

Mapa Métrico Híbrido para aplicaciones de Navegación Autónoma

†Favio Masson, ‡Jose Guivant, ‡Juan Nieto, ‡Eduardo Nebot

†*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional del Sur, Argentina*

E-mail: fmasson@uns.edu.ar

‡*Australian Centre For Field Robotics, University of Sydney, Australia*

E-mail: jguivant/j.nieto/nebot@acfr.usyd.edu.au

Resumen— En este trabajo se presenta un nuevo paradigma en representación del mapa que se denomina Mapa Métrico Híbrido. Esta representación permite resolver en forma consistente tanto la navegación autónoma como la incorporación de todo otro tipo de información útil para aplicaciones en una variado tipo de aplicaciones. Aquí se analiza su potencial en especial para aplicaciones de agricultura de precisión.

Palabras clave— Navegación Autónoma, SLAM, Agricultura de Precisión

I. Introducción

La navegación autónoma confiable y segura en ambientes externos altamente no estructurados se revela como un problema formidable en términos de sensado, percepción y algoritmos de navegación, y esto se puede intuir y analizar de la gran cantidad de publicaciones que han tratado este problema durante los últimos años y con una gran diversidad de ópticas (Fox et al., 1999; Sukkariéh et al., 1999; Guivant and E.Nebot, 2002; Leonard et al., 2001; Castellanos et al., 1999; Masson et al., 2002; Wang and Thorpe, 2002; Neira et al., 1999). Y aunque la cuestión de la localización dado el mapa del ambiente es un problema del cual su solución se conoce en esencia y de hecho se aplica en varios problemas industriales (Durrant-Whyte, 1996), los ambientes externos presentan un desafío adicional debido a la falta de sensores y algoritmos de percepción que puedan trabajar en todos los ambientes bajo todas las condiciones de intemperie.

Por otro lado un algoritmo de navegación y construcción simultánea del mapa (SLAM en inglés) que se ejecuta sobre grandes distancias y cerrando un lazo (Masson et al., 2002), retornando al punto de inicio, se ha visto que puede significar una causa potencial de problemas. Se parte de un punto con una percepción del ambiente que incorpora ciertos rasgos del ambiente como mojones en un mapa y esta percepción puede ser totalmente distinta de la que se tenga cuando se retorna a ese punto, por ejemplo por el punto de vista desde donde se percibe el ambiente que puede ser opuesto al de inicio cuando ese rasgo fue detectado.

Algunas representaciones como las basadas en rasgos generalizados representan una alternativa que puede ser confiable (Majumder et al., 2000).

A pesar de todos sus inconvenientes los algoritmos de navegación y construcción del mapa en forma simultánea presentan una solución a la búsqueda de un sistema que sea realmente autónomo y para lograr en estos una gran integridad hay tres cuestiones que deben ser solucionadas. Una es *la representación del mapa*. Una representación óptima del ambiente en un universo dinámico es uno de los desafíos mas significativos y sobresalientes.

Una segunda cuestión es *la consistencia* del proceso de la localización del robot y de la construcción del mapa. En ambientes generales y grandes un algoritmo de SLAM puede ser propenso a estimaciones con grandes incertidumbres haciendo que filtros basados en linealizaciones no sean apropiados para el proceso de filtrado. En este caso el filtro usualmente generará resultados sobre confidentes y no consistentes.

Finalmente en estimadores estocásticos basados en el EKF, la medida necesita ser asociada con los estados que están siendo observados. Este problema es referido como el proceso de *asociación de datos* y es una de las cuestiones más difíciles en aplicaciones de SLAM. La asociación exitosa involucra la convergencia de la medida correcta con los estados correctos detectando y rechazando medidas espurias.

Estos tres temas toman especial relevancia en todas aquellas aplicaciones donde el ambiente de trabajo es externo, de grandes dimensiones y donde no existe una preparación previa del mismo, como lo es en aplicaciones de agricultura de precisión por ejemplo. Tradicionalmente, las soluciones de robótica de campo a esta aplicación se basan en el uso casi exclusivo de GPS y sensores de la dinámica del vehículo (Stafford, 1998). Sin embargo estas carecen de confiabilidad si se desea que el móvil sea realmente autónomo. El multicamino en GPS, esto es las diferentes rutas que toma la señal para llegar del satélite al receptor incluso desde el mismo satélite, introduce un error a baja frecuencia que perjudica al filtro de Kalman como estimador de la posición y aunque el sistema parece que esta reportando correctamente la información de posición comienza a producir un error que lleva las precisiones teóricas de

un metro a 3 o hasta 5 metros (Nebot et al., 1998). Además de esto, el inconveniente de la disponibilidad de satélites implica que de tener una precisión de un metro se pasa a no tener nada por la falta de línea de vista a los satélites. Estas situaciones en navegación las 24 horas afectan dramáticamente la calidad real del sensor.

En lo que sigue se introduce el problema de la agricultura de precisión y su aceptación en el país como herramienta de explotación agrícola. Luego se presentan un nuevo paradigma en la representación del ambiente que es el Mapa Métrico Híbrido para finalmente analizar su aplicabilidad a estas técnicas de cultivo. Se concluye con algunos resultados experimentales.

II. Agricultura de precisión

El concepto de agricultura de precisión ha sido desarrollado con el objetivo de explotar la variabilidad del suelo, de la cosecha y de todos los factores ambientales que se encuentran en todos los campos sujetos a una explotación agrícola. Usualmente en agricultura y en horticultura, los campos se asumen uniformes con respecto al uso de agroquímicos y fertilizantes. Así, se aplican tasas uniformes a lo que es en realidad un sistema altamente variable (suelo, ambiente, planta).

La implementación de la agricultura de precisión requiere de un sistema de navegación y guiado que resuelva dos cuestiones, una tiene que ver con la construcción de un mapa y sensado de variables de interés y la otra con el equipo de aplicación de lo que constituyen las entradas al cultivo, como fertilizantes y agroquímicos. El mapeo de las características de suelo, la cosecha y los factores ambientales requiere de sistemas de detección robustos y confiables. El uso de tasas variables para las entradas se basan generalmente en un mapa que proporciona señales de control al sistema de aplicación dependiendo de la posición del vehículo en el campo. Los requisitos para el sistema de localización para estos dos problemas son absolutamente diferentes en términos de la resolución de la posición, de la confiabilidad y del funcionamiento dinámico. Con respecto a la resolución requerida por ejemplo, esta depende del tipo de problema siendo del orden de las decenas de metros para aplicaciones de fertilizante o mapeos de cosechas, pero baja a menos de un metro cuando se trata de la aplicación de herbicidas por ejemplo (Lark et al., 1997).

El GPS es el sensor más utilizado en agricultura de precisión dado que permite una referencia absoluta con una resolución aceptable para la mayoría de las funciones. Sin embargo la falta de confiabilidad en la resolución de este sensor tiene serias implicaciones en los equipos de aplicación de agroquímicos que trabajan en tiempo real y con una gran dinámica ya que se basan en la variabilidad el suelo que se reconoce muy grande. Un tratamiento incorrecto con fertilizantes o herbicidas, hace totalmente inútil la utilización de la agricultura de precisión. Una mejora a sistemas

basados en GPS lo constituyen la fusión de esta información con información interna del vehículo como velocidad y orientación usando algoritmos como el filtro de Kalman.

En contraste con la resolución requerida para el mapeo de cosechas o fertilizadores de tasa variable, aparece un nuevo concepto denominado *agricultura a escala de planta* que requiere una resolución dinámica de la posición del orden de los pocos centímetros. Esta aproximación se basa en analizar sub áreas del campo en línea y tratarlas en consecuencia en lugar de levantar variables en un mapa. Esto permite una resolución mucho mayor, a nivel de la planta individual y requiere menor conocimiento a priori, excepto un estimado de la geometría o característica de las plantas. Este concepto puede extenderse desde la guía mecánica de la azada a detectar partes de las plantas, tales como la base de vástagos, para la aplicación de insecticida. Este tipo de técnica sin embargo es en general muy lenta para ser aplicada con vehículos manejados por el hombre. Se debe desarrollar por tanto un vehículo autónomo que lo resuelva (Tillett et al., 1998).

Aunque sin embargo este concepto parecería que no usa técnicas de localización absoluta o relativa dentro de la superficie explotada, a la hora de realizar la trazabilidad de los cultivos en un mercado más exigente se busca la integración de estos tratamientos con mapas con información de otros datos colectados en simultáneo o en otro momento.

En una era de preocupaciones ambientales crecientes la aplicación de agroquímicos en forma uniforme en el campo ya no es aceptable dado el impacto en las operaciones de cultivo y la necesidad de parte de los agricultores de optimizar los costos. Las tecnologías desarrolladas o por desarrollar en navegación autónoma provee una manera de, por ejemplo, aplicar con mayor precisión y optimización un herbicida incluso a nivel de planta individual. El control de las malezas, que aparecen razonablemente en zonas mas o menos estáticas del campo, incluye dos o tres aplicaciones en cada campaña de cultivo, un ahorro del 50 % en este, implicaría ahorros como para reducir significativamente los costos, justificar la inversión en estas técnicas y reducir al mínimo el impacto ambiental.

A. Agricultura de precisión en argentina

Argentina comenzó el desarrollo de la agricultura de precisión a mediados del año 1995 (Bragachini et al., 2002) y se introdujo al igual que en otros países de la mano del seguimiento y registro del rendimiento y los banderilleros basados en satélites, dos tecnologías donde los beneficios se pueden observar rápidamente.

Algunos datos que tienen que ver con la explotación agrícola en el país y sus características permiten tener una idea del potencial de la agricultura de precisión en argentina. Así, la agricultura extensiva en Argentina crece en escala año a año, lo que proporciona alta eficiencia del uso de la mano de obra y una rápida ad-

quisición de tecnología que le permite lograr un buen manejo y aprovechamiento de avances en genética, en control de plagas, enfermedades y malezas, en fertilizaciones balanceadas, en almacenaje y comercialización de los granos, etc.

Además, frente a diversos problemas como por ejemplo la extensión del monocultivo de la soja en el país, el Proyecto Agricultura de Precisión del INTA trabaja de forma muy asociada con la actividad privada, proveedores de insumos, e instituciones orientando sus esfuerzos a superarlos mediante una mayor y mejor captura de datos y mejoras en los métodos de análisis y diagnóstico.

Finalmente, en Argentina existen aproximadamente unos 600 monitores de rendimiento, 420 con GPS y es incipiente de aplicación variable de insumos lo que indica una aceptación por los agricultores de la tecnología como elemento de mejora de su producción.

De tal forma, se puede concluir que la Agricultura de Precisión en Argentina, adquiere un alto potencial de adopción, en la existencia de variabilidad natural comprobada, que justifica el trabajo orientado al manejo sitio específico del suelo y los cultivos y en el hecho de contar con herramientas e instituciones que facilitan en gran medida la realización y evaluación de ensayos a campo, haciendo factible combinar estos con el valor que la información contiene y con las operaciones normales de producción.

III. El Mapa Métrico Híbrido

Recientemente en Guivant, Nieto, Masson, and Nebot (2003) se presentan ideas embrionarias que tratan y resuelven los tres problemas presentados en la introducción a la hora de desarrollar un vehículo autónomo. Fundamentalmente se presenta una nueva forma de tratar los mapas denominada *Mapa Métrico Híbrido* que combina mapas basados en mojones con grilla de ocupación. De esta manera se logra una localización global eficiente con mojones y se permite una navegación detallada en áreas locales haciendo uso de mapas basados en grilla de ocupación.

El aspecto de la consistencia se trata a partir de un algoritmo eficiente para evaluar la información disponible en diferentes regiones del mapa que hace posible el diseño de planificación de trayectorias para mantener la incertidumbre en la pose del vehículo acotada, evitando inconsistencia en las estimaciones. Finalmente, el problema de asociación de datos se trata con el filtro de arquitectura combinada entre el EKF y un filtro de partículas.

El tratamiento híbrido del mapa permite al vehículo obtener una representación muy rica y precisa del ambiente que facilitará al vehículo realizar un control preciso de la trayectoria y tareas más exigentes tales como evitación de obstáculos y al mismo tiempo localizarse e ir armando su mapa.

Así, un conjunto de mojones pueden ser utilizados para descomponer la región cubierta por el mapa. Es-

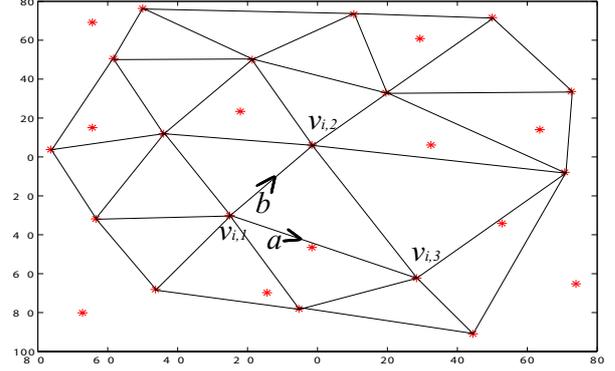


Figura 1: Ejemplo de una partición del mapa a partir de mojones seleccionados. Como se puede ver, no todos los mojones representan vertices de las regiones, algunos simplemente pertenecen a estas.

tas particiones consisten en un conjunto de regiones locales triangulares cada una definida por la posición de tres mojones que constituyen los vertices de las regiones. Cada punto del mapa global que pertenece a la región puede ser definido como una combinación lineal convexa de la posición de los tres vértices asociados con la región (figura 1),

$$\mathbf{x} = \mathbf{v}_{i,1} + \alpha \vec{a}_i + \beta \vec{b}_i \quad (1)$$

donde $\mathbf{v}_{i,j}$ es el vértice j del triángulo i , \vec{a}_i y \vec{b}_i son los vectores que forman la base del triángulo i y están formados por las direcciones del vértice 1 al 2 y del 1 al 3 respectivamente y α y β son factores que definen el punto en las coordenadas locales, mayores a cero y con $\alpha + \beta \leq 1$. Luego, cualquier función global sobre ese punto puede ser también representado como una función de la representación local de ese punto, esto es,

$$\mathbf{z} = f(\mathbf{x}) = f\left(\mathbf{v}_{i,1} + \alpha \vec{a}_i + \beta \vec{b}_i\right) = g(\alpha, \beta) \quad (2)$$

En algunas aplicaciones, se puede definir localmente una función hecha por un observador cuya posición respecto del triángulo dónde se encuentra está bien definida. Esto significa que la incertidumbre de la posición del observador será baja puesto que se expresa con respecto a un marco local. Entonces cualquier información recopilada desde esta localización y asociada a la posición se puede representar en forma precisa en el marco local. Debido a la estructura del mapa, los puntos del vértice y de cualquier punto interior del triángulo están altamente correlacionados. Así, una gran incertidumbre en los vértices no afectará la calidad de ninguna característica definida en función de la posición del observador (local). Esto es verdad si el observador mide cierta propiedad p de los puntos que están dentro del triángulo y se localiza bien con respecto a los vértices de este triángulo. Cualquier mejora en la estimación de la posición de los vértices impli-

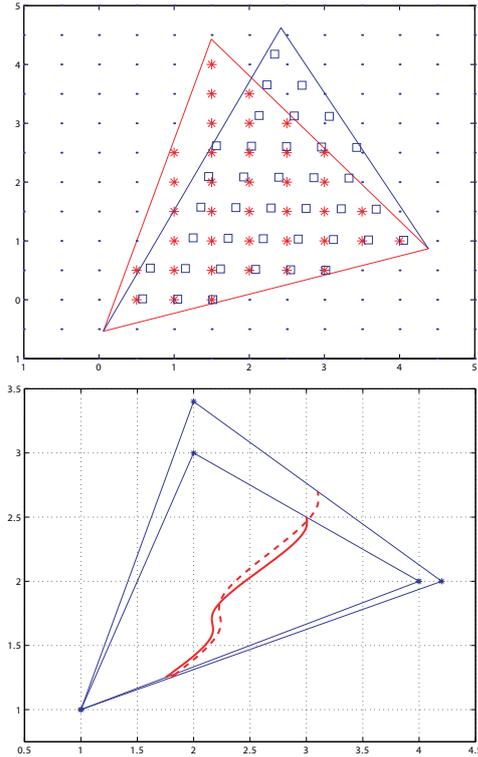


Figura 2: Efecto de la actualización en alguno de los vértices del triángulo que constituye parte del mapa. Arriba se observa como afecta a puntos de una grilla y abajo una curva.

cará una mejora en la posición donde fue medida p expresada en un marco de coordenadas global.

Un uso relevante de este concepto es cuando un vehículo autónomo está haciendo SLAM y a la vez midiendo una propiedad p en forma concurrente. La propiedad p no tiene que necesariamente ser utilizada para el proceso de la localización del móvil. Por ejemplo un vehículo puede simultáneamente realizar SLAM para navegar y a su vez medir propiedades del suelo que recorre: salinidad, humedad, ocupación del terreno. Estas características se pueden representar localmente en cada triángulo usando por ejemplo técnicas de ocupación de grillas.

Es interesante analizar qué sucede cuando se produce una actualización de la pose del vehículo y la posición de los mojoneros. Los mojoneros cercanos al vehículo obtendrán actualizaciones mayores que aquellos lejanos. Entonces puede suceder que en el proceso de estimación se generan cambios en dos de los vértices del triángulo y ninguno o muy pequeño en el tercero. El efecto de esta situación se presenta en la figura 2. Es evidente de allí que hay cambios muy pequeños en los puntos cercanos a los mojoneros que tienen una actualización también pequeña y elocuentes en los cercanos a los que cambian significativamente.

Dentro de los triángulos se puede obtener un perfil más detallado debido a la representación precisa de sus

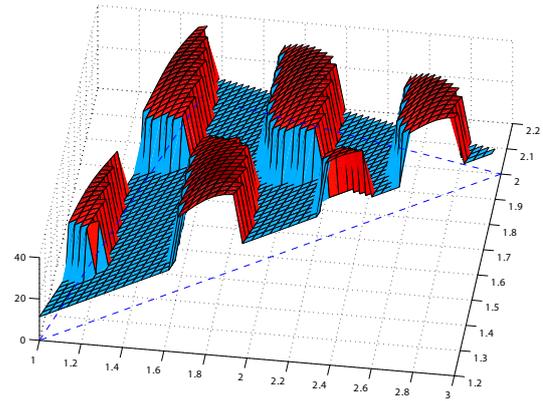


Figura 3: Propiedades definidas dentro de un triángulo. En este caso la ocupación o no del espacio. Como se puede ver en la figura se pueden definir puertas de entrada o salida a cada triángulo en función del espacio libre.

puntos independientemente de su posición absoluta. Si se establecen dentro de cada triángulo un conjunto de propiedades locales, importantes para por ejemplo el planeamiento de trayectorias, el conjunto de triángulos definirán un mapa completo que tendrá toda la información necesaria para desarrollar una estrategia. Propiedades útiles pueden ser la ocupación de espacios, el tipo de suelo, la forma de la superficie del terreno (subidas y bajadas), la probabilidad de presencia de humanos o animales u otro objeto móvil que además pueden ser función del tiempo, la fecha o el clima, etc. La figura 3 muestra la propiedad de ocupación de espacio. En este caso se puede observar que existen *puertas* por donde se puede ingresar o salir al triángulo. Estas propiedades de hecho no cambiarán con la rotación o cambio de posición del triángulo. Se puede definir una función de costo representada por una matriz que expresa el costo $C_k(i, j)$ de ir de una puerta i a otra j en el triángulo k . La matriz no necesariamente es simétrica ya que el costo de ir de una puerta i a otra j puede ser distinto que ir al revés, situación que se puede dar en terrenos con subidas y bajadas por ejemplo.

El objetivo de un planeador global de trayectoria será calcular el costo recorriendo el conjunto de matrices y que le permite con algún criterio moverse de un punto a otro. Esto es un problema de optimización discreto. Además, las propiedades en el interior de los triángulos no cambia si estos se corren o rotan, con lo cual la matriz de costo tampoco lo hace. Sin embargo esto no es así cuando el triángulo cambia su tamaño o forma. Pero como los vértices del triángulo estarán cercanos al vehículo haciendo SLAM, estos puntos estarán fuertemente correlacionados con este y por tanto son más probables las rotaciones y corrimientos que cambios de forma o tamaño, que de producirse son pequeños. Entonces es posible no actualizar permanentemente las matrices de costo aunque es factible

acotar estos cambios penalizando los costos de acuerdo a ello.

Son claras entonces las consecuencias de una solución completa como la del mapa métrico híbrido para aplicaciones de navegación autónoma. En agricultura de precisión por ejemplo es posible que los datos de campo sean relevados con referencias geográficas en forma consistente para su posterior análisis, con todas las consecuencias económicas que eso significa. En minería por otro lado, en la automatización donde no sólo interviene la navegación robusta sino el planeamiento de trayectorias teniendo en cuenta costos de traslado y uso de equipos, un esquema como este se constituye en beneficios económicos pero también sociales en una tarea que en la mayoría de los casos, es riesgosa.

A. El mapa métrico híbrido y la agricultura de precisión

De todo lo visto hasta este punto son claras dos cosas. La primera que la posibilidad de contar con un móvil autónomo que fusione información para lograr mantener su posición con una precisión acotada sería útil tanto para la agricultura de precisión como para la agricultura a escala de planta. Segundo, si es posible no sólo mover el móvil y conocer su posición sino que es posible levantar un mapa que relacione la posición con datos del ambiente o el cultivo en forma confiable, fusionando información proveniente de una miríada de sensores, estamos en presencia de una solución completa desde la robótica de campo para esta aplicación.

A continuación se presenta un ejemplo de construcción de este tipos de mapas a partir de datos experimentales obtenidos en un ambiente externo con un vehículo instrumentado a tal fin. En la figura 4 se observa e funcionamiento del algoritmo de SLAM en conjunto con la construcción de los triángulos formados por algunos de los mojones del mapa detectados a partir de su observación reiterada y consistente. En esa figura se muestran los triángulos formados a partir del análisis de la distancia entre mojones que forman la base. Como se observa luego de casi completar una vuelta al ambiente, las regiones ya están formadas. La figura 5 presenta un mapa completo con información en los interiores de los triángulos. En este caso se construyó un mapa de ocupación de grillas en su interior.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de mapa en capas. Este mapa, así como el presentado en la figura 5, se puede construir a medida que se navega y donde cada capa representa una propiedad diferente que se intenta medir. Por ejemplo la capa A inclinación del terreno, la B humedad, y la C salinidad. Pero también pueden representar una misma propiedad pero en distintas expediciones al terreno. Por ejemplo un nutriente del suelo que se mide en una primera expedición muestra una variabilidad como la capa C, insuficiente y desapareja. Una segunda expedición luego del agregado de nutriente muestra una capa como la B que

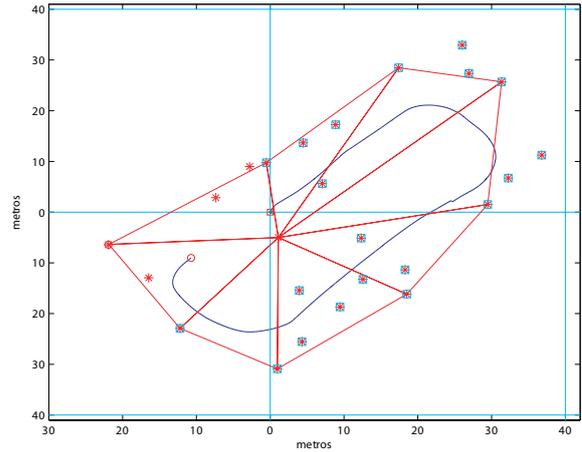


Figura 4: Mapa de mojones y camino recorrido junto con los triángulos formados a partir de algunos de ellos

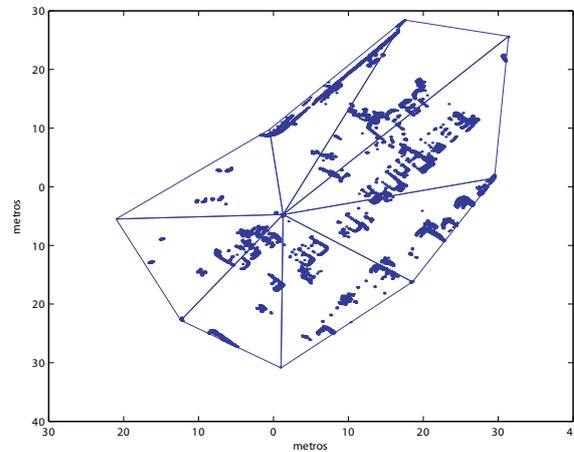


Figura 5: Mapa métrico híbrido completo construido luego de algunos metros recorrido por el móvil. Se muestran los mojones y triángulos junto con una grilla de ocupación

aun es insuficiente pero más pareja, y una tercera (A) muestra el nivel deseado.

IV. Conclusiones

Esta representación del mundo que rodea al móvil no sólo tiene consecuencias importantes desde el punto de vista de la resolución de la autonomía de un móvil, sino que como se puede apreciar en lo expuesto, para resolver problemas concretos donde estos móviles pueden ser útiles. Se presentó como ejemplo la agricultura de precisión pero la importancia se puede trasladar a otro tipo de problemas. Minería por caso. En este punto se puede incluso pensar en la colocación de mojones artificiales que constituirían en principio los vértices de los triángulos y todo otro rasgo del ambiente que pueda ser observado en forma repetitiva y consistente puede ser agregado para ampliar o mejorar la localización. Es decir, se trabaja con un mapa inicial previo

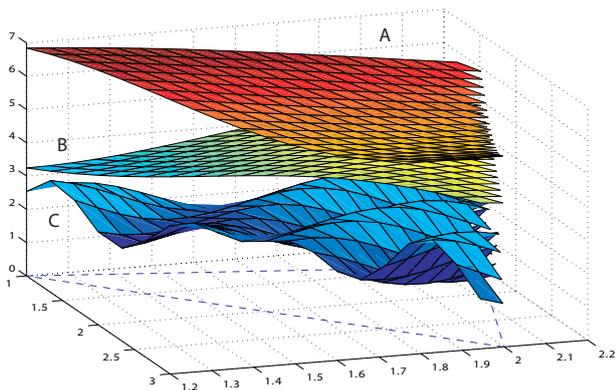


Figura 6: Ejemplo e mapas en capas. Cada capa (A, B y C) pueden representar distintas propiedades o la misma en distintas expediciones del móvil

y se va construyendo uno mas completo en la navegación. Luego, dentro de cada triángulo se plantea un mapa en grillas de ocupación que permite proyectar trayectorias en línea, etc.

Otra aplicación atractiva es la automatización de grandes maquinarias en puertos para por ejemplo el transporte de contenedores, donde el mapa de ocupación es dinámico debido a la ocupación variable de espacios hecho por los contenedores. En resumen en toda aplicación de navegación autónoma en ambientes externos, dinámicos y poco preparados estas técnicas de construcción del mapa y navegación resultarán en soluciones confiables y robustas.

Referencias

- M. Bragachini, A. Martini, A. Méndez, and R. Bongiovanni. Avances en la agricultura de precisión en argentina. *Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América*, pages 1–7, Diciembre 2002.
- J. Castellanos, J. Montiel, J. Neira, and J. Tardós. Sensor influence in the performance of simultaneous mobile robot localization and map building. *Sixth International Symposium on Experimental Robotics, ISER '99*, pages 203–212, March 1999. Sydney, Australia.
- H. F. Durrant-Whyte. An autonomous guided vehicle for cargo handling applications. *Int. Journal of Robotics Research*, 15(5):407–441, October 1996.
- D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. Markov localization for mobile robots in dynamic environments. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 18(11):391–427, 1999.
- J. Guivant and E. Nebot. Improved computational and memory requirements of simultaneous localization and map building algorithms. *IEEE Intl. Conf on Robotics and Automation, ICRA 2002*, pages 2731–2736, May 2002.
- J. Guivant, J. Nieto, F. Masson, and E. Nebot. Navigation and mapping in large unstructured environments. *The International Journal of Robotics Research*, Sage Science Press, Aparecerá en el número de otoño 2003.
- R. M. Lark, J. V. Stafford, and H. C. Bolam. Limitations on the spatial resolution of yield mapping for combinable crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(3):183–193, 1997.
- J. Leonard, P. Neuman, and R. Rikoski. Towards robust data association and feature modeling for concurrent mapping and localization. *International Symposium of Robotics Research*, 2001. Lorne, Australia.
- S. Majumder, J. Rosenblatt, S. Scheduling, and H. Durrant-Whyte. Map building and localization for underwater navigation. *Proceedings of Seventh International Symposium On Experimental Robotics (ISER 2000)*, Daniela Rus, eds. Springer-Verlag, pages 511–522, December 2000. Honolulu, Hawaii, USA.
- F. Masson, J. Guivant, and E. Nebot. Hybrid architecture for simultaneous localization and map building in large outdoor areas. In *IROS 2002, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems*, Lausanne, Suiza, 30th September to 4th October 2002.
- E. Nebot, H. Durrant-Whyte, and S. Scheduling. Frequency domain modeling of aided gps for vehicle navigation systems. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, pages 73–82, Oct 1998.
- J. Neira, J. Tardos, J. Horn, and G. Schmidt. Fusing range and intensity images for mobile robot localization. *Ieee Transactions On Robotics And Automation*, 15(1):76–84, Feb 1999.
- J. V. Stafford. Gps in agriculture: A growing market. *IBC '98 Conference Space-Based Navigation Industry*, pages 60–69, Jun 1998.
- S. Sukkarieh, E. Nebot, and H. Durrant-Whyte. A high integrity imu gps navigation loop for autonomous land vehicle applications. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(3):572–578, June 1999.
- N. D. Tillett, T. Hague, and J. A. Marchant. A robotic system for plant-scale husbandry. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69(2):169–178, 1998.
- C. Wang and C. Thorpe. Simultaneous localization and mapping with detection and tracking of moving objects. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2002.