enlazadas a los nodos i y j del nivel L , y (P_i, P_j) sus valores de probabilidad respectivos. Como se ha comentado, la ventaja de este método es que no sólo se busca el camino más corto, sino que se

favorece la búsqueda del camino más fácil de seguir, ya que se pondera más favorablemente el espacio libre que el no explorado.

Para calcular el camino en el mapa topológico, lo primero que se debe hacer es determinar a que nodos del mapa se encuentran conectados las celdas de inicio y fin, que se ubican en el mapa métrico (base). Ya que los enlaces estan definidos con anterioridad, este paso resulta inmediato en cualquiera de las dos estructuras propuestas. Una vez realizada esta operación, la búsqueda del camino se reduce a aplicar el algoritmo de cálculo de camino (Dijkstra o A^* , en este caso) al vector de nodos que forman el mapa topológico. La conectividad entre nodos no vendrá determinada por la ubicación física relativa de éstos en la estructura 3D, sino que se definirá usando los arcos calculados. Una vez aplicado el algoritmo de búsqueda de camino, la salida será un conjunto de nodos de paso, que si se propagan a la base determinan una región de paso en lugar de un auténtico camino de paso. Esta región será la entrada de la siguiente etapa del planificador.

En el apartado V se presentan algunos resultados de tiempo y caminos asociados, que permiten comparar la aplicación del algoritmo de Dijkstra o del A^* como paso central de esta primera etapa.

IV.2. SEGUNDA ETAPA DEL PLANIFICADOR

La segunda etapa del clasificador aplica el algoritmo de campos de potencial mejorado sobre la región que determinan los nodos del mapa topológico que forman la ruta a seguir. Este algoritmo consta de tres etapas básicas:

- Se calcula el esqueleto de esta región.
- Se genera la función de campo de potencial numérico, $V(x, y)$, sobre dicho esqueleto, S .
- Se genera el campo de potencial numérico, $V(x, y)$, del resto de la región.
- Se emplea un algoritmo A^* para calcular el camino sobre el potencial definido.

A continuación se analizan cada una de estas etapas independientemente.

Cálculo del esqueleto de la región

Para calcular el esqueleto de la región se crea inicialmente el mapa de distancias a obstáculos. El esqueleto de la región será la zona donde las ondas ascendentes de distancia a obstáculo se

encuentren. Por lo tanto, el primer paso será calcular este mapa de distancias a obstáculos, $d(x, y)$, para lo cual se puede emplear el siguiente algoritmo:

1. Se inicializa el valor de $d(x, y)$ de los puntos de la región al valor infinito.
2. Se localizan los puntos de la región que estén en contacto con un obstáculo. Estos puntos se guardan en un vector L_0 y su valor $d(x, y)$ se pone a cero. Se fija la variable i a valor cero.
3. Para cada valor en L_i :
 - Se inicializa el vector L_{i+1} .
 - Los puntos de la región que: i) estén en contacto con cualquiera de los valores de L_i , y ii) su valor de $d(x, y)$ sea infinito, se introducen en L_{i+1} , fijándose su valor $d(x, y)$ al valor $i + 1$.
4. Se aumenta i en una unidad, y se vuelve al paso 3, a no ser que L_i no tenga elementos.

En la Fig. 15.b se muestra el mapa de distancias a obstáculos obtenido a partir de la región de la Fig. 15.a. Para obtener de forma inmediata el esqueleto a partir de este campo de potencial, se debe añadir a cada punto de la región información sobre el origen de la onda que lo alcanzó y cambió su valor de $d(x, y)$. Si en cada punto de la región se define dicho origen por $O(x, y)$, el algoritmo para calcular el esqueleto sería:

1. El valor de $O(x, y)$ de todo punto presente en L_0 se fija a (x, y) .
2. Cada vez que se introduzca un punto en cualquier vector L_i , los puntos vecinos a éstos, (x_v, y_v) , se actualizan:
 - (a) Si $d(x_v, y_v)$ es infinito, se fija $O(x_v, y_v) = O(x, y)$.
 - (b) En otro caso, si la distancia euclídea entre $O(x_v, y_v)$ y $O(x, y)$ es mayor que un umbral T_{skel} , y (x, y) no pertenece al esqueleto S , se incluye (x_v, y_v) en él.

El esqueleto asociado a la región de la Fig. 15.a se muestra en la Fig. 15.c. Finalmente, se conectarán los puntos de inicio y fin al esqueleto, para lo cual se puede seguir el propio gradiente definido por el mapa de distancias.

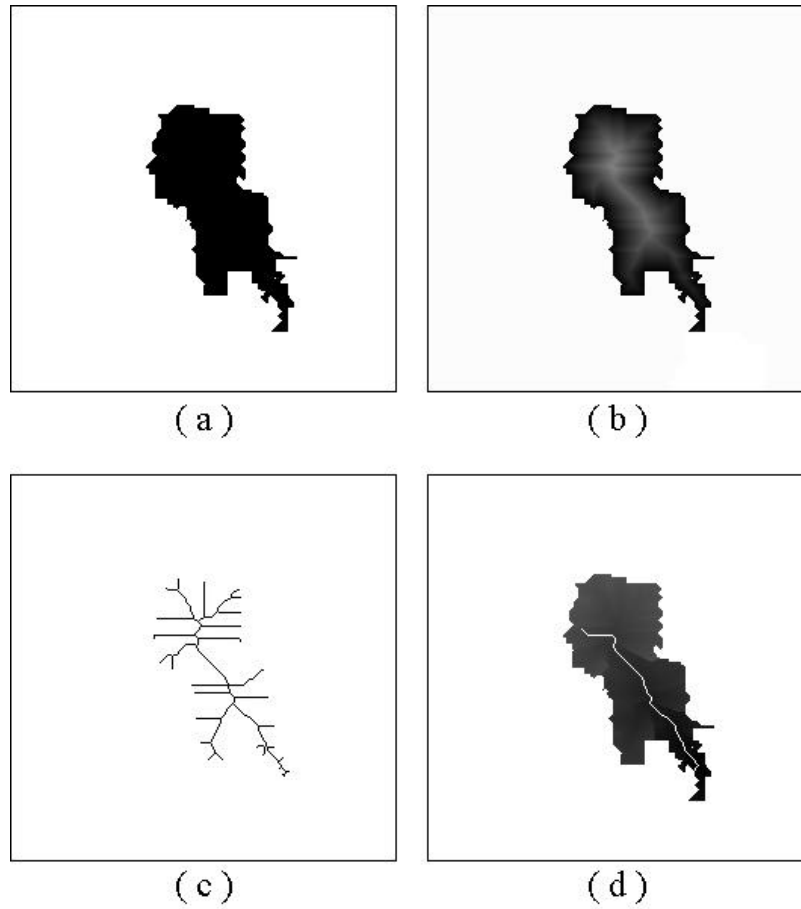


Figure 15: a) Región de espacio libre (en negro); b) mapa de distancias, $d(x, y)$; c) esqueleto, S ; y d) campo de potencial, $V(x, y)$ y camino a seguir (en blanco).

Cálculo del campo de potencial

El campo de potencial se calcula inicialmente sólo sobre el esqueleto. Para ello se usa la técnica de propagación de frente de onda, cuyo algoritmo sería, en este caso:

1. Se hace el campo de potencial en el punto de destino, $V(x_{fin}, y_{fin})$, igual a cero.
2. Se crea un vector Q , en el cual se introduce el valor (x_{fin}, y_{fin}) .
3. Se crea un vector L_0 .
4. Mientras que el vector Q no esté vacío:
 - Se extrae el primer elemento del vector Q , (x_Q, y_Q) y se inserta al final de L_0 .
 - Para cada vecino (x_v, y_v) de (x_Q, y_Q) que pertenezca al esqueleto S y que no haya sido marcado, se hace $V(x_v, y_v) = V(x_Q, y_Q) + 1$, y se inserta (x_Q, y_Q) en Q .

Para extender el potencial por el resto de la región, se parte del campo de potencial en el esqueleto. El algoritmo empleado es el de expansión de un campo de potencial básico, pero el vector de partida del potencial será el campo en el esqueleto. Los pasos serán:

1. Se inicia un vector L_0 al valor de S . Se hace i igual a cero.
2. Mientras que el vector L_i no esté vacío:
 - Se inicializa L_{i+1} como un vector vacío.
 - Para cada punto, (x, y) , en L_i :
 - Se actualiza el campo de potencial de todo vecino no marcado de (x, y) , (x_v, y_v) , haciendo $V(x_v, y_v) = V(x, y) + 1$, y se inserta (x_v, y_v) en L_{i+1} .
 - Se incrementa i , y se vuelve al punto 2.

En la Fig. 15.d muestra el campo de potencial, $V(x, y)$, generado en la región de la Fig. 15.a, a partir del esqueleto de la Fig. 15.c. En esta figura se muestra también el camino finalmente calculado, que se encontrará simplemente aplicando un algoritmo A* sobre el campo de potencial generado. En caso de que se estime necesario, y dado que los caminos sin cambios bruscos de curvatura son más fáciles de seguir, se puede aplicar un algoritmo de postprocesado que elimina estos cambios bruscos, en caso de que existan [16].

V. RESULTADOS

En esta sección se presentan algunos resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo tanto en entornos simulados como usando el agente autónomo móvil Nomad 200. En ambos casos, el equipo empleado para el procesado es un Pentium PC 100 MHz. con 32 Mb RAM.

La Fig. 16 muestra el entorno real en el que se llevaran a cabo las distintas pruebas. Como puede observarse, la planta del entorno presenta un aspecto irregular, con unas dimensiones máximas de 17.2x8.2 m., en el cual se pueden encontrar, entre otras superficies, paredes metálicas de armarios, cajas de cartón y madera o columnas. La respuesta fusionada de los sensores sonar e infrarrojos actualizan la base de la pirámide, que tiene unas dimensiones de 256x256 celdas, con un tamaño de celda de 5x5 cm. (Fig. 16.c). En la Fig. 16.d se muestran los nodos del mapa topológico obtenido usando la estructura PAPD, mientras que las regiones enlazadas a estos nodos se presentan en la Fig. 16.e. Puede observarse como el mapa topológico refleja

correctamente las irregularidades del entorno, representando correctamente los detalles más finos del mapa geométrico empleado, pese a emplear tan sólo 8x8 nodos.

En la Fig. 17.a se muestra el grafo que genera el mapa topológico presentado en la Fig. 16.e. El hecho de que la partición del entorno sea lo más compacta posible permite que la complejidad de dicho grafo sea baja, estableciendo un conjunto de líneas de paso relativamente pequeño. Por otro lado, si se observa el grafo obtenido, se puede ver que las regiones no exploradas mantienen su propio grafo. Esto va a resultar sumamente práctico cuando las condiciones del entorno sean dinámicas, pues acciones como la apertura de una puerta o un cambio de obstáculos no impiden que el agente siga actuando de forma correcta, apoyándose, si es necesario, en esas regiones no exploradas. Además, este grafo permite al agente adoptar acciones de exploración inteligente, moviéndose, y de esta forma analizando, por esas regiones no exploradas.

El uso del mapa topológico piramidal para el cálculo de caminos está justificado cuando el entorno sea lo suficientemente grande como para que la carga de proceso añadida al algoritmo por la obtención de dicho mapa sea despreciable frente al ahorro en tiempo que supone el trabajar en dicho mapa frente a hacerlo en el mapa geométrico. Así, en la Fig. 17.b se muestra una aplicación del algoritmo de búsqueda de camino mínimo -en este caso, el algoritmo A*- en el entorno de prueba. Los tiempos empleados en la búsqueda de dicho camino se muestran en la Tabla 1. En

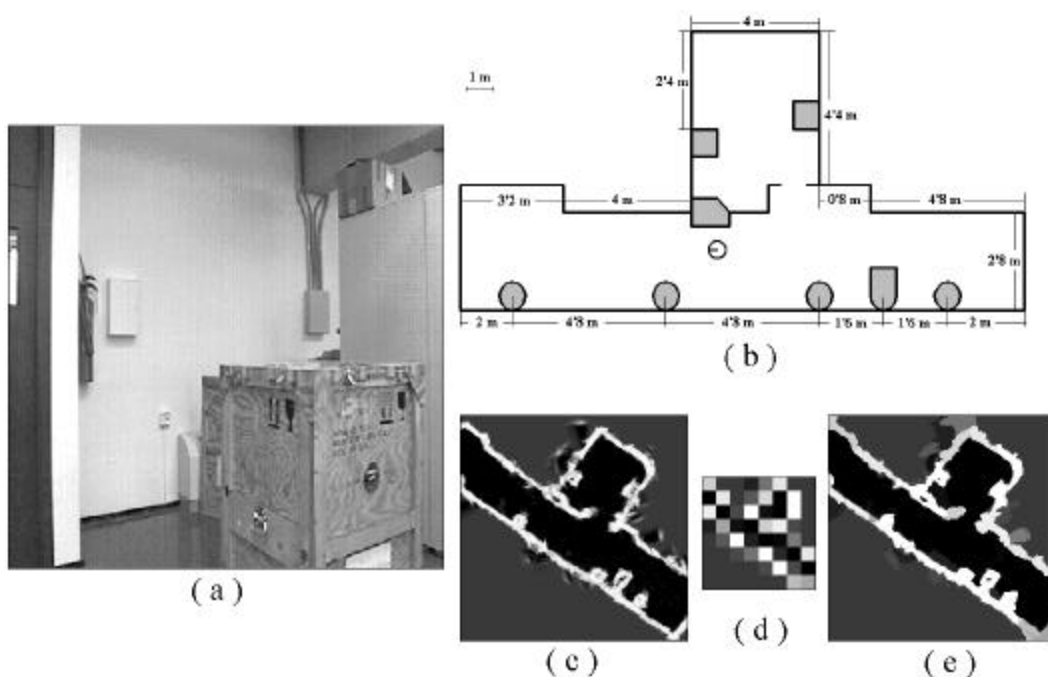


Figure 16: a) Vista del entorno real; b) ; c) mapa probabilístico del entorno (256x256 celdas); d) nodos del mapa topológico; y e) regiones asociadas a los nodos del mapa topológico.

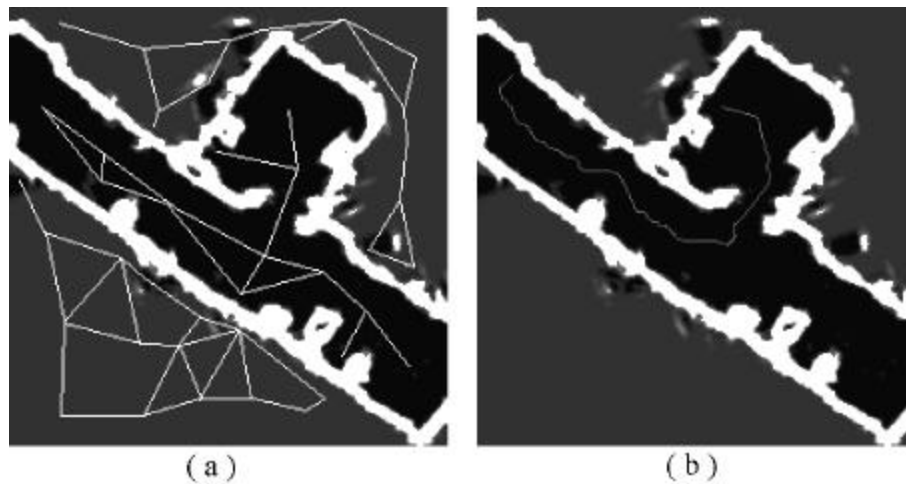


Figure 17: a) Grafo generado por el mapa topológico; y b) camino trazado entre los puntos (20,40) y (143,53).

dicha Tabla se observa como el tiempo empleado en la aplicación del algoritmo de path planning (A^*) es bastante reducido (0.18 s.), por lo que si se trabaja con entornos estáticos y plenamente explorados, donde no habría que actualizar el mapa topológico, el tiempo de obtención del camino final sería bastante reducido ($0.18 + 0.10$ s), aún trabajando en entornos de tamaño elevado. Ya que el tiempo de postprocessing (0.77 s) se emplea en obtener los valores que se pasarían al planificador local, su gasto corre en paralelo con la ejecución de dicho planificador.

La Fig. 18 presenta los caminos resultantes al aplicar varios algoritmos de búsqueda de camino sobre un mapa obtenido de un entorno simulado, inicialmente dividido en 512×512 celdas. Dicho entorno presenta un área de 235.9 m^2 y un tamaño de celda de 9 cm^2 . Los resultados en tiempos y desviación respecto al camino óptimo, que ha sido calculado mediante el algoritmo de Dijkstra sobre el mapa geométrico, aparecen en la Tabla 2. Recordar que el tiempo que aparece en dicha Tabla refleja no sólo el empleado en la búsqueda del camino, sino también el que se emplea en generar el mapa topológico.

En todos los ejemplos expuestos hasta este momento, la estructura de datos empleada ha sido la

Table 1: Tiempos empleados en el cálculo de caminos (PAPD).

<i>Obstacle enhancement</i>	0.38 s.
Inicialización/Estabilización Pirámide	4.52 s.
Etapas 1 del planificador: Algoritmo A^*	0.18 s.
Etapas 2 del planificador	0.10 s.
Postprocesado	0.77 s.
Tiempo total	5.95 s.

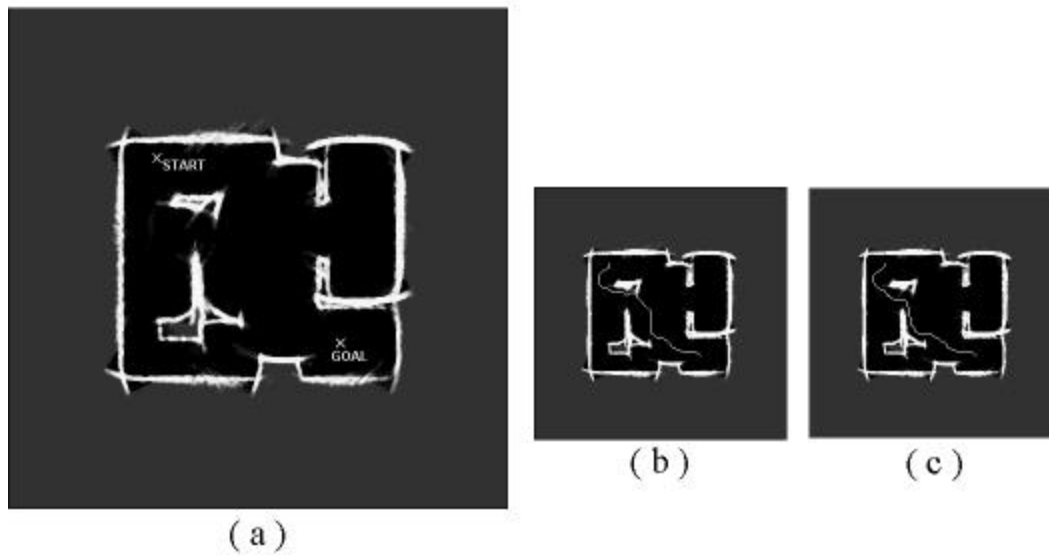


Figure 18: Comparativa de distintos algoritmos de path planning para un entorno de 512x512 celdas: a) mapa de entorno simulado; b) algoritmo de Dijkstra en el mapa topológico (16x16 nodos) y c) algoritmo A* en el mapa topológico (16x16 nodos).

pirámide de enlace adaptativa ponderada por distancia. Como se puede observar en la Tabla 1, el máximo consumo en tiempo es en la inicialización y estabilización de la estructura piramidal. Si se emplea la estructura piramidal de enlace adaptativo internamente conectada, estos tiempos se reducen drásticamente. En la Tabla 3 se muestran los tiempos asociados al cálculo de caminos usando esta segunda estructura de datos. Si se comparan estos datos con los obtenidos usando la estructura PAPD se aprecia como el tiempo se ha reducido a la mitad.

VI. CONCLUSIONES

Básicamente, el método de construcción de mapas del entorno propuesto trata de compaginar la calidad de la representación con la eficiencia en el empleo y aprendizaje de la misma. Para ello, usa un mapa tridimensional, en lugar del tradicional mapa bidimensional, que permite relacionar

Table 2: Tiempos empleados en el cálculo de caminos por diversos algoritmos (PADPD).

Imagen	Figura 18.a		
Algoritmo	Dijkstra	Dijkstra jerárquico	A* jerárquico
Tiempo	2843.17 s.	377.43 s.	28.4 s.
Desv. óptimo	–	4.07 %	4.97 %

cada nodo del mapa topológico con una región del entorno que puede tener unas dimensiones, forma o estructura interna aleatorias, pero que se caracterizará simplemente por estar conectada y por presentar un nivel de probabilidad homogéneo en toda su superficie (*irregular partitioning*). Las estructuras piramidales actualmente empleadas presentan una serie de niveles que tienen un número de nodos constante, y el mapa topológico del entorno se escogerá como uno de estos niveles (estructura PAPD) o usando información de todos ellos (estructura PAIC). De cualquier forma, el tamaño del mapa será siempre muy inferior al que presenta la base. Estas estructuras presentan, frente a otras topologías bidimensionales como el *variable-resolution partitioning* o el *framed-quadtrees*, las ventajas de no depender de la complejidad de la escena. Así, aunque éstas justifican que sólo presentan alta resolución en las fronteras con los obstáculos, el área de alta resolución depende de la orientación relativa de los propios obstáculos.

La estructura PAIC resuelve uno de los principales problemas que planteaba la estructura PAPD, y permite seleccionar, en toda la estructura, aquellos nodos que son raíces de un conjunto de celdas homogéneas, sin importar el nivel en el que se encuentre este nodo. De esta forma, las regiones de mayor tamaño se agrupan en nodos de niveles superiores, y no se pierden las regiones pequeñas, que se asociarían a nodos pertenecientes a niveles más cercanos a la base de la pirámide. De cualquier forma, siempre hay que limitar la dispersión espacial de los puntos que forman cada región en la base, pues se corre el riesgo de tener una única región asociada a todo el espacio libre. Para ello se emplea la variable *DistMax*, que limita la anchura máxima de las regiones. La estructura PAIC presenta también la ventaja de generar los distintos niveles de la pirámide y, con ello, el mapa topológico, sin la inclusión de las celdas asociadas a obstáculos. De esta forma, estas celdas, que generan nodos que posteriormente no son útiles para los algoritmos que usan el mapa, no ocupan memoria útil ni distorsionan la información del resto de nodos.

References

- [1] Arleo, A., Millán, J.R. and Floreano, D., "Efficient learning of variable-resolution cognitive maps for autonomous indoor navigation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **15**

Table 3: Tiempos empleados en el cálculo de caminos (PAIC).

<i>Obstacle enhancement</i>	0.50 s.
Inicialización/Estabilización Pirámide	0.51 s.
Etapas 1 del planificador: Algoritmo A*	0.22 s.
Etapas 2 del planificador	0.10 s.
Postprocesado	0.77 s.
Tiempo total	2.10 s.

- (6), pp. 990-1000, 1999.
- [2] Arrebola, F., *Sistema de visión basado en imágenes multirresolución de fovea desplazable*, Tesis Doctoral, Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga, Málaga-España, 1998.
 - [3] Barraquand, J., Langlois, B., and Latombe, J.C., "Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **22** (2), pp. 224-241, 1992.
 - [4] Barraquand, J., Kavraki, L., Latombe, J.C., Li, T.Y., Motwani, R. and Raghavan, P., "A random sampling scheme for path planning", *Int. Journal of Robotics Research*, **16** (6), pp. 759-774, 1997.
 - [5] Burt, P., Hong, T. and Rosenfeld, A., "Image smoothing based on neighbor linking", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, **11** (12), pp. 769-780, 1981.
 - [6] Burt, P., Hong, T. and Rosenfeld, A., "Segmentation and estimation on image region properties through cooperative hierarchical computation", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, **11** (12), pp. 802-809, 1981.
 - [7] Chen, D., Szczerba, R. and Uhran, J., "A framed-quadtrees approach for determining euclidean shortest paths in a 2D environment", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **13** (5), pp. 668-680, 1997.
 - [8] Dijkstra, E., "A note on two problems in connexion with graphs", *Numerische math*, **1**, pp. 269-271, 1959.
 - [9] Elfes, A., "Sonar based real world mapping and navigation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **3**, ??-??, 1987.
 - [10] Garey, M.R. and Johnson, D.S., *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*, W.H. Freeman & Co. : New York, 1979.
 - [11] Fox, D., *Markov localization: A probabilistic framework for mobile robot localization and navigation*, Doctoral Thesis, Institute of Computer Science III, University of Bonn, Germany, 1998.
 - [12] Hsu D., Kavraki, L.E., Latombe, J.C., Motwani, R. and Sorkin, S., "On finding narrow passages with probabilistic roadmap planners". In *Robotics: The Algorithmic Perspective, Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics*, P.K. Agarwal, L.E. Kavraki, and M.T. Mason (eds.), A K Peters, Natick, MA, pp. 141-153, 1998.

- [13] Kuipers, B.J. and Byun, Y.T., "A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representation", *J. Robot. Auton. Syst.*, **8**, pp. 47-63, 1991.
- [14] Lu, F. and Millios, E., "Globally consistent range scan alignment for environment mapping", *Autonomous Robots*, **4**, pp. 333-349, 1997.
- [15] Moravec, H. and Elfes, A., "High resolution maps from wide angle sonar", *Proc. IEEE Conf. Robot. Automat. (ICRA'85)*, ??-??, pp. 116-121, 1985.
- [16] Pérez, E.J., Poncela, A., Bandera, A. and Urdiales, C., "A curvature-based path tracking method on probabilistic grids for autonomous mobile robots", *accepted to SIRS'00*
- [17] Russell, S. and Norving, P., *Artificial Intelligence: A modern approach*, Prentice Hall: ??, 1995.
- [18] Samet, H., "An overview of quadtrees, octrees, and related hierarchical data structures", *NATO ASI Series*, Vol. F40, pp. 51-68, 1985.
- [19] Shatkay, H. and Kaelbling, L., "Learning topological maps with weak local odometric information", *Proc. of IJCAI-97*, ??-??, ??-??, 1997.
- [20] Thrun, S. y Bücken, A., "Learning maps for indoor mobile robot navigation", TR CMU-CS-96-121, Carnegie Mellon University, USA, 1996.
- [21] Thrun, S. y Bücken, A., "Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation", *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'96)*, pp. 944-950, Portland-USA, 1996.
- [22] Thrun, S., Gutmann, J., Fox, D., Burgard, W. and Kuipers, B., "Integrating topological and metric maps for mobile robot navigation: a statistical approach", ?????, 1998.
- [23] Thrun, S., "Learning maps for indoor mobile robot navigation", *Artif. Intell.*, **99**, pp. 21-71, 1998.
- [24] Yahja, A., Stenz, A., Singh, S. and Brumitt, B., "Framed-quadtrees path planning for mobile robots operating in sparse environments", *Proc. IEEE Conf. Robot. Automat. (ICRA'98)*, Leuven-Belgium, pp. ??-??, 1998.
- [25] Urdiales, C., Bandera, A., Arrebola, F. and Sandoval, F., "Multi-level path planning algorithm for autonomous robots", *Electronic Letters*, **2** (34), pp. 223-224, 1998.

- [26] Urdiales, C., *Arquitectura de control de movimiento y exploración para un agente autónomo móvil*, Tesis Doctoral, Dpto. Tecnología Electrónica, ETSI Telecomunicación, Universidad de Málaga, España, 1999.
- [27] Zelinsky, A., "A mobile robot navigation exploration algorithm", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **8**, pp. 707-717, 1992.