

SISTEMA SENSORIAL DE UNA PLATAFORMA MÓVIL AUTÓNOMA PARA TRATAMIENTO FITOSANITARIOS EN INVERNADEROS

Alfredo Valero, Francisco Rodríguez

Departamento de Lenguajes y Computación. Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.
Universidad de Almería. Crta Sacramento, s/n 04120 Almería. España. ffrodrig@ual.es

Diego Pedro Morales

Departamento de Arquitectura de Computadores y Electrónica. Área de Tecnología Electrónica.
Universidad de Almería. Crta Sacramento, s/n 04120 Almería. España. dmorales@ual.es

Julián Sánchez-Hermosilla López

Departamento de Ingeniería Rural. Área de Ingeniería Agroforestal.
Universidad de Almería. Crta Sacramento, s/n 04120 Almería. España. jusanche@ual.es

Resumen

El proceso de la fumigación en invernaderos tal y como se realiza actualmente no garantiza la eficiencia del tratamiento, además de acarrear riesgos para el personal que realice la aplicación, así como para el medioambiente. El desarrollo de un robot móvil que realice estas tareas palia estos problemas redundando en un mejor aprovechamiento del producto, lo que supone un ahorro económico. En este trabajo se presentan la sensorización de la plataforma móvil diseñada para esta aplicación, así como de la herramienta diseñada para la adquisición de las señales de los mismos y las acciones de control del robot.

Palabras Clave: Robot móvil, sensorización, pulverización, invernaderos.

1 INTRODUCCION

En la actualidad, la mayor parte de las aplicaciones fitosanitarias en los invernaderos de Almería se realizan con métodos tradicionales. Un trabajador opera en el interior del invernadero portando una pistola pulverizadora unida a un depósito con el producto químico mediante una red de tuberías. Esto no garantiza la eficacia del tratamiento, debido a la falta de uniformidad, que depende de la pericia del operario, además de tratarse de una técnica que origina importantes riesgos para la salud y el medio ambiente. El uso de sistemas robotizados y técnicas de automatización ayudan a mejorar y optimizar la efectividad de la aplicación de productos fitosanitarios. De hecho, existen distintos trabajos relacionados con este campo. En [4] se describe un

robot móvil para tareas de fumigación, orientado a solucionar el problema de navegación en invernadero pero con un sistema de pulverización comercial. En [1] se muestra un sistema para fumigación basado en guiado inductivo. Estos sistemas presentan el problema de la pulverización a presión constante lo que no garantiza la uniformidad de la deposición del producto fitosanitario. También existen otras experiencias de sistemas autónomos orientados a la pulverización de árboles [2] y [5], en los que se utilizan sensores de ultrasonidos para regular la presión en función de la masa vegetal presente, pero a velocidad constante de la plataforma móvil.



Figura 1. Robot móvil en desarrollo.

En la Universidad de Almería, se está desarrollando un sistema autónomo de aplicación de fitosanitarios que resuelva estos dos problemas. El primer prototipo

(figura 1) consiste en una plataforma móvil con un sistema de tracción de orugas y guiado diferencial (así se distribuye de manera mas homogénea la presión sobre el suelo irregular y se deteriora menos la cubierta arenosa típica del suelo de los pasillos de los invernaderos del Sudeste español), accionado mediante motores hidráulicos cebados por una bomba hidráulica, alimentada por un motor de combustión de gasolina y con control de dirección mediante joysticks (en la misma plataforma y vía radio), con el que se puede obtener una velocidad máxima de 2,9 (m/s).

Esta plataforma transporta un sistema de pulverización constituido por dos barras verticales con boquillas, una electroválvula de dos posiciones que permite activar o desactivar la pulverización, una electroválvula proporcional para regular la presión de salida y sensores de presión y caudal para cerrar el bucle de control (Figura 2).

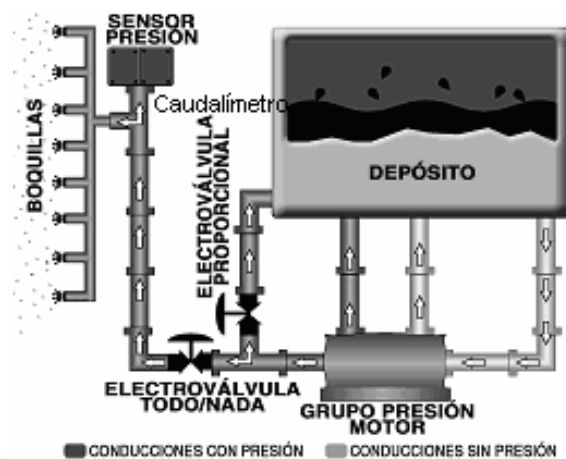


Figura 2. Sistema de pulverización

En este artículo se va a describir el sistema de sensorización y control que permite a la plataforma móvil desplazarse por un invernadero de forma autónoma y efectiva a una velocidad de máxima 2 [m/s] y con una distancia equidistante a las líneas de cultivo durante el proceso de pulverización del producto fitosanitario.

En la sección 2 se describirán los sensores utilizados y su ubicación en la plataforma móvil. La siguiente sección muestra el sistema de medida y control (tanto los componentes físicos como la herramienta que los gestiona) utilizado para las primeras experiencias y ensayos. En a sección 4 se exponen las conclusiones obtenidas y los futuros trabajos.

2 SISTEMA SENSORIAL

El sistema sensorial de la plataforma consta de dos subsistemas:

- Sensorización del sistema de pulverización.
- Sensorización de la plataforma móvil que proporciona información sobre la posición y velocidad del vehículo en el momento que se le requiera.

Para la elección de los sensores se ha tenido en cuenta la limitación de presupuestos y la intención de utilizar el conjunto mínimo de ellos que permita el funcionamiento correcto de la plataforma con vistas a una explotación comercial del prototipo por el que ya se han interesado distintas empresas y organismos oficiales.

El objetivo principal que se persigue en el diseño del sistema de aplicación de productos fitosanitario consiste en que debe permitir la pulverización un determinado volumen de caldo por hectárea controlando las diferentes variables que afectan al proceso. Una forma de modificar el caudal consiste en el control de la presión ya que se encuentran directamente relacionados. Se ha optado por controlar la presión, y mantenerla fija, en lugar del caudal, para que las condiciones de pulverización se mantengan constantes (fundamentalmente el tamaño de gota), por lo que es necesario un sensor de presión para cerrar este bucle de control. Por otra parte y, sólo por información, se ha instalado un sensor de caudal para comprobar que se cumplen las condiciones ideales de la pulverización y poder justificar la utilización del control de volumen (qué es lo que realmente interesa) mediante un control de presión. Evidentemente, en el desarrollo final, esté último sensor no habría que incluirlo en el sistema. Las características principales de estos sensores se indican en la tabla 1.

Para la localización del vehículo en el entorno del invernadero se han instalado los siguientes grupos de sensores:

- Sistema odométrico consistente en dos codificadores incrementales que miden la velocidad de giro de los ejes de las orugas, así como su sentido.
- Brújula electrónica. Debido a que el sistema odométrico puede acumular errores, se ha adquirido una brújula electrónica programable y calibrable que ofrece una referencia absoluta de la orientación del robot con respecto al polo norte magnético terrestre en un determinado plano. Debe mantenerse libre de campos magnéticos (por ejemplo los campos magnéticos inducidos por el motor de combustión) y también lejano de materiales metálicos, ya que estos afectan al comportamiento del sensor (la distancia de separación mínima debe de ser de 30,48 cm). Se ha optado por instalarlo sobre una barra no metálica sujeta al bastidor de la plataforma, de

forma que se sitúe sobre el depósito de pulverización que es de un material plástico. (figura 3).

- Sensores ultrasónicos (sónares) que permiten detectar cualquier obstáculo que se interponga frente al robot y su posicionamiento en el pasillo donde se esté realizando la pulverización, de forma que no choque con las plantas. Las características principales de estos sensores se indican en la tabla 1. Como se puede observar en la figura 3, se han situado dos sónares de media distancia (40-300 cm) en la parte delantera y trasera del vehículo ya que la plataforma deberá moverse tanto hacia delante como hacia detrás e intentando que sobresalgan lo menos posible para así minimizar el efecto de la zona muerta de medida (de 0 a 40 cm) y sin obstaculizar el cono de ultrasonidos que emite el sensor. En ambos lados de la plataforma se han instalado dos sónares de corta distancia (15-100 cm), unos cercanos a la parte delantera y otros a la parte trasera, para conseguir que el vehículo quede equidistante de las líneas de cultivo y mantenga una trayectoria recta, estos sensores se instalaron de forma que la zona muerta (de 0 a 15 cm) quede dentro de la estructura del propio vehículo ya que es muy posible que en algún momento el vehículo roce las líneas de cultivo. Además, se instalaron a una altura suficiente para que el sensor detecte el follaje de las plantas (por encima de los tallos) a una altura de unos 30 a 45 cm. Por otra parte, también se mantendrá libre de obstáculos el cono de 5° de ultrasonidos que emite el sensor .

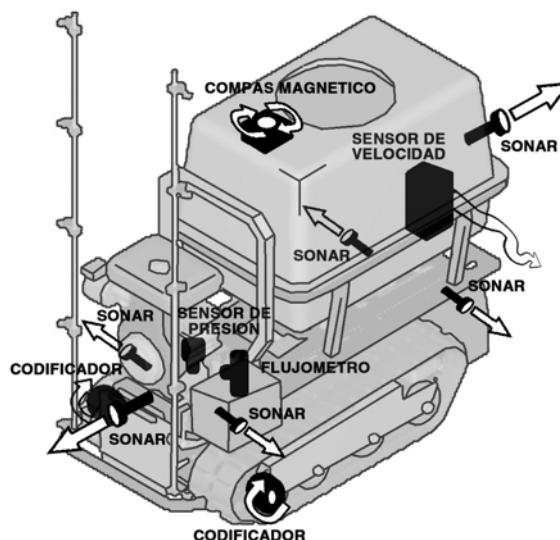


Figura 3. Ubicación de los sensores en la plataforma móvil

Aunque la velocidad de la plataforma se puede estimar con los sensores anteriores, en esta fase inicial del desarrollo se ha optado por la instalación de un sensor de velocidad por efecto Doppler (rádar) que mida la velocidad real del sistema. Se ha instalado a una altura de 45 cms en la parte delantera del vehículo para obtener una lectura libre de cualquier rozamiento con los cultivos. Este tipo de sensores necesitan una inclinación de 45° con respecto a la vertical por lo que las lecturas solo serán válidas cuando la plataforma móvil se mueva hacia delante (figura 3), que es el desplazamiento que realmente interesa.

Medida	Marca y modelo	Sensor	Rango	Resolución	Salida
Sistema de pulverización					
Presión	WIKA, ECO-1	Galga	0-250 bar	0.50%	0-10 VDC
Volumen	LH Agro, 902-984	Caudalímetro	5-160 l/min	0.5 l/min	Pulsos
Plataforma móvil					
Media distancia	Siemens, Serie 18	Sonar	40-300 cm	2.5 %	0-10 VDC
Corta distancia	Siemens, Serie III	Sonar	15-100 cm	3 mm.	0-10 VDC
Orientación	KVH, C100	Brújula	0-360°	8°	0.1-1.9 VDC
Velocidad	LH Agro, Compact II	Rádar	0.08-17.3 m/s	5 %	Pulsos
Posición	Baumer, BHK	Codificador	0-360°	1024 pulsos /vuelta	Pulsos
Obstáculos	Telemecanique, XCK	Fin de carrera	Si/No	-	5 VDC

Tabla 1. Características principales de los sensores utilizados

Por último, para la detección de choques con obstáculos se han instalado ocho sensores fin de carrera de varillas por motivos de seguridad (dos en el frontal, dos en la trasera y dos en cada lateral)

Hay que indicar que en la ubicación de los sensores en la plataforma móvil se han tenido en cuenta diversos factores como las restricciones técnicas de los dispositivos, el espacio en el volumen del vehículo para que quede los suficientemente

compacto, el volumen en el que debe trabajar el robot y la obtención de valores de utilidad para un comportamiento eficaz de la plataforma móvil.

3 SISTEMA DE CONTROL

3.1 SISTEMA A CONTROLAR

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal de este tipo de sistemas es que debe

permitir pulverizar un determinado volumen por hectárea controlando las diferentes variables que afectan a la pulverización. La relación existente entre este objetivo y el resto de variables del sistema se formula mediante la siguiente expresión [3]:

$$V = \frac{q_i \cdot n \cdot 10^4}{v \cdot S_l \cdot 60}$$

donde V (l/ha) es el volumen de aplicación del producto, q_i (l/min) el caudal de cada boquilla, n el número de boquillas, v (m/s) la velocidad de avance de la plataforma y S_l (m) la separación entre líneas de cultivo. Se optó por controlar la presión, y mantenerla fija, en lugar del caudal, para que las condiciones de pulverización se mantengan constantes; por lo que el ajuste del volumen unitario se realizará modificando la velocidad de avance del vehículo. Como se observa en la figura 4, el sistema de control se divide en dos etapas, una primera donde se genera la consigna de presión en función de la velocidad del vehículo y del volumen a fumigar deseado, y otra que se encarga de hacer llegar la presión de salida al valor de la consigna óptima. Las consignas de presión generadas deben ser tales que cuando el robot comienza a moverse y cuando empieza a frenar, la presión debe ir descendiendo o aumentando respectivamente, y mientras el robot se mantenga con una velocidad constante, la consigna de presión no varía. Por otra parte, debe existir un sistema de control de la trayectoria que debe seguir el vehículo en el interior de un invernadero de forma que calcula la posición de las válvulas del sistema de tracción hidráulico de la plataforma. Hay que indicar que se deben mantener las restricciones de velocidad que se han establecido como óptimas para el sistema de pulverización. Por tanto, se dispone de dos sistemas de control independientes tal y como se muestra en la figura 4.

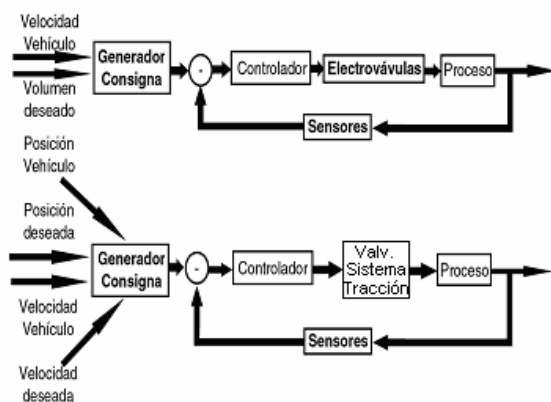


Figura 4. Sistema de control

3.2 HARDWARE DEL SISTEMA DE CONTROL

El prototipo final del proyecto contará con un sistema de control empotrado de bajo coste en el que irán programados los algoritmos de navegación finales del sistema. El campo para el desarrollo del sistema hardware es amplio. Se pueden utilizar soluciones con procesadores de propósito específico como los *procesadores de señal digital o DSP*, (*Digital Signal Processor*) que pueden ser de punto fijo o punto flotante. Por otro lado hay opciones en el mercado que utilizan procesadores basados en arquitectura *Intel* incluidos en un sistema sencillo empotrado. Otro grupo de sistemas son los basados en *dispositivos lógicos programables (FPLD)*, en ellos se realiza una implementación hardware del algoritmo, con lo que se puede elegir el tipo de representación de la información y además ofrecen la posibilidad de reconfiguración en línea por lo que el algoritmo puede ser modificado tantas veces como se quiera aún estando implementado en hardware. Otra ventaja de los dispositivos lógicos programables es la posibilidad de usarlas en sistemas híbridos *microcontrolador-FPLD*, implementando en los *FPLDs* partes críticas del algoritmo de control de manera que se incremente sensiblemente el rendimiento de cualquiera de los sistemas por separado. Lo que se pretende es estudiar la idoneidad de distintas configuraciones para ejecutar las tareas requeridas.

En la primera fase del proyecto, para ensayo de distintos algoritmos de navegación, se ha optado por un computador industrial de propósito general que debido a su arquitectura permite realizar este tipo de tareas fácilmente. Sus características principales son: TFT 10,4" alimentación 24 VDC, 4 slots de expansión, CPU PCISA-3716EV Pentium III, 1 GHz, 128 MB RAM, Disco duro de 40 GB con soporte antivibración (imprescindible para este tipo de aplicaciones), disquetera y lector de CD ROM. Para la adquisición de datos procedentes de los sensores se han instalado en el computador anterior dos tarjetas PCI800L, cuyas características principales son: 330 KHz de velocidad de muestro, 8 entradas analógicas diferenciales, 16 entradas y salidas digitales, 2 salidas analógicas independientes +/- 10 V y 12 bits de resolución de conversión. También se ha adquirido una tarjeta de contadores PCI-TMC12A, para obtener los valores de salida en frecuencia de algunos sensores. Las características principales son: 4 chips 8254 con 3 relojes/contadores cada uno lo que proporciona un total de 12 relojes/contadores de 16 bits y 16 bits de entrada y salida digital.

La conexión entre los sensores y las tarjetas se ha realizado de la siguiente forma (figura 5):

- Primera tarjeta de adquisición de datos se conectan los seis sónares, la brújula electrónica y el sensor de presión, así se utilizan los 8 canales analógicos diferenciales de entrada. También se utilizan las salidas analógicas y digitales para el control, tanto en movimiento de avance como de retroceso, de las dos orugas.
- Segunda tarjeta de adquisición de datos se utiliza la salida analógica y la digital, para el control de las electro válvulas del sistema de pulverización, los 8 canales de entrada analógica están disponibles para posibles adiciones de sensores al sistema.
- Tarjeta de contadores se utilizan dos contadores para cada uno de los codificadores ya que estos presentan dos salidas de 1024 pulsos por vuelta desfasadas para conocer el sentido de giro del mimo y en consecuencia el avance o retroceso de la plataforma móvil. Para obtener las medidas proporcionadas por el caudalímetro y el sensor de velocidad se utilizan dos contadores de la tarjeta.

Este sistema de computador industrial con sus tarjetas se encuentra instalado en la parte superior trasera de la plataforma móvil para facilitar el acceso del personal al mismo.

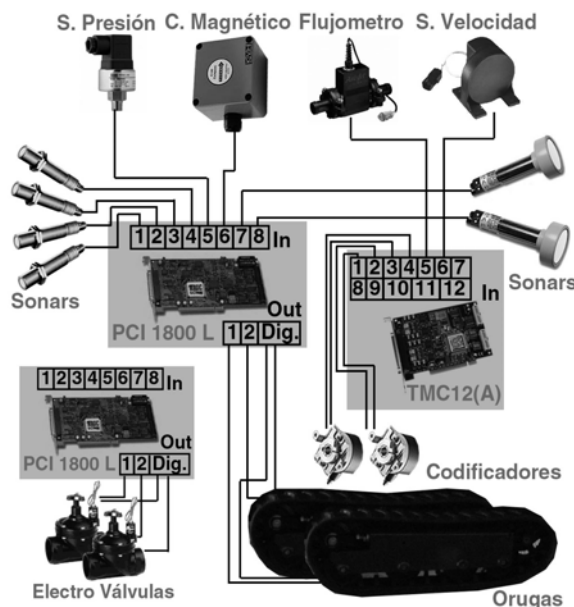


Figura 5. Conexionado de los sensores

3.3 HERRAMIENTA DE MEDIDA Y CONTROL

Ya que el sistema de medida y control se va a ejecutar bajo un computador industrial, se ha utilizado el Sistema Operativo *Windows 2000*

Service Pack 1 puesto que permite la utilización de entornos de desarrollo (*Borland C++ Builder*) que facilitan la labor de programación, depuración de los programas y presentación de los resultados. Evidentemente, en el desarrollo final, los algoritmos de control desarrollados y considerados como válidos de la pulverización y del sistema de navegación se implementarán en los sistemas empotrados que se van a desarrollar como controladores.

Basándose en el sistema a controlar explicado anteriormente (figura 4) se ha diseñado una herramienta de control que realiza las siguientes tareas:

1. Se inicia el reloj de control
2. Se realizan las lecturas de los sensores y se muestran en pantalla y se almacenan.
3. A partir de la lectura de los sensores y de la trayectoria prefijada se realiza la generación de la consignas de velocidad para cada una de las orugas.
4. Estas consignas se entregan al algoritmo de control de movimiento que realizará la acción de control pertinente.
5. En función de la velocidad de avance de la plataforma se genera la consigna de presión para la pulverización.
6. Esta consigna es entregada al algoritmo de control de la pulverización que realiza la acción de control pertinente.
7. Las acciones de control se envían a las salidas de las tarjetas, se actualiza el interfaz de presentación de datos de la herramienta, se almacenan los datos en le archivo de informe.

Al terminar este proceso se toma el valor del reloj que se inicializó al principio y comparando el tiempo transcurrido con el periodo de trabajo deseado, se calcula el tiempo que el sistema tiene que estar en espera mediante una interrupción para respetarlo. De esta manera se incluye dentro del cálculo los tiempos empleados no solo la lectura de sensores, decisión y salida, sino también el tiempo que tarda el software en comunicarse con las DLLs del sistema operativo y el tiempo de escritura en archivo. Experimentalmente se ha obtenido que el tiempo mínimo que tarda en realizar todas las operaciones la herramienta es de 10 milisegundos (siendo todas casi todas las medidas realizadas este valor pero nunca inferiores), así se ha establecido un máximo de 100 muestras por segundo no pudiendo ser el periodo de trabajo impuesto por el usuario inferior a éste.

El interfaz de la herramienta consta de tres fichas en las que se presenta toda la información necesaria para el usuario y mediante la cual se puede

interaccionar con ella. En la figura 6 se presenta la ficha de inicialización de la herramienta donde puede se inicializan todas la variables necesarias para la herramienta así como se define el nombre del archivo de informe donde se almacenarán todos los datos de medida de los sensores y de actuación sobre las válvulas.

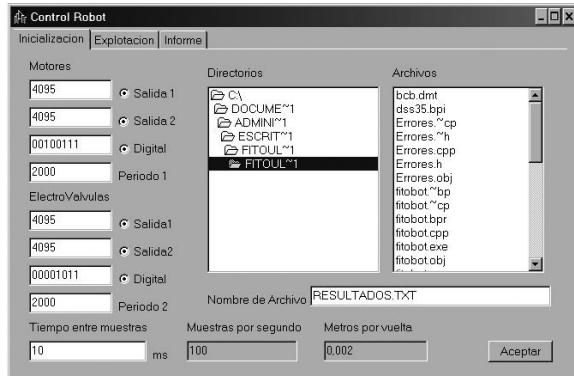


Figura 6. Ficha de Inicialización.

En la figura 7 se muestra la ficha que se ha denominado de explotación donde se muestra el valor de las medidas de los sensores y de los actuadores.

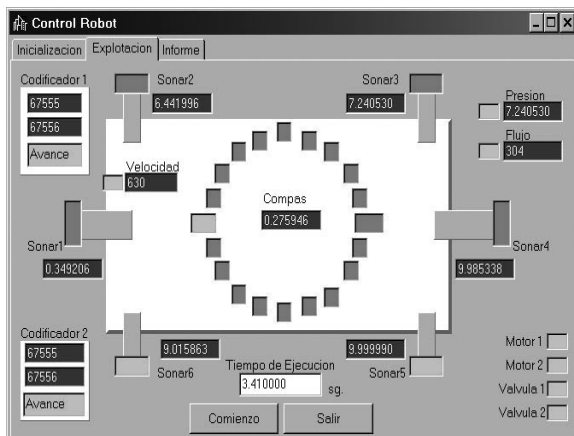


Figura 7. Ficha de explotación

La última ficha nos ofrece un informe detallado de los tiempos, valores tomados de los sensores, salidas producidas, etc (figura 8). Este informe es idéntico al que se ofrece en el archivo de salida y para un acceso rápido se muestra también en la propia herramienta.

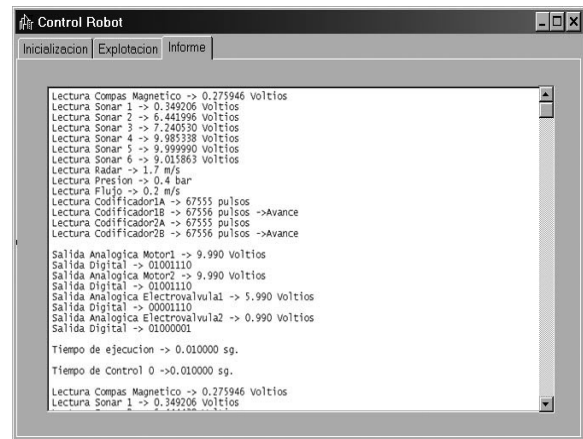


Figura 8. Ficha de informe

4 CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el trabajo realizado hasta el momento en el desarrollo del sistema de control de la plataforma móvil de aplicaciones fitosanitarias. Hasta el momento se han realizado pruebas de movimiento autónomo en laboratorio y entornos abiertos siendo estas satisfactorias, no obstante los algoritmos de navegación aún no han sido probados puesto que no se han realizado pruebas en invernadero.

Se busca que el sistema sea comercialmente competitivo por lo que se ha optado por un sistema de bajo coste y por tanto, el conjunto de sensores elegido es el que se ha considerado mínimo y aunque hay redundancia en información obtenida de los mismos, esta es necesaria para la correcta navegación del prototipo.

Como continuación del trabajo realizado hasta el momento cabe destacar la realización de ensayos en invernadero que validen la elección del conjunto de sensores y se considerará la posibilidad de la inclusión de otros. Se realizará la inclusión de algoritmos de navegación y posteriormente se llevará a cabo el desarrollo del sistema final que constará de un hardware dedicado que abaratará el coste total.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación a la CYCIT en los marco de los proyectos AGR2002-00982 AGR-FOR y DPI-2001-2380-C02-02, a la FIAPA por el proyecto Evaluación y mejora de los equipos de tratamientos fitosanitarios en cultivos protegidos y a CAJAMAR por el proyecto Diseño y ejecución de maquinaria adaptada a la distribución de productos fitosanitarios en invernadero. Además, se agradece al profesor Manuel Berenguel Soria las

ideas y observaciones realizadas con respecto a este trabajo.

Referencias

- [1] Adams, B.A; Conger, J.B; Troutt , P.E.; “Design of a mobile automated greenhouse sprayer”; Technical Report; Biosystems Engineering and Environmental Science Department; University of Tennessee; USA; 43 pp. (2003).
- [2] Escolá A., Solanelles F., Planas., Rosell J.R., 2002. “Electronic control system for proportional spraying to the canopy volume in tree crops.” International Conference on Agricultural Engineering, Budapest. p 02-AE-010. Spanish Journal of Agricultural Research, 2004. Vol.: 2, No 2.
- [3] Guzmán, J.L.; Medina, R.; Sánchez-Hermosilla, J.; Rodríguez, F.; Rodríguez, F.; 2004; “Pressure control of a mobile spraying system”. Spanish Journal of Agricultural Research; Vol.2; Nº 2; pp. 181-190.
- [4] Mandow, A; Gomez-de-Gabriel; J.M.; Martínez, J.L.; Muñoz, V.F.; Ollero, A. García-Cerezo, A.; “The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation”; IEEE Robotics & Automation; December; 3 (4); 18-28; (1996).
- [5] Moltó E, Martín B., Gutiérrez A., 2000. “Design and testing of an automatic machine for spraying at a constant distance from the tree canopy”. J Agr Eng Res 77(4), 379-384.
- [6] Moltó E, Martín B., Gutiérrez A., 2001. “Pesticide loss reduction by automatic adaptation of spraying on globular trees”. J Agr Eng Res 78(1), 35-41.