

DETECCIÓN Y TRATAMIENTO PRECISO DE MALAS HIERBAS CON UNA FLOTA DE ROBOTS AUTÓNOMOS AÉREOS Y TERRESTRES

Ribeiro A.^{1*}, Fernández-Quintanilla C.², Dorado J.²,
López-Granados F.³, Peña J.M.³; Pérez-Ruiz M.⁴,
Agüera J.⁵, González-De-Santos P.¹

¹*Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM, Arganda del Rey, España.*

²*Instituto de Ciencias Agrarias, CSIC, Madrid, España.*

³*Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Córdoba, España.*

⁴*Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos,
Universidad de Sevilla, España.*

⁵*Dpto. Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba, España.*

* *angela.ribeiro@csic.es*

Resumen: El proyecto RHEA (Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management) financiado por el 7º Programa Marco de la CE se centró en el diseño, desarrollo y evaluación de una nueva generación de sistemas robotizados para el control tanto químico como físico de plagas incluyendo malas hierbas. RHEA abordó las aplicaciones mediante una flota de robots compuesta por vehículos aéreos no tripulados (UAV) y vehículos terrestres no tripulados (UGV), equipados con sistemas avanzados de percepción, aperos inteligentes y algoritmos de toma de decisiones. Este artículo describe aspectos importantes de la arquitectura RHEA y detalla los ensayos llevados a cabo en la Finca Experimental La Poveda del CSIC (Madrid) donde se trató, con el sistema descrito, más del 97% de las zonas infestadas de malas hierbas en dos parcelas de trigo.

Palabras clave: Agricultura de precisión, drones, robots autónomos, teledetección.

Summary: *Detection and accurate treatment of weeds with a fleet of autonomous aerial and ground robots.* The RHEA project (Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management) funded by the 7th EC Framework Programme focused on the design, development and assess of a new generation of automated and robotic systems for both chemical and physical management of pests including weed control. RHEA addressed the crop treatments by a reconfigurable

fleet of robots composed by unmanned aerial vehicles (UAV) and unmanned ground vehicles (UGV) equipped with advanced perception systems, intelligent implement and enhanced decision-making algorithms. This paper describes important aspects of the RHEA architecture and details the trials conducted at the Experimental Farm La Poveda (Madrid) where over 97% of the weed infested areas in two wheat crops were treated by the described system.

Keywords: Precision agriculture, drones, autonomous robots, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El control seguro y efectivo de las malas hierbas según los principios preconizados por la Agricultura de Precisión requiere una tecnología específica, avanzada y de coste asumible dentro de los márgenes de beneficio. El uso de plataformas móviles autónomas tanto terrestres como aéreas equipadas con sistemas de percepción innovadores, sistemas inteligentes de toma de decisión y herramientas que permitan la aplicación precisa de los tratamientos herbicidas, reduce el coste asociado a la operación así como los potenciales daños ambientales y el riesgo para los agricultores. Varios son los grupos internacionales de investigación dedicados al desarrollo de tecnología robótica capaz de optimizar las operaciones complejas implicadas en un tratamiento de precisión.

El desarrollo de sistemas autónomos de ayuda al control preciso de malas hierbas es el objetivo principal del proyecto RHEA (Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management), financiado por el 7º Programa Marco de la CE y dirigido a minimizar los insumos (agroquímicos, combustible, etc.) a la vez que se garantiza la calidad y seguridad del producto así como la cobertura total del campo independientemente del tamaño que éste tenga. RHEA propone utilizar una flota de robots pequeños/medianos tanto aéreos como terrestres para la inspección/monitorización y posterior aplicación de fitosanitarios, lo que presenta múltiples ventajas frente al tratamiento basado en una máquina de mayores dimensiones más tradicional. Entre otras, una flota de robots de tamaño pequeño/mediano reduce el impacto sobre la compactación del suelo e interactúa de un modo más seguro con los operarios ya que la detección e interacción se puede distribuir en varios sistemas de detección y gestión de fallos. Además, con un buen método de planificación (Conesa et al., 2012) es posible determinar el número óptimo de vehículos para cubrir con coste mínimo un área concreta, o determinar un nuevo plan de ruta para los vehículos en el caso de que alguno de ellos falle. Esta capacidad de planificación convierte la propuesta en escalable o lo que

es lo mismo, la dimensión de la flota se adapta fácilmente al tamaño del campo y las necesidades de las tareas a realizar.

A continuación se describen los aspectos más importantes de los módulos que integran la arquitectura RHEA y se presenta un resumen de los resultados de los ensayos de campo llevados a cabo en enero y mayo de 2014 en la Finca Experimental La Poveda (CSIC, Madrid).

MATERIAL Y MÉTODOS

En RHEA se consideran dos tipos de misiones: 1) de *inspección/monitorización* realizadas por los UAV (en inglés *unmanned aerial vehicles*) de la flota, cuyo objetivo es la captura de un número suficiente de imágenes aéreas que permita la construcción posterior del mapa de distribución de malas hierbas y 2) de *aplicaciones* llevadas a cabo por los UGV (en inglés *unmanned ground vehicles*) de la flota y cuyo objetivo es la realización de un tratamiento preciso basado en los mapas previos de infestación de malas hierbas obtenidos con los UAVs (percepción remota) o en la información suministrada en tiempo real por el equipo de percepción a bordo de los UGVs. El enfoque es generalista abordando tres tipos de escenarios: la pulverización de precisión de malas hierbas en cultivos de cereal, el control térmico y mecánico de las malas hierbas en cultivos de maíz y la pulverización de árboles, en particular de olivos.

RHEA está constituido principalmente por seis subsistemas que se organizan de forma jerárquica (véase Figura 1): 1) La *Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)*, que permite al operador definir la misión y controlar la flota de robots. 2) El *Director de Misiones*, que establece el plan de rutas y las actuaciones tanto para los vehículos aéreos como terrestres (en la Figura 1 *Planificador Aéreo* y *Planificador Terrestre*) y gestiona el control automático de los vehículos autónomos, aéreos y terrestres, supervisándolos durante la misión (en la Figura 1 *Supervisor de Misión de Inspección* y *Supervisor de Misión de Tratamiento*). Tanto el subsistema *GUI* como el subsistema *Director de Misiones*, que son la parte superior de la jerarquía, están alojados en un ordenador que se encuentra en la *Estación Base*. 3) Las *Unidades Móviles*, vehículos tanto aéreos como terrestres no tripulados (UAVs y UGVs) controlados por sistemas inteligentes de toma de decisiones de alto nivel (*AUHLC* para los UAVs y *HLDMS* para los UGVs) (Emmi et al., 2014). 4) Los *Aperos* transportados por los UGVs, que pueden realizar un control térmico-mecánico (Frasconi et al., 2014) o químico de las malas hierbas (Pérez- Ruiz et al., 2014) o una aplicación de plaguicidas dirigida a árboles. 5) *Sistemas de Percepción* tanto los embarcados en los UAVs, encargados de la recogida de las imágenes aéreas (Torres-Sánchez et al., 2014), como los que van a bordo de los UGVs, responsables de la detección de las malas hierbas en

tiempo real, de los obstáculos así como de las líneas de cultivo que son la base de la navegación autónoma de los UGV en cultivos como el maíz (Guerrero et al., 2012). 6) *Sistemas de Localización y Comunicaciones* (Drenjanac et al., 2014), que proporcionan la ubicación de las unidades móviles a partir de receptores GNSS-RTK y que gestionan el intercambio de información entre los equipos fijos y móviles.

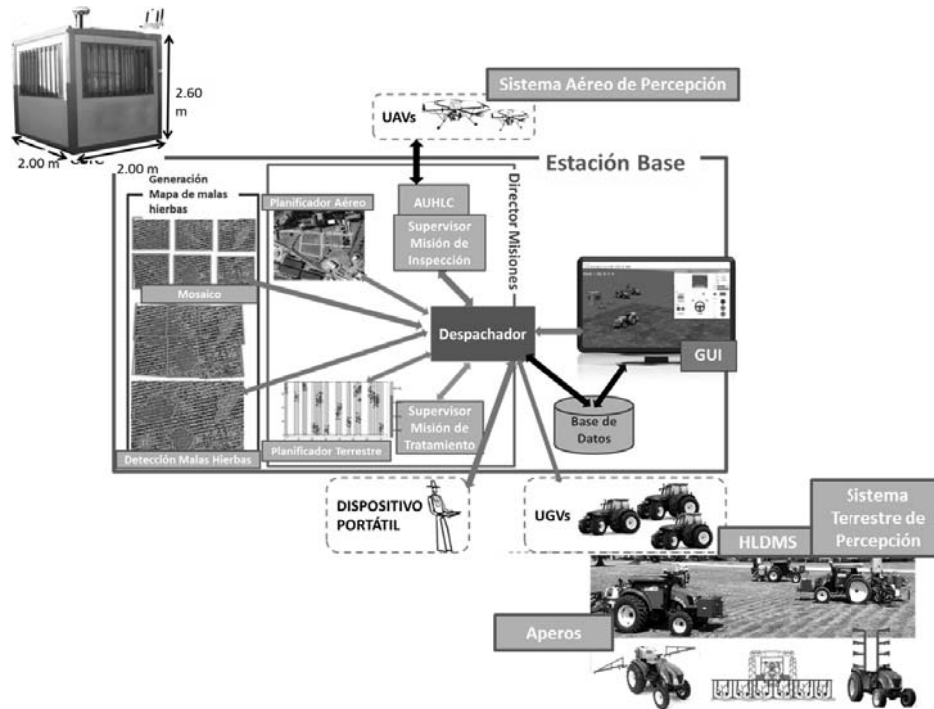


Figura 1. Esquema que describe la arquitectura de RHEA: Subsistemas principales y la interconexión entre ellos.

Otros módulos de interés mostrados en la Figura 1 son: el *Dispositivo Portátil*, especialmente útil en la reparación de vehículos en campo ya que permite la monitorización y el control de la flota a pie de máquina, y el *Despachador*, encargado de gestionar las solicitudes realizadas por el operario, es decir las ordenes que proviene de la *GUI* o del *Dispositivo Portátil*, transmitiéndolas al correspondiente módulo especializado de la arquitectura RHEA.

Los ensayos llevados a cabo tenían por objeto la evaluación principalmente de dos aspectos: 1) la precisión de la operación de pulverización (velocidad de aplicación 8 km h^{-1} y el volumen de agua de 200 L ha^{-1}) y 2) la desviación de las trayectorias de los UGVs del plan de ruta establecido.

Para evaluar el primer aspecto, se establecieron artificialmente nueve rodales de malas hierbas en un cultivo de trigo de invierno, sembrando semillas de mostaza en cuadrados de 9 m² y protegiendo estos cuadrados con una lámina de plástico cuando se realizaban los tratamientos herbicidas necesarios para mantener el resto de la superficie libre de malas hierbas. En cada rodal se distribuyeron cinco tiras de 10 cm de ancho de papel blanco, en la dirección de la marcha del UGV y dispuestas en paralelo con una separación de 1 metro, es decir, tres tiras dentro y dos fuera del rodal. El objetivo era medir con precisión centimétrica el desplazamiento de la zona de pulverización debido al retraso en la apertura/cierre de las boquillas, así como estimar los porcentajes de las áreas objetivo; tanto pulverizadas como no pulverizadas. Asimismo se distribuyeron al azar un total de 100 etiquetas de papel de 10 cm × 10 cm para comprobar que no se pulverizaban zonas que no fuesen objetivo, es decir las no infestadas. La pulverización la realizaba un UGV que transportaba el equipo de pulverización accionándolo en función de un plan (ruta y ordenes de apertura/cierre de boquillas) elaborado por el *Planificador Terrestre* a partir del mapa de distribución de malas hierbas obtenido con los UAVs (misión de inspección). Para la evaluación de la precisión del tratamiento se aplicó agua teñida con un colorante azul, lo que permitía definir claramente las zonas tratadas.

Para medir la desviación del plan de ruta establecido por el *Planificador*, la trayectoria objetivo o de referencia se marcó con una cinta blanca de 80 m que conectaba dos extremos de la parcela y la trayectoria realmente seguida por el UGV se extrajo de la huella producida por las ruedas durante el recorrido. Se realizaron dos mediciones en dos momentos diferentes, registrando la distancia entre trayectorias (referencia y real) en 24 puntos separados 3 m (prueba 1) y en 16 puntos separados 5 m (prueba 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que se pulverizó más del 97% de las áreas objetivo (rodales de malas hierbas) aunque se observaron ligeros retrasos en la apertura y cierre de las boquillas en los bordes de los rodales (Figura 2a). Una aplicación que garantice un tratamiento efectivo tiene que corregir el ligero retraso en la apertura a fin de evitar que una parte de rodal quede sin tratar, esto se puede lograr adelantando la orden de apertura considerando las limitaciones del equipo y evitando utilizar más herbicida.

En cuanto a las trayectorias, la Figura 2b muestra que el vehículo autónomo siguió con gran precisión la trayectoria sin apenas desviarse del plan de ruta establecido. Teniendo en cuenta que las continuas correcciones de la trayectoria del vehículo deben hacerse en tiempo real, se

observaron desviaciones inferiores a 7 cm en las medidas comprendido entre los percentiles 25 y 75 respecto a la trayectoria definida en las dos pruebas realizadas.

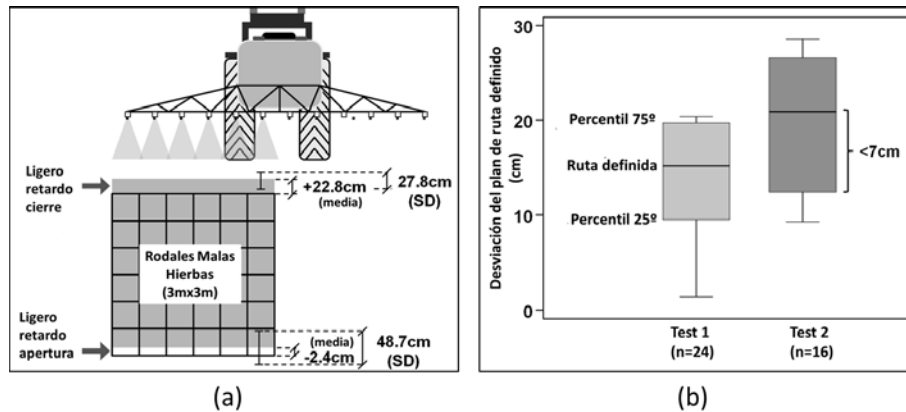


Figura 2. (a) Precisión en la apertura y cierre de las boquillas de pulverización de herbicida respecto al área objetivo. (b) Diferencias en las dos pruebas realizadas entre trayectoria real seguida por el vehículo y la trayectoria establecida.

La flota se evaluó también en otros dos escenarios: 1) El control físico de malas hierbas en maíz con la detección en tiempo real de la infestación a partir de una cámara RGB situada en la parte delantera del robot. En este escenario, en la zona entre hileras se realizó un control mecánico no selectivo (cultivador) y dentro de la hilera un control térmico selectivo, consistente en quemadores de gas de petróleo licuado (LPG) que actuaban cuando se detectaba la infestación. 2) La aplicación de plaguicidas en olivos como ejemplo de la utilización de la flota en el tratamiento de árboles.

Por último para probar el buen funcionamiento cooperativo de los vehículos terrestres, en cada tipo de tratamiento uno de los vehículos transportaba el apero adecuado mientras que los otros dos vehículos se movían simulando la realización del tratamiento. Los resultados mostraron que los tres tractores autónomos eran capaces de trabajar juntos siguiendo los planes de ruta establecidos, con la supervisión continua del *Director de Misiones* que detectaba y resolvía las situaciones de conflicto (Conesa-Muñoz et al., 2015).

En la página web del proyecto RHEA (www.rhea-project.eu/) se pueden encontrar videos de los dos días de demostración realizadas en enero y mayo de 2014.

A la vista de los resultados se puede concluir que los prototipos diseñados, desarrollados y evaluados muestran la validez de un nuevo concepto

que propone la aplicación de una flota de robots autónomos aéreos y terrestres de pequeña/mediana envergadura que colaboran para lograr un tratamiento preciso de malas hierbas.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto financiado por el 7^o Programa Marco de la Unión Europea (Grant Agreement No. 245986). Agradecimiento a todos los socios de RHEA: CSIC (España), CogVis (Austria), FTW (Austria), Cyberbotics (Suiza), Universidad de Pisa (Italia), Universidad Complutense de Madrid (España), Tropical (Grecia), Soluciones Agrícolas de Precisión, S.L. (España), Universidad Politécnica de Madrid (España), AirRobot (Alemania), Universidad de Florencia (Italia), IRSTEA (Francia), CNH (Bélgica), Bluebotics (Suiza) y CM (Italia).

BIBLIOGRAFÍA

- CONESA-MUÑOZ J, RIBEIRO A, ANDUJAR D, FERNANDEZ-QUINTANILLA C & DORADO J (2012) Multi-path planning based on a NSGA-II for a fleet of robots to work on agricultural tasks. In: 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2012 n. 6256629.
- CONESA-MUÑOZ J, GONZALEZ-DE-SOTO M, GONZALEZ-DE-SANTOS P & RIBEIRO A (2015) Distributed multi-level supervision to effectively monitor the operations of a fleet of autonomous vehicles in agricultural tasks. *Sensors* 15, 5402-5428.
- DRENJANAC D, TOMIC S, AGÜERA J & PEREZ-RUIZ M (2014) Wi-fi and satellite-based location techniques for intelligent agricultural machinery controlled by a human operator. *Sensors* 14, 19767-19784.
- EMMI L, GONZALEZ-DE-SOTO M, PAJARES G & GONZALEZ-DE-SANTOS P (2014) Integrating sensory/actuation systems in agricultural vehicles. *Sensors* 14, 4014-4049.
- FRASCONI C, MARTELLONI L, FONTANELLI M, RAFFAELLI M, EMMI L, PIRCHIO M & PERUZZI A (2014) Design and full realization of physical weed control (PWC) automated machine within the RHEA project. In: 2nd International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and forestry (RHEA 214) 3-11.
- GUERRERO JM, PAJARES G, MONTALVO M, ROMEO J & GUIJARRO M (2012) Support Vector Machines for crop/weeds identification in maize fields. *Expert Systems with Applications* 39, 11149-11155.

PEREZ-RUIZ M, GONZALEZ-DE-SANTOS P, RIBEIRO A, FERNANDEZ-QUINTANILLA C, PERUZZI A, VIERI M, TOMIC S & AGÜERA J (2014) Highlights and preliminary results for autonomous crop protection. *Computers and Electronics in Agriculture* 110, 150-161.

TORRES-SÁNCHEZ J, PEÑA JM, DE CASTRO AI & LÓPEZ-GRANADOS F (2014) Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103, 104-113.