

Navegación y Mapeo en un Olivar

Javier Gimenez, Daniel Herrera and Ricardo Carelli

*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan-CONICET,
Av. Libertador 1109 (O), San Juan-Argentina
{jgimenez,dherrera,rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar*

Abstract—El mapeo de ambientes agrícolas parcialmente estructurados es un recurso de gran utilidad para la agricultura de precisión. Por tal motivo, se propone una técnica de navegación autónoma y mapeo en un olivar por medio de un robot-móvil, que cuenta solamente con información laser frontal del entorno y la ubicación exacta de los olivos extremales de la plantación. Dicho procedimiento se basa en la resolución de un problema de optimización con restricciones no lineales, que reducen los errores propios de la etapa de medición, y garantizan una reconstrucción eficiente del mapa de la plantación a posteriori.

Palabras claves - navegación, mapeo, ambientes agrícolas, optimización.

I. INTRODUCCIÓN

La Robótica, una de las áreas de la Automatización, está orientando actualmente su aplicación en escenarios parcialmente estructurados o variantes en el tiempo, lo que genera un notable y creciente impacto en los sectores productivos y de servicios. Estas aplicaciones requieren un grado elevado de autonomía de operación y en general diseños específicos para tener en cuenta el entorno y las tareas particulares. Un campo de aplicación de interés actual y con gran impacto potencial de la robótica es la agricultura de precisión [1]. Dentro de esto, se han desarrollado autómatas denominados unidades de servicio robotizadas, con altos grados de destreza, autonomía e inteligencia, que permiten su aplicación en entornos de difícil acceso, de condiciones climáticas variantes y en terrenos con características no uniformes [2].

En lo referente a generación de mapas, se han presentado múltiples trabajos en ambientes interiores, dando resultados satisfactorios, sin embargo son aun escasos los referentes a mapeo en un entorno agrícola. En [3], por ejemplo, se introduce una estrategia de mapeo basada en la detección de plantas de maíz usando una cámara estéreo. En este trabajo la localización del vehículo no está considerada durante el proceso de mapeo.

En los últimos años se ha trabajado en el problema de la localización y el mapeo simultáneos (SLAM, por sus siglas en inglés de Simultaneous Localization and Mapping) [4]–[6], en el cual se genera un proceso recursivo que minimiza simultáneamente tanto los errores de localización del vehículo como los errores de mapeo del medio en el cual navega [7], [8]. En [9], [10] se ofrece una introducción concisa al algoritmo de SLAM, que si bien se basa en procedimientos específicos y precisos como el filtro de Kalman [11], conllevan costos computacionales que le dificultan al robot trasladarse a altas velocidades mientras mapea en línea.

En el presente trabajo se propone un algoritmo de navegación que permite a un robot autónomo estimar la ubi-

cación de los olivos a mayor velocidad y evitando el uso dispositivos de auto-localización como GPS, unidades de medición inercial u odometría, tal y como se detalla en la Sección II. Para ello se utiliza el algoritmo de navegación que se detalla en la Sección III, donde el robot realiza mediciones angulares y lineales del olivar siguiendo lo expuesto en la Sección IV. Las mediciones incluyen errores de distancias propios del laser, y errores angulares producidos por la discretización de las direcciones en las que mide. Estos errores conducen a inconsistencias entre las estimaciones, tales como: suma de ángulos interiores de cuadriláteros distintas de 360° o polígonos mal cerrados. En la Sección V se desarrolla un procedimiento de ajuste de las medidas, con el fin de lograr el mejor ajuste consistente del conjunto sobredeterminado de medidas. En la Sección VI se desarrollan algunas simulaciones mostrando las bondades del método propuesto. Finalizando con las conclusiones del trabajo y futuras metas en la Sección VII.

II. PROBLEMA

Considere un robot navegando entre las hileras de un olivar con el fin de mapear tal plantación. El robot sólo cuenta con un laser que mide distancias en un rango frontal de 180° . Por sencillez se asumirá que el olivar es regular, esto es, está compuesto por hileras con la misma cantidad de olivos ubicados de manera tal que cada sendero puede ser dividido en cuadriláteros, tal y como se diagrama en la Fig. 4. En caso de faltar algún olivo en un radio supuesto de localización se crea uno ficticiamente para lograr tal regularidad, que posteriormente es eliminado del mapeo resultante. Suponga además que, mediante la aplicación a priori de algún procedimiento, el robot cuenta con la ubicación exacta de los olivos extremales de cada hilera $P_{i,1}, P_{f,1}, P_{i,2}, P_{f,2}, \dots$ (ver Fig. 1).

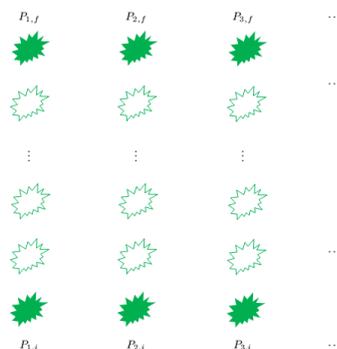


Fig. 1. Olivos extremales.

III. NAVEGACIÓN

Consideremos una plantación uniforme de vides o frutales como olivos, que generan múltiples corredores consecutivos de características discretas, donde se pretende generar navegación autónoma basada en láser. Es claro que los datos sensoriales no son simples de procesar. Sin embargo es posible incluir estrategias de selección de rayos y estrategias de giro que permiten generalizar las técnicas de navegación en pasillos interiores [12], de tal modo que brinden resultados satisfactorios en este tipo de ambientes. Es así que este trabajo se basa en la técnica de navegación propuesta en [12], pero incluyendo una formalización matemática de la estrategia de giro, evitando así el uso de reglas empíricas que resultan muchas veces imprecisas.

A. Modelo cinemático robot-objetivo

Las ecuaciones cinemáticas del error se expresan como [12]:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = u \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = w, \end{cases}$$

donde u y w definen las acciones de control de un robot tipo unicycle, y $[\tilde{x} \ \varphi]$ son los estados del sistema, que identifican los errores en la posición y la orientación referentes al centro y dirección del pasillo como se muestra en la Fig. 2. El objetivo de control se define como:

$$[\tilde{x}(t), \varphi(t)] \rightarrow \mathbf{0}.$$

B. Ecuaciones de estados utilizando el sensor laser

El algoritmo de seguimiento se centra en la adecuada selección de los rayos laser, donde se considera los dos más cercanos, uno en cada lado, y los dos siguientes visibles entre aquellos como referencias para determinar los estados del sistema, tal cual se expone en [12]. Esta información es posteriormente utilizada para calcular los errores de orientación y posición a través de las fórmulas:

$$\tilde{x} = \frac{D_i - D_d}{2}, \quad \varphi = \frac{\varphi_d - \varphi_i}{2}.$$

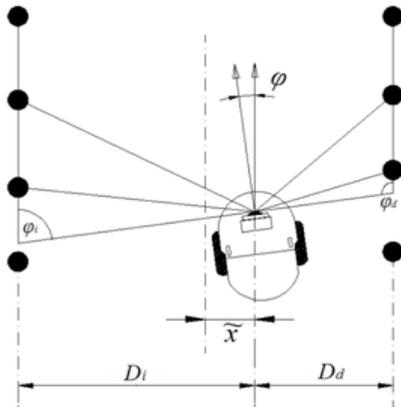


Fig. 2. Diagrama de los estados del sistema.

En base a estos, en [12] se define el siguiente controlador para navegación en pasillos

$$\begin{aligned} v &= (v_{\max} - k|\tilde{x}|) \cos \varphi, \\ w &= -k_{\varphi}\varphi - k_x\tilde{x}v \sin \varphi / \varphi, \end{aligned}$$

donde

$$k_{\varphi} = \frac{k_1}{a_1 + |\varphi|} \quad \text{y} \quad k_x = \frac{k_2}{a_2 + |\tilde{x}|},$$

siendo k , k_1 , k_2 , a_1 y a_2 constantes de diseño, y v_{\max} la máxima velocidad del móvil.

C. Estrategia de giro

Las condiciones para iniciar un giro vienen dadas por el número de troncos detectados. Una vez que el número de troncos que forman el pasillo no es suficiente para determinar \tilde{x} y φ , se propone una estrategia de giro evitando la conmutación de controladores como propone [13]. Para ello se plantea el sistema diagramado en la Fig. 3, en el cual se ejemplifica un giro pivote hacia la derecha al finalizar un pasillo de olivos.

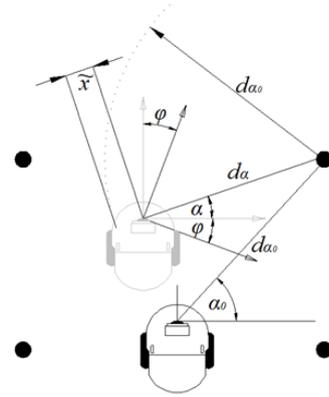


Fig. 3. Esquemática del procedimiento de giro empleado.

El procedimiento propuesto es el siguiente: Consideremos una distancia d_{α_0} y un ángulo α_0 , establecidas como constantes de pivoteo, que definen el radio de giro y el ángulo referencial del láser durante el giro, respectivamente. El propósito de éstas es mantener una distancia constante al pivote (tronco final del pasillo) y no perderlo de vista (control a lazo cerrado). Además sus valores dependen de las características propias de la plantación, y específicamente del ancho del pasillo generado por los olivos.

Si calculamos las variables de estado de un modo diferente, es posible usar el controlador de navegación en pasillos [14] para habilitar al robot a realizar la estrategia de giro. Esto es posible porque las dos tareas son muy similares entre sí. En este caso, las variables de estado son \tilde{x} y φ , donde φ es la rotación necesaria para continuar observando al poste pivote con un ángulo α_0 , y \tilde{x} representa la distancia entre el robot y el círculo imaginario con centro en el poste pivote y radio d_{α_0} . Esto es:

$$\varphi + \alpha = \alpha_0 = \text{cte} \Rightarrow \varphi = \alpha_0 - \alpha. \quad (1)$$

$$\tilde{x} = d_{\alpha} - d_{\alpha_0}. \quad (2)$$

Es así que con \tilde{x} y φ , calculadas como se presenta en (1) y (2) durante un giro, y alternando entre derecha e izquierda, es posible utilizar el mismo controlador de seguimiento de pasillos para generar navegación por toda la plantación.

IV. MEDICIÓN

En cada instante en que el robot se encuentra en modo navegación, cuenta con la distancia y dirección a los 4 olivos más cercanos dentro de la hilera por la que navega. Con esta información, a través de reglas trigonométricas clásicas, es posible estimar iterativamente las distancias y ángulos diagramados en cada cuadrilátero de la Fig. 4.

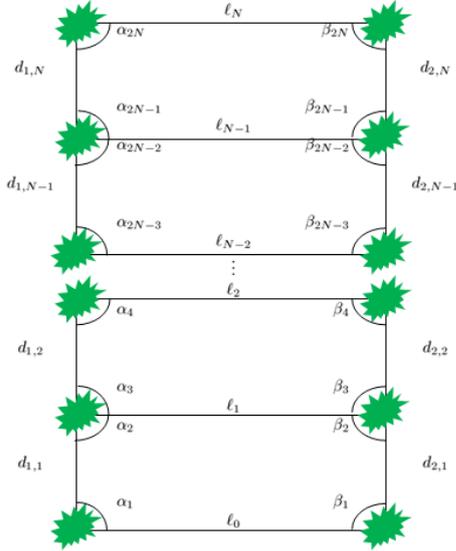


Fig. 4. Mediciones que guarda el robot mientras navega entre las hileras de olivos.

Durante el lapso de tiempo en el que el robot observa el mismo cuadrilátero, recopila una gran cantidad de mediciones de cada lado y ángulo del mismo. Con ellas se estiman iterativa e insesgadamente cada medida por medio de su media, y sus respectivas varianzas por medio de S^2 [15].

V. AJUSTE DE MEDIDAS

Un vez que el robot finaliza su navegación entre dos hilera de $N + 1$ olivos, cuenta con estimaciones de las distancias y los ángulos diagramados en la Fig. 4. De estas medidas únicamente se conoce con exactitud ℓ_0 y ℓ_N , debido a que, como se dijo, se conoce a priori la ubicación de los olivos de los extremos de cada hilera.

Si bien las mediciones laser son de gran precisión, cuentan con errores y se realizan en una cantidad discreta de direcciones. Esto produce que las estimaciones angulares posean errores de mayor orden, implicando acumulación de errores que producen mapas distorsionados e inconsistentes. A pesar de estas dificultades, los errores resultantes en la práctica son del orden del mm en el caso de distancias, y del orden de medio grado en los ángulos. Esto lleva a pensar que si bien las estimaciones producen un conjunto de medidas incompatibles, existe un conjunto de medidas compatibles “muy cerca” de las estimadas. Con el fin de buscar tal configuración, para cada medida estimada m_i , se define una nueva variable Δm_i , que representa la corrección que se hará sobre m_i en busca de una configuración compatible. Además, se utilizará la notación $\hat{m}_i = m_i + \Delta m_i$.

Se buscan correcciones que minimicen la siguiente suma

$$\Lambda^2 := \sum_{i=1}^{2N} \left(\frac{\Delta \alpha_i^2}{\text{Var}[\alpha_i]} + \frac{\Delta \beta_i^2}{\text{Var}[\beta_i]} \right) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta d_{1,i}^2}{\text{Var}[d_{1,i}]} + \frac{\Delta d_{2,i}^2}{\text{Var}[d_{2,i}]} \right) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta \ell_i^2}{\text{Var}[\ell_i]}, \quad (3)$$

y que cumplan determinadas restricciones que hagan compatible al conjunto de mediciones. En esta expresión se incluyen las varianzas, que fueron estimadas en la etapa de medición, con el fin de escalar mediciones lineales y angulares de distinta naturaleza. Este procedimiento no lineal con restricciones se resuelve mediante la aplicación del método de los multiplicadores de Lagrange [16].

Las restricciones que se plantean en este trabajo son de tres tipos: básicas, de encuadre y de alineación. Las restricciones básicas son

$$\hat{\alpha}_{2n-1} + \hat{\alpha}_{2n} + \hat{\beta}_{2n} + \hat{\beta}_{2n-1} = 360, \quad n = 1, \dots, N;$$

la cual permite disminuir la cantidad de variables a considerar, debido a que para cada n

$$\Delta \beta_{2n-1} = 360 - \hat{\alpha}_{2n-1} - \hat{\alpha}_{2n} - \hat{\beta}_{2n} - \beta_{2n-1}. \quad (4)$$

Por la sencillez de las mismas, estas restricciones son las únicas que se incorporan al problema por sustitución, y no por el método de Lagrange.

Las restricciones de encuadre son las siguientes $N - 1$ identidades bidimensionales

$$\begin{aligned} 1 \leq n \leq N - 1 \Rightarrow \\ f_n(\Delta) := \sum_{i=1}^n \hat{d}_{1,i} \omega \left(\sum_{j=1}^{2i-1} \hat{\alpha}_j - 180(i-1) \right) + \\ + \hat{\ell}_n \omega \left(\sum_{j=1}^{2n} \hat{\alpha}_j - 180n \right) + \\ + \sum_{i=1}^n \hat{d}_{2,i} \omega \left(\sum_{j=1}^{2i} \hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_{2i} - 180(i+1) \right) + \\ + (P_{i,1} - P_{i,2}) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5)$$

donde Δ es el vector de correcciones y

$$\omega(\alpha) := [\cos \alpha, \sin \alpha]^T.$$

Cada término de la sumatoria es de la forma $m\omega(\alpha)$, que representa un vector de módulo m y orientación α . El hecho que la suma de estos vectores resulte en el vector nulo, implica que se busca el encuadre de las medidas obtenidas, tal y como lo diagrama la Fig. 5. Note que en (5) se usó (4) para mantener la reducción de variables planteada.

Por otro lado, las restricciones de alineación vienen dadas por

$$\begin{aligned} f_N(\Delta) := \sum_{i=1}^N \hat{d}_{1,i} \omega \left(\sum_{j=1}^{2i-1} \hat{\alpha}_j - 180(i-1) \right) + \\ + (P_{1,i} - P_{1,f}) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (6)$$

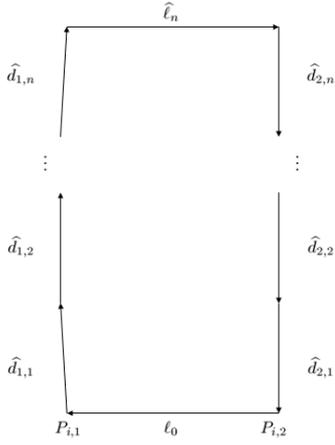


Fig. 5. Diagrama de las restricciones de encuadre.

$$f_{N+1}(\Delta) := \sum_{i=1}^N \hat{d}_{2,i} \omega \left(\sum_{j=1}^{2i} \hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_{2i} - 180i \right) + (P_{2,i} - P_{2,f}) = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Estas restricciones buscan que las correcciones que se introduzcan sean compatibles con los puntos de inicio y fin de cada hilera, tal y como lo diagrama la Fig. 6.

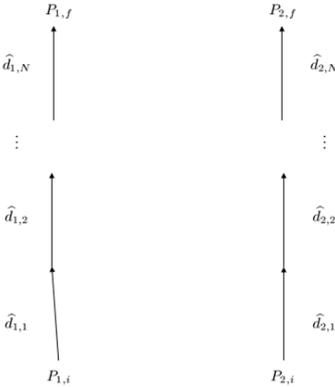


Fig. 6. Diagrama de las restricciones de alineación.

Luego, el problema se reduce a un problema de optimización, en el cual se busca minimizar la expresión resultante al sustituir (4) en (3), bajo las restricciones dadas en (5), (6) y (7). Para resolver este problema, se define la siguiente función de Lagrange

$$\Phi(\Lambda, \lambda) := \Lambda^2 + \sum_{n=1}^{N+1} \lambda_n^T f_n(\Delta), \quad (8)$$

donde $\lambda := [\lambda_n] \in \mathbb{R}^{2 \times (N+1)}$ es un arreglo que contiene a los multiplicadores de Lagrange.

Teniéndose en cuenta que se sustituyó (4) en (3), para cada $i = 1, \dots, N$ resulta que

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta \alpha_{2i-1}} \Lambda^2 &= \frac{2\Delta \alpha_{2i-1}}{Var[\alpha_{2i-1}]} - \vartheta_i(\Delta), \\ \frac{\partial}{\partial \Delta \alpha_{2i}} \Lambda^2 &= \frac{2\Delta \alpha_{2i}}{Var[\alpha_{2i}]} - \vartheta_i(\Delta), \\ \frac{\partial}{\partial \Delta \beta_{2i}} \Lambda^2 &= \frac{2\Delta \beta_{2i}}{Var[\beta_{2i}]} - \vartheta_i(\Delta), \end{aligned}$$

donde

$$\vartheta_i(\Delta) := \frac{2(360 - \hat{\alpha}_{2i-1} - \hat{\alpha}_{2i} - \hat{\beta}_{2i} - \beta_{2i-1})}{Var[\beta_{2i-1}]}.$$

Luego la solución al problema viene dada por la solución del siguiente sistema

$$1 \leq i \leq 2N - 1 \Rightarrow$$

$$\frac{2\Delta \alpha_i}{Var[\alpha_i]} - \vartheta_i(\Delta) + \sum_{n=\lfloor \frac{i+1}{2} \rfloor}^{N+1} \lambda_n^T \frac{\partial}{\partial \Delta \alpha_i} f_n(\Delta) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{2\Delta \alpha_{2N}}{Var[\alpha_{2N}]} - \vartheta_{2N}(\Delta) + \lambda_{N+1}^T \frac{\partial}{\partial \Delta \alpha_{2N}} f_{N+1}(\Delta) = 0; \quad (10)$$

$$1 \leq i \leq N - 1 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \frac{2\Delta \beta_{2i}}{Var[\beta_{2i}]} - \vartheta_i(\Delta) + \sum_{n=i}^{N-1} \lambda_n^T \frac{\partial}{\partial \Delta \beta_{2i}} f_n(\Delta) + \\ + \lambda_{N+1}^T \frac{\partial}{\partial \Delta \beta_{2i}} f_{N+1}(\Delta) = 0; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\frac{2\Delta \beta_{2N}}{Var[\beta_{2N}]} - \vartheta_{2N}(\Delta) + \lambda_{N+1}^T \frac{\partial}{\partial \Delta \beta_{2N}} f_{N+1}(\Delta) = 0; \quad (12)$$

$$1 \leq i \leq N - 1 \Rightarrow \frac{2\Delta \ell_i}{Var[\ell_i]} + \lambda_i^T \frac{\partial}{\partial \Delta \ell_i} f_i(\Delta) = 0; \quad (13)$$

$$1 \leq i \leq N \Rightarrow \frac{2\Delta d_{1,i}}{Var[d_{1,i}]} + \sum_{n=i}^N \lambda_n^T \frac{\partial}{\partial \Delta d_{1,i}} f_n(\Delta) = 0; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} 1 \leq i \leq N-1 \Rightarrow \frac{2\Delta d_{2,i}}{Var[d_{2,i}]} + \sum_{n=i}^{N-1} \lambda_n^T \frac{\partial}{\partial \Delta d_{2,i}} f_n(\Delta) + \\ + \lambda_{N+1}^T \frac{\partial}{\partial \Delta d_{2,i}} f_{N+1}(\Delta) = 0; \quad (15) \end{aligned}$$

$$\frac{2\Delta d_{2,N}}{Var[d_{2,N}]} + \lambda_{N+1}^T \frac{\partial}{\partial \Delta d_{2,N}} f_{N+1}(\Delta) = 0; \quad (16)$$

$$1 \leq n \leq N + 1 \Rightarrow f_n(\Delta) = \mathbf{0}; \quad (17)$$

el cual es un sistema de $8N + 1$ ecuaciones y $8N + 1$ variables.

De (13), se tiene que para cada $i = 1, \dots, N - 1$,

$$\begin{aligned} \Delta \ell_i &= -\frac{Var[\ell_i]}{2} \lambda_i^T \frac{\partial}{\partial \Delta \ell_i} f_i(\Delta) \\ &= -\frac{Var[\ell_i]}{2} \lambda_i^T \omega \left(\sum_{j=1}^{2i} \hat{\alpha}_j - 180i \right), \quad (18) \end{aligned}$$

lo cual pone a las variables $\Delta \ell_i$ en función de las otras variables del sistema, y reduce la complejidad del mismo. Del mismo modo, por (14), se tiene que para cada $i = 1, \dots, N$,

$$\Delta d_{1,i} = -\frac{Var[d_{1,i}]}{2} \sum_{n=i}^N \lambda_n^T \omega \left(\sum_{j=1}^{2i-1} \hat{\alpha}_j - 180(i-1) \right). \quad (19)$$

Análogamente, por (15), para cada $i = 1, \dots, N - 1$, se tiene que

$$\begin{aligned} \Delta d_{2,i} = & -\frac{Var[d_{2,i}]}{2} \times \\ & \times \left[\sum_{n=i}^{N-1} \lambda_n^T \omega \left(\sum_{j=1}^{2i} \hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_{2i} - 180(i+1) \right) + \right. \\ & \left. + \lambda_{N+1}^T \omega \left(\sum_{j=1}^{2i} \hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_{2i} - 180i \right) \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Por (16), resulta que

$$\Delta d_{2,N} = \frac{Var[d_{2,N}]}{2} \lambda_{N+1}^T \omega \left(\sum_{j=1}^{2N} \hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_{2N} - 180N \right). \quad (21)$$

Reemplazando las ecuaciones (18)-(21), en las ecuaciones (9)-(12) y (17), el problema se reduce a resolver un sistema con $5N + 2$ ecuaciones y $5N + 2$ incógnitas.

VI. SIMULACIONES

Para simular la propuesta, se genera un olivar compuesto por 10 hileras de 30 olivos cada una (ver Fig. 8). Se utiliza Matlab para realizar los cálculos, y el programa MobileSim para simular el modelo dinámico de un robot Pioneer p3dx-sh (<http://robots.mobilerobots.com/wiki/MobileSim>). Para la conexión entre Matlab y MobileSim se hace uso de un programa en C++ que utiliza memoria compartida, y que permite realizar lecturas del sensor laser y generar órdenes de control en línea.

A. Navegación

Para demostrar la eficiencia y estabilidad de la técnica de navegación propuesta, se presenta en la Fig. 7 los errores de posición y orientación (en verde y amarillo) en la transición entre eventos de seguimiento y giro, además de las acciones de control generadas (en rojo y azul). La bandera de "detección de giro" (en magenta), marca su comportamiento de giro o seguimiento con un valor de "1" o "0" respectivamente.

Es interesante notar que durante el seguimiento del camino los errores de posición y orientación convergen satisfactoriamente a cero, lo cual demuestra un adecuado comportamiento del controlador.

Durante la etapa de giro, mantener el olivo pivote a un ángulo de visión constante α_0 mientras se gira a una distancia constante d_{α_0} del mismo, contradice las características no holonómicas del robot. Razón por la cual los errores de posición y orientación en tal etapa convergen a valores distintos de cero, sin embargo la naturaleza misma del giro exige tener errores de posición y orientación no nulos, que generen movimiento circular a una distancia del poste, y que a su vez se ven balanceados en pos de lograr un giro adecuado.

A pesar de lo mencionado, los resultados muestran que si bien durante el giro no se alcanza la convergencia a cero de los estados del sistema, estos valores convergen a valores estables, durante el corto periodo de tiempo que dura dicho evento. Por tanto para garantizar eficiencia y estabilidad

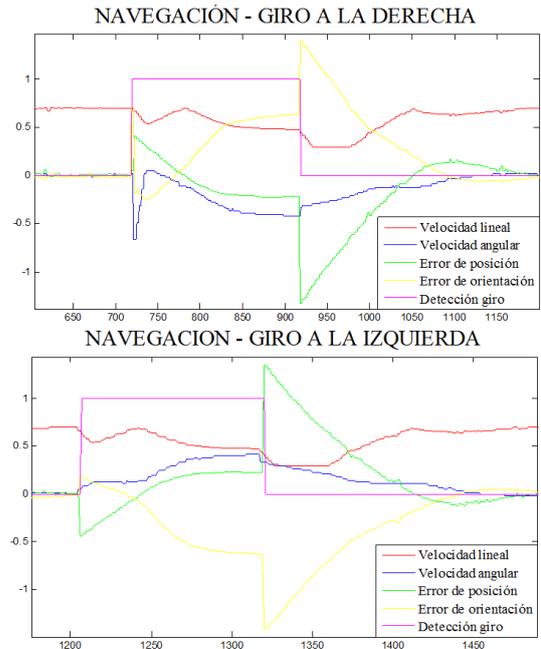


Fig. 7. Gráficas de los errores del sistema y las acciones de control.

basta con asegurar un radio de giro adecuado, que evite generar errores demasiado grandes en estado estable que saturarían las acciones de control, y por ende provocarían posibles pérdidas del pivote de referencia, afectando totalmente a su funcionamiento. La Fig. 8 muestra el sendero que realiza el robot bajo la técnica de control antes explicada.

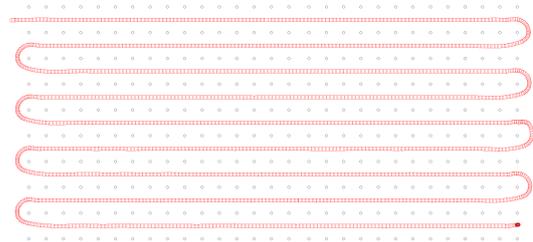


Fig. 8. Sendero de navegación del robot (rotado 90°).

B. Mapeo

En la Fig. 9 se ilustran dos hileras de olivos con sus ubicaciones reales, las ubicaciones reconstruidas en base a las mediciones iniciales y con respecto a las medidas corregidas por el método propuesto. Si bien se puede observar un pequeño sesgo a derecha en la estimación propuesta, este suele anularse con el sesgo opuesto que se produce al corregir las hileras correspondientes al sendero adyacente, donde el robot circula en dirección contraria.

En la Fig. 10 se ilustra la ubicación estimada y real de todos los olivos, con un error promedio de 4.46cm, alcanzando un error máximo de 11.43cm en un olivo de la primera hilera, la cual no es revisitada por el robot.

VII. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

En el presente trabajo se presentó una alternativa de mapeo, mediante una técnica de optimización aplicable fuera de línea, basada en la información métrica recopilada por un

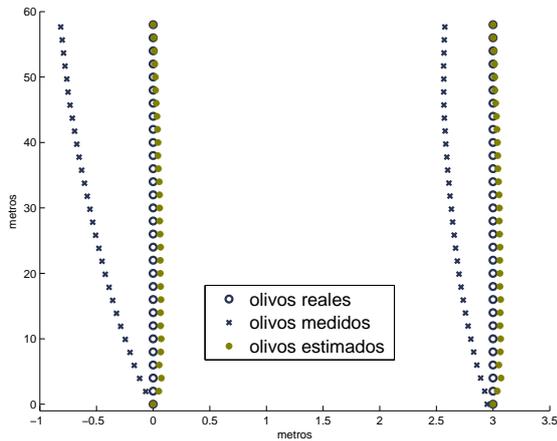


Fig. 9. Gráfico comparativo entre las posiciones reales, medidas inicialmente y estimadas en un par de hileras contiguas de olivos.

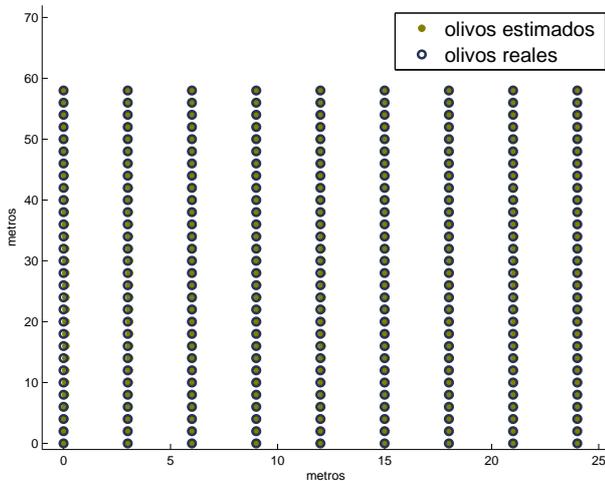


Fig. 10. Gráfico comparativo entre las posiciones reales y estimadas de los olivos.

autómata. La técnica ofrece resultados satisfactorios y posee un gran potencial para futuras mejoras. Se está trabajando en la generación de un método de ajuste análogo, capaz de estimar la ubicación de los olivos contando solamente con la posición exacta de los olivos de las esquinas de la plantación. Además, se estudian nuevas restricciones que mejoren aún más las estimaciones. El objetivo primordial es testear la propuesta en un olivar real y contrastar los resultados con información georeferenciada.

REFERENCIAS

- [1] A. SRINIVASAN, *Handbook Of Precision Agriculture: Principles And Applications*. CRC Press, 2006.
- [2] F. Auat Cheein and R. Carelli, "Agricultural robotics: Unmanned robotic service units in agricultural tasks," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 48–58, September 2013, iSI. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2013.2252957>
- [3] J. Jin and L. Tang, "Corn plant sensing using real-time stereo vision," *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 6-7, pp. 591–608, 2009.
- [4] F. Rovira-Mas, "Recent innovations in off-road intelligent vehicles: In-field automatic navigation," *Recent Patents on Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 169–178, 2009.
- [5] M. Bryson and S. Sukkarieh, "Observability analysis and active control for airborne SLAM," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 261–280, 2008.

- [6] F. Auat Cheein, G. Steiner, G. Perez Paina, and R. Carelli, "Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 78, pp. 195–207, 2011.
- [7] R. Chatila and J. Laumond, "Position referencing and consistent world modeling for mobile robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings.*, vol. 2, pp. 138–145, 1985.
- [8] N. Ayache and O. Faugeras, "Maintaining a representation of the environment of a mobile robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 6, pp. 804–819, 1989.
- [9] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping (slam): part i essential algorithms," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99–108, 2006.
- [10] —, "Simultaneous localization and mapping (slam): part ii state of the art," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 108–117, 2006.
- [11] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 2005.
- [12] L. T. F. Penizzotto, R. Carelli, and D. Patiño, "Sistema de control basado en láser para la navegación autónoma de vehículos en plantaciones de viñedos y frutales," *presentado en la XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, Buenos Aires*, 2007.
- [13] D. Liberzon and A. S. Morse, "Benchmark problems in stability and design of switched systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Tech. Rep., 1999.
- [14] R. Carelli and E. Oliveira Freire, "Corridor navigation and wall-following stable control for sonar-based mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 45, no. 3, 2003.
- [15] S. M. Ross, *Simulation (2. ed.)*, ser. Statistical modeling and decision science. Academic Press, 1997.
- [16] O. Brezhneva, A. A. Tretyakov, and S. E. Wright, "A short elementary proof of the lagrange multiplier theorem," *Optimization Letters*, vol. 6, no. 8, pp. 1597–1601, 2012.