

Desarrollo y validación de un sistema de ajuste de la intensidad de tratamiento mecánico de malas hierbas a través del análisis automático de imágenes

Development and validation of a system for adjusting the intensity of mechanical weed treatment using automatic image analysis

Michael Spaeth¹, Hugo Moreno², Roland Gerhards¹, Victor Rueda-Ayala³, Juan Ramón Andújar², Juan Morillo-Barragan⁴, Adrià Gómez² & Dionisio Andújar^{2,*}

¹ *Herbologie, Universidad de Hohenheim, Stuttgart, Alemania*

² *Centro de Automática y Robótica, Consejo Superior Investigaciones Científicas (CSIC), Ctra. de Campo Real km 0.200 La Poveda, 28500, España*

³ *AGROSCOPE, Nyon, Vaud, Route de Duillier 50, Suiza*

⁴ *Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura, Badajoz, España*

(*E-mail: d.andujar@csic.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.34976>

Recibido/received: 2024.01.15

Aceptado/accepted: 2024.02.28

RESUMEN

El desarrollo de un sistema de ajuste automático del ángulo de incidencia de las púas de una rastra mediante el procesamiento de imágenes próximas permite adaptar la intensidad del tratamiento de malas hierbas en tiempo real. En este estudio se implementaron un conjunto de sensores y actuadores para lograr un sistema de tratamiento localizado, en base un apero comercial, para aumentar la selectividad de un tratamiento mecánico de malas hierbas en cereal. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y probar un algoritmo para ajustar automáticamente la fuerza ejercida por las púas contra el suelo, variando su ángulo de incidencia en base a la densidad de mala hierba. Sobre un conjunto de cámaras RGB, se adquirirían imágenes que se procesaban en tiempo real para el cálculo del porcentaje de cobertura vegetal. La fuerza de arrastre del suelo opuesta a la dirección de desplazamiento se midió con una célula de carga conectada a una púa rígida montada delante de la rastra. Los niveles óptimos de intensidad se obtuvieron en experimentos realizados previamente, basándose en la eficacia del control de las malas hierbas y el aumento del rendimiento del cultivo. El procesamiento de las imágenes produce un conjunto de datos que sirve como entrada para la generación de las señales de control, en base a un sistema de toma de decisiones, cifradas a través del protocolo ISOBUS para el ajuste del ángulo de incidencia de las púas sobre el terreno. A su vez estos datos permanecen almacenados a través de un FMIS (Farm Management Information System).

Palabras clave: Control mecánico, Análisis de Imagen, FMIS, ISOBUS.

ABSTRACT

A system for automatically adjusting the angle of incidence of the tines of a harrow by processing nearby images allows the intensity of the treatment to be adapted in real time. In this study, precision agriculture technologies were implemented in a commercial implement to increase the selectivity of a mechanical treatment of weeds in cereal. The objective was to develop and test an algorithm to automatically adjust the force exerted by the tines against the ground, varying their angle of incidence, and the number of passes. Images were acquired on a set of RGB cameras and processed in real time to calculate the percentage of vegetation cover. The ground drag force opposite the direction of travel was measured with a load cell connected to a rigid spike mounted in front of the stand. The optimal intensity levels were obtained in previously carried out experiments, based on the effectiveness of weed control and increase in crop yield. The processing of the images generated a set of data that was stored and subsequently analyzed through an FMIS (Farm Management Information System). This same input was used to generate control signals, based on a decision-making system, encrypted through the ISOBUS protocol to adjust the angle of incidence of the tines on the ground.

Keywords: Mechanical Control, Image Analysis, FMIS, ISOBUS.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento mecánico de malas hierbas necesita herramientas de apoyo para ajustar la intensidad del tratamiento según las condiciones del cultivo y del suelo para lograr un tratamiento adaptado a las necesidades de cada zona del terreno. Un grado de incidencia de las púas inadecuado puede causar daños al cultivo. En las últimas décadas, se han llevado a cabo varios intentos por mejorar el control mecánico de malas hierbas variando la intensidad de tratamiento. Rueda-Ayala *et al.* (2015) determinaron la densidad de malas hierbas con un sensor de ultrasonidos e incluyeron los datos en un algoritmo de toma de decisiones para variar la intensidad del tratamiento en tiempo real. Así, pudieron aumentar la intensidad del tratamiento en áreas donde la densidad de malas hierbas era elevada y reducirla en aquellas zonas con media y baja infestación. Sin embargo, hasta el momento, ninguno de los algoritmos desarrollados ha sido lo suficientemente preciso como para ajustar el ángulo de incidencia en las nuevas rastras con variación hidráulica de las púas. Los sistemas de tratamiento variable han demostrado la capacidad para reducir el uso de herbicidas, o eliminarlo en el caso de tratamientos mecánicos, y conseguir un control más eficaz de las malas hierbas, pero la variedad de información necesaria para un ajuste adecuado, la complejidad de los sistemas de sensores y su coste podrían explicar la falta de sistemas adecuados para el control en tiempo real (Gerhards *et al.*, 2021). El objetivo de este estudio fue desarrollar, implementar y probar un algoritmo capaz de evaluar el grado de cobertura de malas hierbas que ayudara a la toma de decisiones para modificar la intensidad del tratamiento mecánico de malas hierbas en tiempo real. Se diseñó un sistema de análisis de imágenes para calcular la cobertura de malas hierbas, de suelo y de cultivo (CSC) real, y un controlador en la rastra para variar el ángulo de incidencia de las púas en base a un sistema de toma de decisiones. El objetivo era comparar el CSC con un valor umbral preestablecido y transferir la decisión al sistema hidráulico que regula el ángulo de las púas para ajustar la intensidad del tratamiento. Además, durante este proceso se almacenaba la telemetría en un FMIS (Farm Management Information System) para la gestión de datos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se establecieron varias parcelas experimentales de trigo y cebada donde se comparó el control de mala hierba en base a diferentes intensidades fijas de tratamiento. Los resultados de estos experimentos preliminares se utilizaron para el desarrollo del sistema de toma de decisiones. Paralelamente se establecieron otras parcelas experimentales que se utilizaron para llevar a cabo el tratamiento variable. El experimento en ambos cultivos se llevó a cabo en la estación experimental Ihinger Hof de la Universidad de Hohenheim (Stuttgart, Alemania). Se evaluó la eficacia de del tratamiento sobre la abundancia de malas hierbas y la cobertura del cultivo. La abundancia de malas hierbas se registró en cuatro marcos de 0,1 m² por parcela. La cobertura del cultivo se estimó mediante imágenes, utilizando dos cámaras RGB, modelo AD-130-GE montadas en la parte delantera y trasera de la grada a 4 fps y a una altura de 1 m sobre el suelo. El campo de visión fue de 0,2 m². El índice ExGR se calculó a partir de las tres capas de color de las imágenes procesadas en RGB (Mink *et al.*, 2018) para realzar el contraste entre la vegetación verde y el suelo. Este valor se utiliza como entrada para variar el ángulo de incidencia de las púas. Por otro lado, el valor CSC se define como la parte del cultivo que queda cubierta por el suelo, después del tratamiento, es decir, aquella parte del cultivo enterrada tras el pase de rastra. El % de CSC se



Figure 1 - La posición del cilindro hidráulico se regula a través de un controlador mediante válvulas magnéticas. El controlador decide en función de la posición del cilindro en qué dirección se puede variar el ángulo de las púas.

calculó comprando imágenes de antes y después del paso de la rastra. Al final de ciclo de cultivo se cosechó el grano y se determinó su peso seco para la comparación del rendimiento neto de las diferentes parcelas experimentales.

Las cámaras, el DSS (Sistema de toma de decisiones) y el controlador se integraron en una grada de 6 m de ancho (Hatzenbichler) con púas flexibles (distancia entre púas de 25 mm, diámetro de púas de 6 mm, seis filas de púas) y ajuste hidráulico del ángulo de las púas. La grada está dividida en cuatro secciones de 1,5 m. Para este estudio, el ángulo de las púas en las cuatro secciones se controló por igual. Para el ajuste en tiempo real de la intensidad del ángulo de incidencia de las púas se utilizaron cuatro cilindros hidráulicos, uno por sección, variando el ángulo de las púas en base a su extensión. El valor real de CSC se comparó con un valor umbral preestablecido (10%). Cuando el CSC real era superior al umbral, se redujo el ángulo de las púas para evitar daños al cultivo, mientras que este ángulo se aumentó cuando el CSC era inferior al umbral, permitiendo así una mayor eficacia en el control de malas hierbas. Concretamente, el ángulo de las púas se ajustó en pasos de 15° en tiempos de respuesta inferiores a 1 s. Las imágenes capturadas se transfirieron a un controlador externo. El controlador está asociado a un software de reconocimiento de imágenes y un DSS. El actuador del controlador registra las posiciones de los cilindros hidráulicos a través de una interfaz CAN bus diseñada para este proceso. En los extremos de extensión del vástago se evita la generación de señal para disminuir o aumentar el ángulo de las púas cuando el cilindro está completamente expandido o comprimido y dañar el mecanismo.

Para gestionar eficientemente las medidas de cobertura y optimizar la intensidad del tratamiento, el sistema de información de gestión agrícola (FMIS) desempeña un papel crucial. Las cámaras montadas en la grada capturaron imágenes del campo durante el funcionamiento de la rastra para la toma de decisiones y el cálculo de CSC. El FMIS almacena los datos del CSC en su base de datos, lo que permite un fácil acceso y análisis. Estos datos sirven como base para generar informes y gráficos que permiten seguir el crecimiento de los cultivos e identificar áreas que requieran atención. Además, el FMIS puede integrar datos de

fuentes externas, como estaciones meteorológicas y pronósticos meteorológicos, para incorporar las condiciones climáticas más específicas y localizadas en la toma de decisiones.

RESULTADOS

Se observó que la cobertura del cultivo aumentó más rápido en las parcelas tratadas que en las parcelas control. Catorce días después del tratamiento, la cobertura de suelo por el cultivo fue mayor en parcelas tratadas que, en las parcelas no tratadas, es decir, el tratamiento estimuló el mayor desarrollo del cultivo respecto a las parcelas control. La menor recuperación del cultivo de trigo se observó a partir del 12% de CSC, mientras que la cebada pudo incluso compensar un 41% de CSC y superar el desarrollo de cultivo de las parcelas control no tratadas catorce días después del tratamiento. Estos resultados indican que la rastra estimuló el crecimiento del cultivo durante el desarrollo vegetativo, cuando la intensidad del tratamiento no era demasiado alta. El hecho de que el cultivo pudiera compensar el 10% de CSC en todas las parcelas experimentales justifica la selección de este umbral de tratamiento en la decisión del ajuste automático del ángulo de las púas. La intensidad del tratamiento no tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento del cultivo. Los rendimientos de cosecha tampoco fueron significativamente diferentes del control no tratado. El rendimiento del cultivo no varió significativamente entre parcelas tratadas y parcelas control y tampoco fue altamente diferente entre distintas intensidades del tratamiento. Sin embargo, los rendimientos de las parcelas con un tratamiento de baja intensidad fueron mayores a los rendimientos de las parcelas control. Es decir, aquellas parcelas tratadas con un ángulo de incidencia de las púas menos agresivo, fueron ligeramente superiores a los de los controles no tratados. Las intensidades más altas a menudo resultaron en rendimientos más bajos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este nuevo enfoque combina el análisis de imágenes digitales con un sistema de control en línea que ajusta automáticamente la intensidad del tratamiento mecánico en cereal para el control de malas

hierbas en post-emergencia temprana. Los efectos de la rastra sobre los cultivos y las malas hierbas probablemente son complejos. El modelo de Rasmussen *et al.* (2008, 2009) relaciona el efecto positivo (control de malas hierbas) con el impacto negativo (cobertura de cultivo y dañado por el tratamiento) medido inmediatamente después del tratamiento. Además del control de malas hierbas, la rastra puede tener efectos positivos adicionales en el desarrollo de los cultivos, como una inducción del ahijado (Rueda-Ayala *et al.*, 2015). En el presente estudio, el crecimiento de los cultivos tras el tratamiento compensó entre un 12% y un 41% el enterramiento de las hojas del cultivo por la rastra. Dos semanas después del pase de rastra, la cobertura del cultivo en las parcelas tratadas fue igual o mayor que en el control no tratado. De modo similar, Rasmussen *et al.* (2010) encontraron una compensación de CSC del 23% al 33%, consiguiendo un 80% de control de malas hierbas en todas las combinaciones de tratamientos. A partir de los resultados de este estudio se estableció un umbral máximo de 10% de CSC para estar en el rango óptimo de control de mala hierba y minimizar el daño al cultivo en los cultivos del experimento. El sistema automático de ajuste de la grada funcionó correctamente y es robusto en condiciones de campo heterogéneas. En el modo automático, el CSC, calculado comparando imágenes tomadas antes y después del tratamiento, correspondió bien al valor umbral establecido en el controlador con una desviación estándar más baja que para el control manual. La desviación del valor umbral de CSC alcanzado osciló entre el 1,5% y el 3%. El error estándar aumentó con umbrales pre-establecidos más altos en la regulación automática

debido al enterramiento extremadamente alto de las hojas del cultivo con la mayor intensidad de tratamiento. Sin embargo, fue más bajo que el ajuste manual. El beneficio de un ajuste automático de la intensidad es mayor en campos con desarrollo de cultivos heterogéneos. Un ajuste manual constante dañaría el cultivo en áreas con poco desarrollo y reduciría la eficacia del control de malas hierbas en zonas del campo con un fuerte crecimiento del cultivo. Rueda-Ayala *et al.* (2013) también observaron una mayor eficacia en el control de malas hierbas y un ajuste preciso a las variaciones localizadas de las condiciones del campo con una regulación automática de la intensidad en campos con suelos heterogéneos. La eficacia del tratamiento no difirió entre especies de malas hierbas, pero dependió del estadio de desarrollo de las plantas. Las malas hierbas en fase de cotiledones se controlaron mejor que las malas hierbas más grandes. Un beneficio importante del desarrollo actual es su simplicidad y robustez. Las variaciones del ángulo de las púas se realizan basándose en un parámetro simple (CSC) que se puede evaluar en línea mediante cámaras RGB de bajo coste.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la AEI (Ministerio de Ciencia e Innovación, España), número TED2021-130031B-I00, por “ERDF A way of making Europe”, por la “Unión Europea” o por la “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR” y PID2020-113229RBC43/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- Gerhards, R.; Späth, M.; Sökefeld, M.; Peteinatos, G.G.; Nabout, A. & Rueda Ayala, V. (2021) - Automatic adjustment of harrowing intensity in cereals using digital image analysis. *Weed Research*, vol. 61, n. 1, p. 68–77. <https://doi.org/10.1111/wre.12458>
- Mink, R.; Dutta, A.; Peteinatos, G.G.; Sökefeld, M.; Engels, J.; Hahn, M. & Gerhards, R. (2018) -Multi-temporal site-specific weed control of *Cirsium arvense* (L.) Scop. and *Rumex crispus* L. in maize and sugar beet using Unmanned Aerial Vehicle based mapping. *Agriculture*, vol. 8, n. 5, art. 65. <https://doi.org/10.3390/agriculture8050065>
- Rasmussen, J.; Bibby, B.M. & Schou, A.P. (2008) - Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods. *Weed Research*, vol. 48, n. 6, p. 523–532. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00661.x>
- Rasmussen, J.; Nielsen, H.H. & Gundersen, H. (2009) - Tolerance and selectivity of cereal species and cultivars to postemergence weed harrowing. *Weed Science*, vol. 57, n. 3, p. 338–345. <https://doi.org/10.1614/WS-08-109.1>
- Rasmussen, J.; Mathiasen, H. & Bibby, B.M. (2010) - Timing of post-emergence weed harrowing. *Weed Research*, vol. 50, n. 5, p. 436–446. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00799.x>
- Rueda-Ayala, V.; Weis, M.; Keller, M.; Andújar, D. & Gerhards, R. (2013) - Development and testing of a decision making based method to adjust automatically the harrowing intensity. *Sensors*, vol. 13, n. 5, p. 6254–6271. <https://doi.org/10.3390/s130506254>
- Rueda-Ayala, V.; Peteinatos, G.; Gerhards, R. & Andújar, D. (2015) - A non-chemical system for online weed control. *Sensors*, vol. 15, n. 4, p. 7691–7707. <https://doi.org/10.3390/s150407691>