



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

**DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES E
INGENIERÍA TELEMÁTICA**

TESIS DOCTORAL:

**CONTRIBUCIONES EN EL ÁREA DEL GUIADO
AUTÓNOMO DE TRACTORES AGRÍCOLAS BASADO EN LA
UTILIZACIÓN DE RECEPTORES GPS DE BAJO COSTE:
MEJORA DE LA ESTABILIDAD Y DE LA PRECISIÓN DE
ESTOS SISTEMAS MEDIANTE EL DESARROLLO DE
LEYES DE CONTROL ASINTÓTICAMENTE ESTABLES Y
MÉTODOS GEOMÉTRICOS**

Presentada por Sergio Alonso García para optar al grado de
doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Jaime Gómez Gil

Resumen

Los sistemas de guiado autónomo agrícola son sistemas que permiten guiar a un vehículo agrícola por diversas trayectorias predefinidas sin necesidad de intervención del conductor. Durante los últimos 20 años han sido muchos los estudios científicos que se han realizado en este área. La mayor parte de estos trabajos se han centrado en los sensores de posicionamiento y en las leyes de control, puesto que constituyen los bloques de mayor complejidad dentro de los sistemas de guiado autónomo. El sensor de posicionamiento más empleado ha sido el GPS diferencial de fase (RTK-CDGPS). Este sensor tiene la ventaja sobre otros sensores como cámaras, láser, sistemas de radiofrecuencia, etc de proporcionar un posicionamiento absoluto para toda la parcela, con gran precisión, y sin necesidad de balizas o marcas en la parcela. Sin embargo, presenta el problema de tener un alto coste, incrementando de forma significativa el coste total del sistema y limitando su difusión.

Por este motivo, en esta tesis se realiza el estudio del guiado con receptores GPS de bajo coste y se desarrollan diversas leyes de control y metodologías para mejorar su adaptación. En primer lugar, se analiza la validez de estos receptores para el guiado agrícola. Para ello, se estudia el error de posicionamiento de este tipo de receptores, el guiado en línea recta y la respuesta escalón de diferentes leyes de control comúnmente utilizadas en la literatura científica (Artículo 1 del compendio). En segundo lugar, se desarrolla una ley de control para el guiado en línea recta y en circunferencia, asintóticamente estable y convergente desde cualquier orientación del vehículo (Artículo 2 del compendio). Finalmente, en tercer lugar, se estudia el posicionamiento de la antena del receptor sobre el tractor y su influencia sobre el guiado y se desarrolla un método geométrico para incrementar la estabilidad, respuesta y tolerancia a ruido de los sistemas de guiado con receptores de bajo coste (Artículo 3 del compendio).

Para la realización de los estudios experimentales se ha implementado un sistema para el control de la posición de la dirección de un tractor agrícola. Este sistema consistía en un motor eléctrico unido al volante del tractor mediante una polea, un encoder para la realimentación de la posición de la dirección y la electrónica necesaria para su control.

RESUMEN

Como resultados, en el primer artículo del compendio se ha obtenido que es posible el guiado autónomo agrícola con receptores de bajo coste hasta velocidades de 9 Km/h, con precisiones relativas totales de 1.25 m y que la mayor parte del error en el guiado se produce como consecuencia del error del receptor. Estas precisiones pueden ser suficientes para algunas tareas agrícolas de gran ancho de trabajo como, por ejemplo, el abonado.

En el segundo artículo del compendio se han desarrollado dos leyes de control, una para guiado en línea recta y otra para guiado en circunferencia y se ha demostrado su estabilidad tanto de forma teórica, mediante los criterios de Lyapunov-LaSalle, como de forma experimental, obteniendo precisiones en el guiado de 20 cm.

Finalmente, en el tercer artículo del compendio, se ha determinado que colocar la antena del receptor en una posición adelantada en el tractor mejora la respuesta y estabilidad del sistema de guiado y se ha desarrollado un método geométrico para el cálculo del estado del tractor a partir de los datos del receptor. El guiado utilizando este método permite una reducción del error RMS de guiado de 32 a 4.8 cm a una velocidad de 1 m/s con un adelanto del receptor de 5 m.

Palabras clave: Global Positioning System (GPS), Real Time Kinematics Carrier Phase GPS (RTK-CDGPS), control, vector pursuit, fusión de sensores, guiado autónomo agrícola, tesis.

Abstract

The autonomous agricultural guidance systems are systems which allow to guide an agricultural vehicle for certain predefined paths without the driver intervention. Along the past 20 years, there have been great research on this area. Most of these research have been focused on positioning sensors and on control laws, due to they are the most complex blocks of these systems. The most employed positioning sensor has been the real time kinematics, carrier phase differential GPS (RTK-CDGPS). This sensor has the advantage over other sensors as cameras, laser, radiowave sensors, etc of providing an absolute positioning for the entire plot, with great precision, and without beacons or marks in the plot. However, they have the problem of their high cost, which increases significantly the cost of the whole system, limiting their expansion.

For this reason, this thesis is focused on the autonomous guidance of agricultural tractors with low cost GPS receivers and in the development of control laws and new methodologies for improving these systems with low cost receivers. First, the validity of these receivers for the autonomous guidance is studied. For that, the positioning error of the low cost receivers is studied and the straight line tracking and step response of the guidance systems with different control law are analyzed (first paper of the compendium). Next, a new asymptotically stable control law for the autonomous guidance in straight and curve paths is developed. This control law is asymptotically stable and converges from any orientation of the tractor (second paper of the compendium). Finally, the placement of the antenna of the receiver over the tractor is studied, developing a geometrical method that increases the stability, response time and noise tolerance of the guidance system with low cost GPS receivers (third paper of the compendium).

A control system for the steering of the tractor was implemented for the experimental tests. This system consisted of an electrical motor joined to the steering wheel of the tractor by means of a pulley, an encoder for the steering position feedback and the electronic for its control.

ABSTRACT

As results, in the first paper of the compendium, it has been obtained that it is possible the autonomous guidance of an agricultural tractor with a low cost receiver as only positioning sensor at a speed up to 9 Km/h. The pass to pass accuracy in the autonomous tracking of a straight trajectory with this kind of receivers is 1.25 m and the mayor part of the error is due to the receiver accuracy. This pass to pass accuracy can be enough for some agricultural tasks with large width of work, as for example, fertilizers application.

In the second paper of the compendium, two new asymptotically stable control laws have been developed, one for straight trajectories and the other for circumferences. Stability of these control laws have been demonstrated theoretically by means the Lyapunov-LaSalle criterions as well as experimentally, obtaining a guidance accuracy of 20 cm RMS.

Finally, in the third paper of the compendium, it has been determined that placing the antenna of the receiver in a forward position of the tractor improves the response time and stability of the guidance system. Moreover it has been developed a geometrical method for calculating the tractor state from the data of the receiver in an advanced position. From experimental test, it has been obtained that with this algorithm, the guidance error is reduced from 32 to 4.8 cm at a speed of 1 m/s with the receiver placed at a distance of 5 m from the real wheel axle of the tractor.

Keywords: Global Positioning System (GPS), Real Time Kinematics Carrier Phase GPS (RTK-CDGPS), control, pursuit vector, sensor fusion, autonomous guidance, thesis.

Agradecimientos

Quisiera dar un agradecimiento especial a mi tutor Jaime Gómez Gil no solo por sus conocimientos técnicos, sino también por sus ganas de trabajar, de mejorar y de desarrollar nuevas ideas, al igual que por su ayuda desinteresada y por su apoyo y ánimo durante todos estos años para la realización de esta tesis. Sin él, sin duda, esta tesis no hubiese llegado a su fin. Gracias por ser tan buen compañero, amigo y persona.

A aquellos alumnos y profesores que mediante la realización de sus correspondientes proyectos fin de carrera, clases, o ayuda personal o técnica han colaborado en mayor o menor medida en la realización de los estudios de esta tesis. Algunos son Albano Carrera, Ji-Chul Ryu, Sunil K. Agrawal, Juan Ignacio Arribas, Javier Gómez, Tim Stombaugh, Luis Fernando Nicolás, Israel San José.

A mis padres y hermanos, por su apoyo y ayuda durante toda mi vida. Gracias por la aportación también de medios materiales como el tractor o las parcelas y por la colaboración en la realización de las pruebas experimentales y en el montaje del sistema.

A mi novia, por permanecer todo este tiempo a mi lado, incluso a veces dedicándole menos tiempo del necesario.

Al Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL) y a la Junta de Castilla y León quienes mediante la concesión del proyecto titulado " Realidad aumentada, Bci y correcciones RTK en red para el guiado GPS de tractores (ReAuBiGPS)" y del proyecto con VA034A10-2 dentro del plan regional 2010 de proyectos de investigación de la Junta de Castilla y León han permitido la adquisición de medios materiales imprescindibles para la realización de las pruebas experimentales como el receptor RTK-CDGPS o el sistema de control de la dirección del tractor.

Gracias.

Siglas y Abreviaturas

BCI	Brain Computer Interface
CDGPS	Carrier Phase Differential GPS
CV	Caballo de vapor
CRC	Código de redundancia cíclica
CVI	C-Virtual Instrument
EEG	Electroencephalography
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EMG	Electromiographic
GB	Giga Byte
GGA	Global Positioning System Fixed Data
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
HCI	Human Computer Interface
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HMI	Human Machine Interface
IHM	Interfaz Hombre-Maquina
ITACyL	Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León
JCR	Thomson Reuters Web of Science
LRQ	Linear Quadratic Regulator
MPC	Model Predictive Control
NMEA	National Marine Electronic Association
P2P	Pass To Pass Accuracy
PID	Proporcional Integral Derivativo
ppm	Parte por millon
RAM	Ramdom Access Memory
RMC	Recommended Minimun Data For GPS
RMS	Root Mean Square
RTK-CDGPS	Real Time CDGPS
SMC	Sliding Mode Control

SIGLAS Y ABREVIATURAS

VRS Virtual Reference Station

Índice abreviado

Resumen	3
Abstract	5
Agradecimientos	7
Siglas y Abreviaturas	8
Índice abreviado	10
Índice general	11
PARTE I: INTRODUCCIÓN AL COMPENDIO	14
1. Introducción	15
2. Objetivos.....	22
3. Materiales	24
4. Metodología.....	27
5. Conclusiones	39
6. Líneas futuras.....	41
7. Relación temática de las publicaciones	43
8. Contribuciones originales.....	45
9. Aportaciones científicas	47
10. Referencias.....	54
PARTE II: ARTÍCULOS DEL COMPENDIO	61
1. Artículo 1 del compendio	62
2. Artículo 2 del compendio	75
3. Artículo 3 del compendio	86

Índice general

Resumen	3
Abstract	5
Agradecimientos	7
Siglas y Abreviaturas	8
Índice abreviado	10
Índice general	11
PARTE I: INTRODUCCIÓN AL COMPENDIO	14
1. Introducción	15
1.1. Arquitectura de los sistemas de guiado autónomo.....	18
2. Objetivos.....	22
3. Materiales	24
3.1. Tractor agrícola	24
3.2. Ordenador.....	24
3.3. Receptores GPS	25
3.4. Sistema de control de la dirección	25
4. Metodología.....	27
4.1. Metodología general	27
4.1.1. Formulación del problema	28
4.1.2. Análisis del estado del arte.....	28
4.1.3. Desarrollo de los objetivos	29
4.1.4. Diseño y desarrollo del sistema	29
4.1.5. Realización de simulaciones	29
4.1.6. Realización de experimentos reales	30
4.1.7. Análisis de resultados y extracción de conclusiones	30
4.1.8. Publicación del estudio	30
4.2. Metodología específica.....	30
4.2.1. Control y calibración de la dirección del tractor.....	31

ÍNDICE GENERAL

4.2.2.	Consideración de error para los receptores.....	31
4.2.3.	Análisis de precisión de receptores	32
4.2.4.	Ajuste de leyes de control	32
4.2.5.	Tipos de trayectorias.....	32
4.2.6.	Leyes de control desarrolladas y demostración de estabilidad.....	33
4.2.6.1.	Criterios de Lyapunov.....	33
4.2.6.2.	Leyes de control	34
4.2.7.	Flujo de procesado de la información del receptor GPS y aplicación de las leyes de control	37
5.	Conclusiones	39
6.	Líneas futuras	41
7.	Relación temática de las publicaciones	43
8.	Contribuciones originales.....	45
9.	Aportaciones científicas	47
9.1.	Aportaciones científicas relacionadas con la tesis	47
9.1.1.	Artículo 1 del compendio	48
9.1.2.	Artículo 2 del compendio	48
9.1.3.	Artículo 3 del compendio	48
9.2.	Otras aportaciones científicas no relacionadas con la tesis.....	49
9.2.1.	Artículos científicos.....	49
9.2.1.1.	A Kalman filter implementation for precision improvement in low cost GPS positioning of tractors.....	49
9.2.1.2.	Steering a tractor by means an EMG-based human machine interface	49
9.2.2.	Congresos.....	50
9.2.2.1.	CISSE Conference 2008	50
9.2.2.2.	III Jornadas Ibero-Americanas de Agricultura de Precisão.....	50
9.2.3.	Artículos de revista divulgativa.....	50
9.2.3.1.	Agricultura de precisión: la nueva revolución agrícola	50
9.2.3.2.	La extensión del GPS en la agricultura: receptores GPS de bajo coste para el guiado agrícola	51

ÍNDICE GENERAL

9.2.3.3. Una implementación del filtro de Kalman para la mejora de la precisión en el posicionamiento de tractores basado en receptores de bajo coste	51
9.2.4. Empresa.....	51
10. Referencias.....	54
PARTE II: ARTÍCULOS DEL COMPENDIO	61
1. Artículo 1 del compendio	62
1.1. Datos del artículo	62
1.2. Artículo.....	62
2. Artículo 2 del compendio	75
2.1. Datos del artículo	75
2.2. Artículo.....	75
3. Artículo 3 del compendio	86
3.1. Datos del artículo	86
3.2. Artículo.....	86

PARTE I: INTRODUCCIÓN AL COMPENDIO

1. Introducción

La agricultura ha sufrido una gran evolución en los últimos 20 años. Esta evolución ha estado propiciada por el desarrollo que han sufrido ciencias como la Mecánica, la Electrónica, la Informática, la Química, la Genética, la Biología y la Agronomía y su consecuente aplicación a la agricultura (Tillet, 1991; Willson, 2000).

El desarrollo de las herramientas de diseño y análisis mecánico y estructural, así como de las técnicas de fabricación, han permitido la mejora en el diseño de la maquinaria, optimizando materiales, haciéndolas más eficientes y con un mayor rendimiento y posibilitando un abaratamiento en los costes de producción, así como una reducción de fallos y una mayor homogeneidad en las mismas.

El desarrollo de nuevos sensores y actuadores, el aumento de potencia y el abaratamiento de los microprocesadores, junto con el desarrollo de nuevas técnicas de control, han permitido la optimización de muchos parámetros, como por ejemplo la gestión de potencia y el consumo de los vehículos. El desarrollo de los sistemas de posicionamiento y de los sistemas de comunicación y gestión de la información han permitido una monitorización y control de la maquinaria en tiempo real y la interoperación entre los equipos y sistemas de los diferentes fabricantes.

El desarrollo de variedades más resistentes y productivas, de herbicidas más selectivos y eficientes, de fertilizantes más productivos y el conocimiento de las necesidades fisiológicas de las plantas a lo largo de todo su ciclo de vida, junto con la sensorización del terreno y de las condiciones ambientales o del propio cultivo y el desarrollo de la maquinaria están permitiendo la mejora de la producción y el abaratamiento de los costes a través de la aplicación de las cantidades necesarias de semilla, agua, fertilizantes y herbicidas en cada punto del terreno. Esto es lo que se conoce como agricultura de precisión y constituye la nueva revolución agrícola del siglo XXI.

Dentro de la agricultura de precisión una de las áreas de investigación más importante la constituyen los sistemas de guiado agrícolas (Auernhammer, 2008). Estos sistemas además de descargar al agricultor de la pesada tarea de conducir el vehículo permiten optimizar el tiempo, el combustible y los insumos aplicados. La dificultad de estos sistemas radica en las duras condiciones en las que trabaja la maquinaria agrícola.

PARTE I: INTRODUCCIÓN

Los sistemas de guiado han sufrido una gran evolución a lo largo de las últimas décadas (Reid, et. al., 2000). Los primeros sistemas estaban basados en artilugios mecánicos, que por medio de cables o accionamientos mecánicos o hidráulicos guiaban al vehículo o a la propia maquina por las filas de cultivo (Widden & Blair, 1972). Eran sistemas engorrosos y en muchos casos poco prácticos y debían ser desmontados y montados para cada una de las filas de cultivo. Posteriormente, en los años 80 surgieron con sistemas basados en radio (Bonicelli & Monod, 1987; Searcy et. al, 1990) o láser (Harries & Ambler, 1981; Lawson, 1985) y que mediante triangulación o el seguimiento del láser realizaban el guiado del vehículo. Con el desarrollo de las cámaras y los algoritmos de procesado de imagen surgieron los sistemas basados en visión artificial (Reid & Searcy, 1988; Pinto et. al., 2000; Han et.al, 2004; Kise et. al., 2005). Estos sistemas requieren diferencias visibles entre las zonas tratadas y sin tratar o las propias filas de cultivo por lo que no pueden ser utilizados en cualquier situación. Muchos de estos sistemas se han utilizado para el guiado en plantaciones de árboles (Cho & Ki, 1999; Subramanian et. al., 2006) o por las filas de cultivo (Billingsley & Schoenfish, 1997). Posteriormente, el desarrollo del sistema de posicionamiento por satélite (GPS) por parte del ejército americano y la posterior evolución del mismo hacia los sistemas diferenciales de fase y doble frecuencia con precisión centimétrica (RTK-CDGPS) han hecho que estos sensores sean unos de los mas empleado en la literatura científica (Li, et. al., 2009), ya sean como único sensor de posicionamiento (Thuillot, et. al., 2002; Stombaugh, et. al., 1998) o combinados con sensores de tipo inercial o cámaras (Seong in Cho & JaeHoon Lee, 2000), puesto que proporcionan una solución global y permiten determinar el estado del vehículo con gran precisión (Gan-Mor et. al., 2007).

Este desarrollo ha ido en paralelo al desarrollo de la industria, puesto que en la actualidad, ya son muchos los fabricantes que desarrollan sistemas de guiado autónomo (Trimble, 2015; John Deere, 2015). Estos sistemas utilizan receptores de diversos tipos (L1/CA (SF1 John Deere), L1/L2 DGPS (SF2 John Deere), RTK-CDGP, con correcciones via radio o satélite) y en muchos casos fusionan sensores de tipo inercial o encoders para obtener el estado del vehículo, permitiéndoles compensar las desviaciones producidas por laderas o el deslizamiento del vehículo. En algunos casos, incorporan un receptor en la propia máquina para corregir las desviaciones en la trayectoria de esta (Guiado automático de aperos, John Deere).

El principal problema para la expansión de los receptores RTK-CDGPS o los sistemas diferenciales de doble frecuencia en la agricultura es el alto coste de los mismos. La

eliminación de la disponibilidad selectiva por parte del ejército americano posibilitó la mejora de la precisión de los receptores de código de una frecuencia, por lo que empezó a ser posible la utilización de estos receptores para algunas tareas agrícolas. Estos receptores tienen un precio muy reducido a diferencia de los receptores RTK-CDGPS u otros tipos de sistemas diferenciales de alta precisión. Estos receptores son los que trataremos como receptores de bajo coste a lo largo de la memoria. En la literatura científica no son muchos los artículos en los que se estudia el uso de este tipo de receptores para el guiado autónomo agrícola (Han et. al., 2001; Guo et. al., 2003; Mizushima et. al., 2004). Estos receptores presentan la desventaja de una menor precisión y estabilidad y de tener normalmente bajas frecuencias de refresco, por lo que el guiado con este tipo de receptores se complica. Por este motivo, esta tesis se ha centrado en el estudio del guiado autónomo con este tipo de receptores.

Otro aspecto importante en el guiado autónomo agrícola es el control del vehículo. Hay numerosos estudios que se han centrado en las leyes de control necesarias para guiar al vehículo por las trayectorias deseadas. Los primeros sistemas utilizaban métodos de control lineal (Stoll & Kutzbach, 2000), ya sea de tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (Tuillot et. al., 2002), por emplazamiento de polos y ceros (Stombaugh et. al., 1998) o controladores de tipo LRQ (Linear Quadratic Regulator) (O'Connor et. al., 1996). La tendencia actual es utilizar métodos de control no lineal (Ge et. al., 2001), predictivo (Lenain et. al., 2006) o mediante inteligencia artificial, ya sea mediante redes neuronales (Ashraf et. al., 2003; Torisu, et. al., 2002) o lógica difusa (Seong in Cho & JaeHoon Lee, 2000). En esta tesis también se han estudiado diferentes métodos de control, pero todos ellos aplicados sobre la señal obtenida de los receptores de bajo coste y se ha desarrollado una ley de control orientada a este tipo de receptores validando su estabilidad tanto de forma teórica como experimental.

De esta forma, en el primer artículo presentado en esta tesis se ha estudiado la precisión absoluta y relativa de los receptores de código de bajo coste para evaluar su posible aplicación al guiado autónomo agrícola y se han realizado experimentos reales de guiado autónomo con este tipo de receptores, a diferentes velocidades y con diferentes leyes de control. Se ha analizado el seguimiento de trayectorias rectilíneas y la respuesta al escalón obteniendo un buen comportamiento hasta velocidades de 9 Km/h.

En el segundo artículo se ha desarrollado una ley de control asintóticamente estable tanto para trayectorias rectilíneas como circulares, demostrando su estabilidad matemáticamente mediante el criterio de Lyapunov-LaSalle. Se ha validado su

comportamiento mediante simulación y experimentos reales a diferentes velocidades, demostrando su mejora respecto a otras leyes de control utilizadas en la literatura científica.

Finalmente, en el tercer artículo presentado, se ha estudiado como el posicionamiento de la antena del receptor GPS sobre el vehículo puede mejorar la estabilidad del guiado, permitiendo el guiado con receptores GPS de bajo coste a mayor velocidad y de forma más estable y se ha desarrollado un método geométrico que permite mejorar la precisión del posicionamiento y guiado con este tipo de receptores.

El sistema desarrollado para la validación experimental de los algoritmos desarrollados a lo largo de esta tesis únicamente pretende ser un entorno de pruebas, no constituyendo un sistema de guiado definitivo. El conductor del vehículo deberá siempre estar presente para gestionar los diferentes sucesos de la complicada tarea de la operación de la maquinaria agrícola.

En cuanto a la organización de esta memoria, se dividirá en dos partes principales. La primera será una introducción al compendio y en la segunda se presentarán los artículos completos desarrollados. Dentro de la primera parte, en el apartado 1.1, se hará una introducción a la tesis, resumiendo la evolución histórica de los sistema de guiado autónomo, principales metodologías y sensores empleados en la literatura científica, introduciendo brevemente los objetivos de la tesis y proporcionando una primera pincelada de los resultados obtenidos. En la sección 1.2 se presentan los objetivos llevados a cabo a lo largo de esta tesis. En la sección 1.3 se describen los materiales con los que se ha contado para realización de los experimentos de campo y para la implementación del sistema de guiado real. En el apartado 1.4 se describe la metodología seguida a lo largo de esta tesis. Inicialmente se describe la metodología general utilizada, para después particularizar en diversos aspectos clave en la realización de los estudios. En el apartado 1.5 se describen los resultados y conclusiones obtenidos. En el apartado 1.6 se proporcionan varias líneas de investigación a seguir como continuación de esta tesis. Finalmente, en los apartados 1.7, 1.8 y 1.9 se describirá la relación entre las diferentes publicaciones y se justificará la originalidad y aportación a la comunidad científica de las mismas. En la segunda parte, se presentan las aportaciones científicas relacionadas con la tesis.

1.1. Arquitectura de los sistemas de guiado autónomo

La Figura 1 muestra la arquitectura general de un sistema de guiado autónomo (Reid, et. al., 2000; Li, et. al., 2009). Se componen de los siguientes bloques:

- **Planificador de trayectorias.** Es el módulo encargado de determinar las trayectorias que deberá recorrer el vehículo. Podrá funcionar de forma autónoma a partir de los planos de la parcela (Oksanen & Visala, 2007; Hameed, et. al., 2010), de la información proveniente de otra maquina (Noguchi, et. al., 2004) o asistido por un operador (Murakami, et. al., 2008). En general, en agricultura, se trata de utilizar trayectorias rectas, que facilitan la realización de los diferentes trabajos y el paso posterior por las filas de cultivo. Debido a las diferentes e irregulares formas de las parcelas o a la presencia de obstáculos en las mismas esta planificación de rutas no es sencilla. En ocasiones esta planificación incluye el trazado de los linderos de las parcelas o el tratamiento en pasadas alternas para facilitar los giros y optimizar el tiempo de trabajo. Este módulo además tendrá que tener en cuenta las propiedades dinámicas del vehículo de forma que las trayectorias generadas puedan ser después seguidas por el vehículo. En ocasiones este módulo genera la trayectoria a partir de los datos recibidos de otro vehículo sobre el que trabaja en serie. También ha habido estudios donde se han implementado sistemas que permiten evitar obstáculos (Stenz et. al., 2002).
- **Ley de control.** Las leyes de control son los algoritmos que a partir de la trayectoria generada y del estado del vehículo generan la acción de control para el guiado del vehículo por la trayectoria. Esta acción de control puede ser la posición o la velocidad de giro de la dirección o la velocidad del tractor. Este módulo es uno de los de mayor complejidad del sistema y, por lo tanto, ha sido uno de los más estudiados en la literatura científica. Las primeras leyes de control desarrolladas estaban basadas en la teoría de control clásica (Ogata, K., 1997) y realizaban el control mediante leyes de control lineal (Stoll & Kutzbach, 2000), mediante PID (Tuillot et. al., 2002) o emplazamiento de polos y ceros (Stombaugh, et. al., 1998). Posteriormente comenzó a utilizarse el control no lineal, como backsteeping (Fang, et. al., 2006), Model Predictive Control (MPC) (Lenain et. al., 2006) o Sliding Model Control (SMC) (Matveev, et. al., 2013). También hay diversos estudios donde se ha aplicado la inteligencia artificial, es decir lógica difusa (Seong in Cho & JaeHoon Lee, 2000) y redes neuronales (Torisu, et. al., 2002). Dentro de las leyes de control se han considerado aspectos como el guiado a alta velocidad (Stombaugh, et. al., 1998) o en pendiente (Asraf et. al., 2003) puesto que afectan en gran medida al guiado debido a la dinámica del vehículo.
- **Control de la dirección.** Es el módulo encargado de orientar o mover a una velocidad determinada la dirección del vehículo. En la literatura científica se han

utilizado principalmente actuadores de tipo hidráulico o electroválvulas que modifican el sistema de dirección del propio vehículo (Stombaugh, et. al., 1998; O'Connor, et. al., 1996). Sin embargo, un sencillo sistema como un motor de continua es suficiente para controlar la dirección del vehículo de forma efectiva. Hay diversos trabajos que estudian el control de la dirección del tractor (Wu et. al., 2001; Zhang et. al., 2002). Este sistema presenta la complejidad de ser un sistema no lineal. Normalmente se ha modelado como un sistema de tipo Ackermann. La buena respuesta y precisión del sistema de control de la dirección es fundamental para obtener una buena precisión en el guiado del vehículo.

- **Vehículo (planta).** Es el propio vehículo o sistema a controlar.
- **Sensores.** Se trata de los sensores utilizados para determinar el estado del vehículo. Estos sensores incluyen tanto los sensores para controlar la dirección como para el guiado del vehículo. Dentro de la literatura científica se han empleado multitud de sensores. Estos sensores incluyen sistemas de radio (Bonicelli & Monod, 1987; Searcy et. al, 1990), láser (Lawson, 1985), ládar (Subramanian, et. al., 2006), cámaras visibles (Reid & Searcy, 1988; Pinto et. al., 2000; Han et.al, 2004; Kise et. al., 2005), infrarrojas, radar, encoders, etc, pero sin duda, el sensor mas empleado como sensor de posicionamiento es el GPS (Stoll & Kutzbach, 2000; Auernhammer, 2008) puesto que proporciona un posicionamiento absoluto, con independencia de las condiciones atmosféricas o de visibilidad y para toda la parcela.
- **Estimación de estado.** Es el módulo que obtiene el estado del vehículo a partir de la información de los sensores. Debido a la variabilidad y la poca fiabilidad de los sensores empleados, este módulo ha constituido un gran foco de estudio dentro de la literatura científica. En diversas ocasiones este módulo no fusiona la información sino que directamente utiliza la información de uno u otro sensor en función del estado de los mismos. En otras ocasiones, este modulo realiza adaptaciones o transformaciones de la información de los sensores para adaptar su salida. Sin embargo, lo más común es que este módulo combine la información de varios sensores para determinar el estado completo del vehículo, es decir, la posición, velocidad, aceleración y orientación del vehículo. Los métodos comúnmente empleados son el filtro de Kalman (Caron, et. al., 2006; Subramanian, et. al., 2009) o métodos estadísticos (Noguchi, et. al., 1998).

- **Monitorización.** Se refiere al modulo o herramientas que permiten acceder al control o estado del sistema por parte del operador. En algunas ocasiones este modulo puede incluir sistema de comunicaciones que permitan la monitorización del sistema remotamente (Murakami, et. al., 2008). En otras, simplemente un Interfaz Hombre-Máquina (IHM).

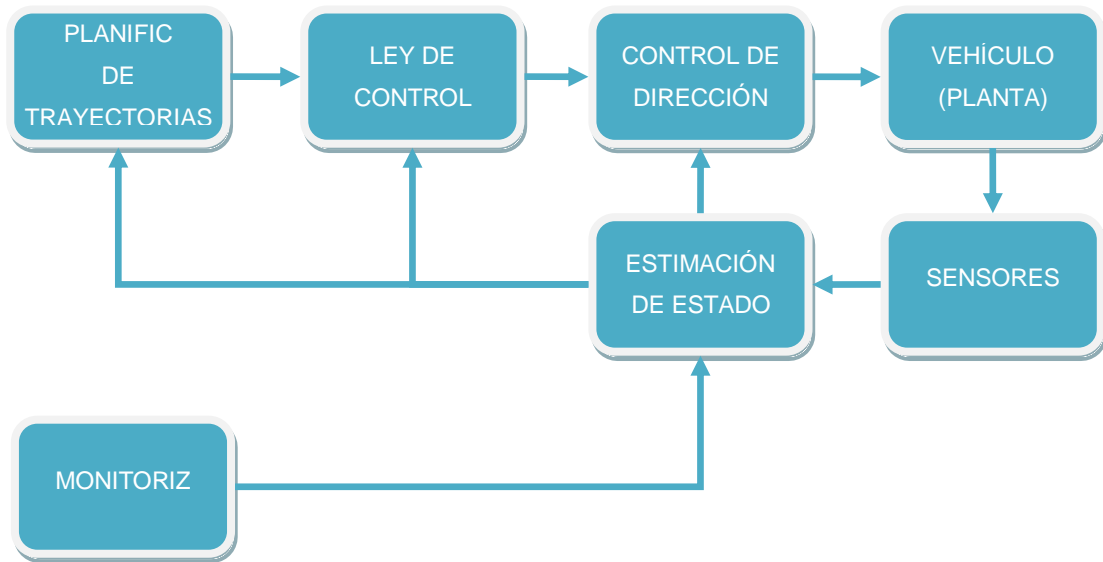


Figura 1: Arquitectura general de un sistema de guiado autónomo agrícola.

2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es evaluar la posibilidad de utilizar receptores GPS de bajo coste (receptores GPS de código) para el guiado agrícola, estudiando los errores cometidos en el guiado con estos receptores y la respuesta del sistema con diferentes leyes de control, así como, el desarrollo de nuevos métodos de control y algoritmos que permitan maximizar la precisión y estabilidad en el guiado utilizando este tipo de receptores. Teniendo esto en cuenta, los objetivos perseguidos a lo largo de esta tesis son los siguientes:

- **Objetivo 1: Análisis de los receptores GPS de código de una frecuencia para el guiado autónomo agrícola.** Tal y como se ha comentado en la introducción, uno de los puntos clave en el guiado autónomo agrícola son los sensores de posicionamiento que permiten determinar el estado del vehículo. En la literatura científica, la mayor parte de los trabajos que han utilizado como sistema de posicionamiento el GPS, han empleado los caros sistemas RTK-CDGPS. Esto supone un problema para la implantación de los sistemas de guiado a gran escala. Por este motivo, en esta tesis se ha analizado la precisión estática y dinámica de los receptores de código de una frecuencia, el tiempo de respuesta y la precisión relativa, aspectos muy importantes para determinar su validez para el guiado agrícola.
- **Objetivo 2: Análisis de las leyes de control desarrolladas en la literatura científica y su aplicación sobre la señal obtenida de receptores GPS de bajo coste.** Las leyes de control desarrolladas en los diferentes trabajos científicos de la literatura han sido comúnmente aplicadas sobre la señal obtenida de los precisos receptores GPS diferenciales de fase y no habiéndose estudiado de forma exhaustiva su ajuste y comportamiento sobre sistemas menos precisos y con mayores retardos y tiempos de respuesta. Por este motivo, es muy importante realizar este estudio sobre varias de las leyes de control más empleadas en la literatura científica para el guiado autónomo agrícola.
- **Objetivo 3: Desarrollo de nuevas leyes de control para el guiado agrícola, asintóticamente estables y especialmente indicadas para el guiado con receptores de bajo coste.** En la literatura científica se han desarrollado multitud de

leyes de control para el guiado agrícola. Muchas de ellas se han desarrollado considerando sensores de gran precisión y no se ha validado su estabilidad sobre sensores menos precisos. Otras veces, las leyes de control desarrolladas sufren de puntos singulares que las hacen inestables. Por este motivo es necesario desarrollar leyes de control que tengan un buen comportamiento con sensores de baja precisión y que sean estables en todo el rango de entrada de las variables y comparar su comportamiento respecto a las desarrolladas en la literatura científica tanto en simulación como en un sistema real.

- **Objetivo 4: Desarrollo de leyes de control para guiado en trayectorias curvas, estables y sin puntos singulares.** Los trabajos agrícolas normalmente se desarrollan sobre líneas rectas, por este motivo, la mayor parte de los trabajos de investigación en este área tratan sobre este tipo de trayectorias. Sin embargo, será necesario también desarrollar leyes de control que permitan el guiado del vehículo en curva, puesto que también son utilizadas en parcelas irrigadas con pívot (Slaughter et. al., 2008).
- **Objetivo 5: Estudio de la influencia de la posición de la antena del receptor sobre el vehículo en la precisión y estabilidad del sistema de guiado.** La colocación de un determinado sensor sobre el sistema a medir es un punto importante. La vibración o el propio comportamiento del sistema pueden influenciar en la medida. La baja precisión de los receptores GPS de bajo coste puede verse muy alterada en función de la posición del sensor sobre el vehículo. Es por este motivo que este es un punto clave a realizar en esta tesis.
- **Objetivo 6: Desarrollo de métodos que permitan aumentar la precisión y respuesta de los receptores GPS de bajo coste.** Al igual que la posición del receptor sobre el vehículo puede influir sobre la precisión en la determinación del estado del mismo, es posible diseñar métodos geométricos que permitan una mejora de la precisión y respuesta del mismo. En esta tesis se desarrolla un método geométrico que permite aumentar la precisión del receptor y se estudia su validez tanto en simulación como en experimentos reales.
- **Objetivo 7: Desarrollo de métodos que permitan filtrar el alto ruido de estos receptores.** Debido al mayor ruido de este tipo de receptores será necesario desarrollar métodos que permitan filtrar este ruido sin perturbar a la precisión o la respuesta y que puedan afectar al guiado.

3. Materiales

En esta sección se presentan los materiales que han sido utilizados en la realización de la tesis y en los experimentos reales llevados a cabo para validar los sensores, las leyes de control y los algoritmos desarrollados para el guiado de los vehículos.

3.1. Tractor agrícola

Para la realización de los experimentos reales se ha utilizado un tractor John Deere 6400 con una potencia de 100 CV, doble tracción y dirección de tipo hidrostático. En la Figura 2 se muestra este vehículo.



Figura 2: Tractor John Deere 6400 utilizado en los experimentos reales.

3.2. Ordenador

El ordenador utilizado ha sido un Sony Vaio modelo SVE151C11M con procesador Intel i5-2450M con 6 GB de memoria RAM y 350 GB de disco duro.

Las herramientas de simulación y el entorno de programación utilizados han sido Matlab-Simulink y Labwindows CVI respectivamente.

3.3. Receptores GPS

Para la realización de los experimentos reales se han empleado diversos receptores GPS. Por un lado se han utilizado receptores de bajo coste para la evaluación del guiado y de la precisión. Por otro, se ha utilizado un receptor diferencial de fase de triple frecuencia como referencia en la realización de los experimentos y ha sido sobre el cual se han medido y evaluado los errores en el guiado.

Como receptores de bajo coste se han utilizado un receptor Haicom HI-204III con chipset Sirf Star III, un receptor Garmin 16 y un receptor Garmin 18. Los receptores Haicom HI-204III y Garmin 16 proporcionan una tasa de refresco de datos de 1 Hz, mientras que el receptor Garmin 18 proporciona 5 Hz. Todos ellos soportan y tenían activadas durante las pruebas, las correcciones diferenciales EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). El error 2D RMS especificado por el fabricante para cada uno de ellos es de 5 m para el Haicom, y 3 m para los Garmin.

Como receptor de referencia se ha empleado un Trimble R4. Este es un receptor de fase de triple frecuencia (L1 + L2 + L5) que trabajando en modo diferencial RTK proporciona una precisión de 0.8 cm + 1 ppm 2D RMS. Las correcciones se obtuvieron mediante GPRS de una estación virtual (VRS) gestionada por el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL).



Figura 3: Receptores utilizados durante la realización de la tesis: a) Haicom HI204III, b) Garmin 16/18, c/ Trimble R4.

3.4. Sistema de control de la dirección

Para el control de la dirección se ha utilizado un motor Maxon RE30 junto con una reductora con una relación 14:1 y un encoder de tipo incremental de 512 pulsos. El acoplo del motor al volante se ha realizado mediante una polea dentada con una relación de 6:1. El control del motor se ha realizado mediante una etapa de potencia MD03 de 20A de corriente máxima y un microcontrolador de Microchip PIC16F877A.

PARTE I: MATERIALES

Para la realimentación de la posición de la dirección se ha empleado un encoder absoluto de tipo magnético colocado en la cruceta de dirección del tractor. El control de la posición de la dirección se ha realizado empleando lógica difusa. La Figura 4 muestra el encoder (Figura 4,a), el acople del motor a la dirección (Figura 4,b) y la caja de control con la etapa de potencia y la tarjeta con el microcontrolador (Figura 4,c).



Figura 4: Sistema de control de la dirección del tractor: a) encoder, b) acoplamiento del motor a la dirección del tractor, c) caja de control de la dirección.

4. Metodología

El desarrollo de esta tesis surge de la afición del autor a la agricultura y de las ganas por mejorar las técnicas utilizadas mediante la aplicación de tecnología. El autor, hijo de una familia de agricultores ha vivido desde muy pequeño rodeado por los tractores y la maquinaria agrícola lo que le ha permitido conocer las posibles áreas de mejora, así como, la problemática de los pequeños agricultores españoles.

En esta sección se describe la metodología seguida a lo largo de la realización de la tesis y de los diferentes trabajos de investigación presentados en ella. En primer lugar se describe la metodología general para después describir de forma resumida la metodología específica llevada a cabo en los diferentes trabajos presentados.

4.1. Metodología general

La metodología seguida en esta tesis básicamente se ha basado en la metodología general utilizada en la investigación científica. Este proceso se describe en la Figura 5.



Figura 5: Metodología general utilizada en la realización de los diferentes estudios de esta tesis.

A continuación se detallan cada uno de las fases llevadas a cabo en esta metodología.

4.1.1. Formulación del problema

La formulación del problema surge de la aparición de tareas o necesidades no resueltas hasta el momento, ya sea desde un punto de vista económico, de usabilidad, de ergonomía, o productivo. Los sistemas de guiado agrícola intervienen en todos estos puntos de vista. Por un lado, desde un punto de vista económico permiten la distribución de fertilizantes, semillas y demás insumos de una forma más uniforme, disminuyendo las zonas repetidas y las zonas sin tratar. Esto conlleva una disminución de los costes de producción de los cultivos y un aumento de la productividad de los mismos. Por otro lado, desde un punto de vista ergonómico o de usabilidad, la conducción de los vehículos agrícolas es una pesada tarea que requiere de gran atención por parte del conductor y produce la mayor parte del cansancio en el conductor. Los sistemas de guiado facilitan esta tarea permitiendo trabajar más horas, con un menor cansancio, optimizando el tiempo de trabajo, y permitiendo prestar más atención a otras tareas de mayor importancia como el control del accesorio utilizado.

A pesar de todas estas ventajas, tras un pequeño análisis de la situación socio-económica de la agricultura española con parcelas pequeñas, precios cada vez más ajustados y una competencia a nivel global sugiere que el desarrollo y expansión de estos sistemas sólo podrá ser posible si el coste de los mismos es asequible en este entorno. Por este motivo, surge la necesidad de desarrollar sistemas de guiado autónomo agrícola de bajo coste que permitan la expansión de los mismos. Tras un ligero análisis de la literatura científica se obtiene que los principales sistemas desarrollados están basados en los caros receptores RTK-CDGPS. Por lo tanto el principal problema analizado a lo largo de esta tesis será el desarrollo y análisis de sistemas de guiado basados en receptores GPS de bajo coste. La elección del GPS como sensor de posicionamiento presenta ciertas ventajas sobre otros sensores puesto que proporciona una solución de posicionamiento global sin necesidad de marcas visuales o de otro tipo sobre la parcela y permite trabajar en cualquier condición climatológica o de visibilidad. Una vez seleccionado este tipo de receptores como sensor de posicionamiento, será necesario analizar y desarrollar nuevos métodos de control o algoritmos que permitan optimizar el guiado con este tipo de receptores.

4.1.2. Análisis del estado del arte

Tal y como se ha visto en la introducción, en el desarrollo de la tesis se ha realizado una exhaustiva tarea de análisis del estado del arte en el área del guiado autónomo.

Inicialmente, se ha realizado un análisis general de estos sistemas para evaluar su estructura, situación, metodología, técnicas de control empleados, sensores, sistemas de fusión de información, etc. Posteriormente, se ha hecho una búsqueda y análisis más específico, centrándose en los sistemas de guiado basados en GPS o en la combinación de estos sistemas de posicionamiento con otros sensores, en los algoritmos de fusión de la información y también, muy especialmente, en los sistemas de control empleados para el guiado del tractor por las trayectorias deseadas. Finalmente, se ha particularizado esta búsqueda en los sistemas de guiado o estudios con receptores de bajo coste, no encontrando trabajos importantes.

4.1.3.Desarrollo de los objetivos

Una vez determinado el problema y estudiado el estado de la literatura científica en el área de estudio, se han planteado objetivos específicos a cubrir en este estudio. Estos objetivos son los planteados en la sección Objetivos de esta memoria. Estos objetivos se han ido desarrollando y analizando en cada uno de los trabajos de investigación publicados durante la realización de esta tesis hasta completar la totalidad de los objetivos propuestos en las diversas publicaciones.

4.1.4.Diseño y desarrollo del sistema

Una vez planteados los objetivos en cada una de las publicaciones realizadas en esta tesis, se han desarrollado estudios o algoritmos que han permitido cubrir estos objetivos. En esta fase se ha diseñado el sistema, metodología, estudio, etc que ha permitido cumplir con estos objetivos. En esta fase se ha desarrollado tanto el algoritmo como el sistema experimental necesario para la demostración de la consecución de estos objetivos. Este sistema ha consistido en la adquisición de los materiales necesarios y en el desarrollo de un sistema de guiado autónomo real y su instalación sobre un tractor agrícola.

4.1.5.Realización de simulaciones

Para la verificación y análisis de los algoritmos y sistemas diseñados se han implementado modelos tanto del tractor como de los diferentes componentes del sistema de guiado y se han implementado los algoritmos y leyes de control desarrolladas en cada uno de los artículos. Estos modelos de simulación se han sometido a las mismas pruebas que el sistema real y han servido, por un lado, para la validación inicial de los algoritmos proporcionando unos resultados previos y, por otro,

para evaluar el buen comportamiento de modelo y algoritmos. Estos se han ratificado posteriormente con los experimentos reales.

4.1.6. Realización de experimentos reales

La simulación de los sistemas proporciona un método muy económico para obtener un primer análisis y unos primeros resultados. Sin embargo, debido a parámetros externos, errores en el modelado o falta de definición en el modelo, los resultados obtenidos en simulación no suelen coincidir totalmente con los resultados reales. Por este motivo, todos los desarrollos de esta tesis se han validado mediante experimentos reales de campo. Estas pruebas, sin embargo, no se han realizado en todo tipo de condiciones del terreno, sino en unas específicas. Por lo tanto, los datos proporcionados no presentan el total de los casos a estudiar, pudiendo obtenerse resultados algo diferentes en condiciones diferentes.

4.1.7. Análisis de resultados y extracción de conclusiones

Una vez obtenidos los datos de las simulaciones y de los experimentos reales, es necesario analizarlos para evaluar si los resultados obtenidos son los esperados; si los resultados experimentales coinciden con los resultados de simulación; y para extraer conclusiones sobre el comportamiento del sistema, validez de los métodos desarrollados, y datos concretos de funcionamiento, como rango de velocidad, estabilidad, etc.

4.1.8. Publicación del estudio

Una vez realizado todo el trabajo es necesario documentarlo y tratar de publicarlo para dar a conocer estos estudios en la literatura científica. Este paso, aunque es el paso final, no es el menos importante, puesto que es el que da a conocer el trabajo y hace que pueda ser utilizado como referencia para otros autores. En este trabajo además hay que prestar gran atención para que pueda ser aceptado por prestigiosas revistas científicas.

4.2. Metodología específica

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, la metodología generada seguida a lo largo de la tesis se basa en la metodología científica. A continuación, en esta sección se describirán procedimientos concretos que se han seguido en la tesis bien para la

realización de experimentos reales, para el planteamiento de estudios concretos, o para la demostración teórica de los algoritmos propuestos

4.2.1. Control y calibración de la dirección del tractor

El control de la dirección del tractor afecta directamente a la precisión y retardos en el guiado. Por este motivo es necesario tener una rápida respuesta y sin oscilaciones en el control de la dirección. Para el control de la dirección se ha empleado lógica difusa y se ha configurado el sistema para obtener un tiempo de respuesta de 0.2 segundos de forma sobre-amortiguada, de forma que este tiempo de respuesta no tenga gran influencia sobre las leyes de control y sensores a las velocidades de estudio.

Para la implementación de la lógica difusa se han utilizado funciones triangulares divididas en tres intervalos en función del error de posicionamiento cometido. Este error podía ser pequeño, mediano y grande. La Figura 6 muestra estas funciones de lógica difusa.

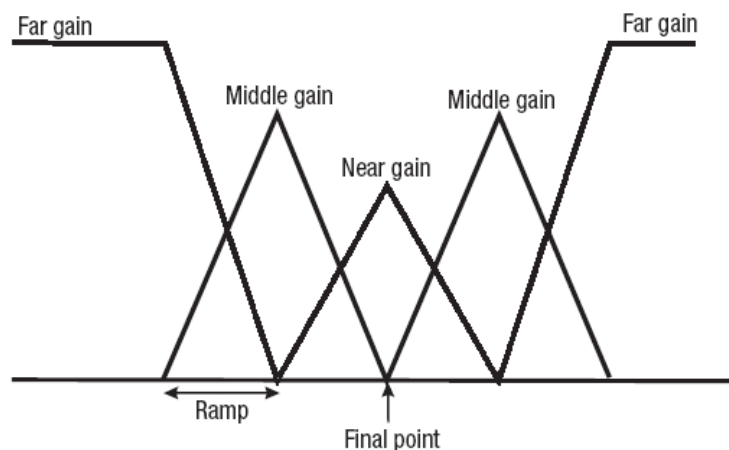


Figura 6: Funciones de lógica difusa utilizadas en el control de la dirección del tractor.

4.2.2. Consideración de error para los receptores

Para los sistemas de guiado se definen dos tipos de error (August et al, 1994; ISO, 2008; ISO, 2009): precisión relativa que sería la capacidad de un sistema de proporcionar medidas cercanas en un periodo de tiempo; precisión absoluta o exactitud que sería la capacidad del sistema de medida de proporcionar medidas cercanas al valor final. Esta consideración de errores es muy importante en estos sistemas, puesto que en la mayor parte de aplicaciones agrícolas lo más importante es tener medidas precisas pero en un plazo de tiempo corto (10-15 min), que suele ser el

tiempo transcurrido entre pasadas consecutivas de una tarea. Esta característica puede permitir que receptores no tan precisos puedan aplicarse en los sistemas de guiado agrícolas si son capaces de mantener la precisión en un periodo de tiempo corto.

4.2.3. Análisis de precisión de receptores

Uno de los parámetros que más influyen en la precisión en un sistemas de guiado autónomo agrícola por GPS es la precisión del sensor de posicionamiento utilizado. En esta tesis, se han utilizado receptores de bajo coste como sensores de posicionamiento, los cuales son receptores poco precisos. Por este motivo, inicialmente se ha evaluado la precisión de estos receptores con la intención de validar si es suficiente para estos sistemas. Para ello, se han tomado datos de tres receptores diferentes, durante varias horas y en diferentes días y se han contrastado los resultados de cada uno de los receptores, calculando, por un lado, el error absoluto y la desviación estándar, por otro, la exactitud del receptor y, por otro, el error relativo en un periodo de tiempo de 15 minutos, utilizado comúnmente en agricultura (August et al, 1994; ISO, 2008; ISO, 2009).

4.2.4. Ajuste de leyes de control

El ajuste de la ley de control es muy importante en el comportamiento de los sistemas de guiado puesto que con este ajuste es posible modificar la respuesta del sistema modificando el tiempo y el sobrepaso en el seguimiento de un escalón. En estos trabajos de investigación, se han realizado comparativas de leyes de control tanto en el seguimiento de una línea recta, en el seguimiento de un escalón o en el de una trayectoria curva. El ajuste de las leyes se ha realizado en la mayor parte de los casos de forma experimental partiendo de las constantes obtenidas de las simulaciones. Este ajuste experimental se ha hecho de tal forma que se obtuviese el máximo rendimiento de la ley de control con un sobrepaso similar de forma que en todas ellas pudiese evaluarse el tiempo de respuesta, delimitando, de esta forma, el rendimiento de la ley con cierta independencia del ajuste.

4.2.5. Tipos de trayectorias

Las trayectorias más utilizadas en agricultura son las trayectorias rectas, puesto que facilitan la realización de las pasadas y el tratamiento o cobertura de las parcelas completas. En algunas zonas se encuentran métodos de riego de forma circular, lo

que hace que en algunas de estas parcelas se realicen los tratamientos utilizando trayectorias circulares. En zonas con parcelas pequeñas o irregulares muchas veces no se sigue un patrón concreto si no que directamente se sigue la forma de la parcela. Por este motivo, en los trabajos realizados en tesis se han realizado estudios del seguimiento de trayectorias rectas principalmente, estudiando también trayectorias circulares y la respuesta al escalón.

4.2.6. Leyes de control desarrolladas y demostración de estabilidad

4.2.6.1. Criterios de Lyapunov

Para la demostración de la estabilidad de las leyes de control desarrolladas se han utilizado los teoremas de Lyapunov y LaSalle. Según estos teoremas [Khalil, 1996]:

Si X^* es un punto de equilibrio del sistema $X' = F(x)$ con F continuamente diferenciable.

Definición 1: Una función real continuamente diferenciable L es una función de Lyapunov en un entorno del punto de equilibrio $\mathcal{O} \ni X^*$ cuando cumple las siguientes propiedades:

I) $L > 0$ en el entorno \mathcal{O} y $L(X^*) = 0$.

II) $\nabla L(X) \cdot F(X) \leq 0$ en \mathcal{O} .

y es una función de Lyapunov estricta cuando además:

III) $\nabla L(X) \cdot F(X) < 0$ en \mathcal{O}/X^* (LaSalle).

Con esto se tienen el primer y segundo teoremas de Lyapunov:

Teorema 1: Si existe una función de Lyapunov, entonces el equilibrio X^* es estable.

Teorema 2: Si existe una función de Lyapunov estricta, entonces el equilibrio X^* es asintóticamente estable.

Las leyes de control desarrolladas cumplen estos dos teoremas, por lo que son asintóticamente estables.

4.2.6.2. Leyes de control

Trayectorias rectas

El desarrollo de las leyes de control se ha realizado empleando un modelo cinemático del vehículo de tipo bicicleta y bajo la suposición de no deslizamiento. El sistema de coordenadas utilizado se ha tomado de forma que el eje x coincida con la trayectoria a seguir y el eje y corresponde a la desviación de la trayectoria. La Figura 7 muestra la representación del tractor, los ejes de coordenadas y cada una de las variables implicadas en el modelo cinemático del tractor.

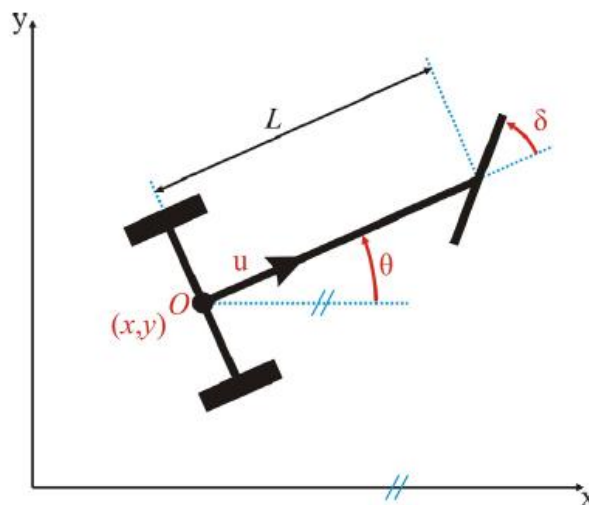


Figura 7: Modelo del tractor, sistema de coordenadas y variables utilizadas.

Tomando la transformación de la ecuación (1) y el sistema de referencia anterior, el modelo cinemático del tractor queda determinado por las ecuaciones (2).

$$\eta = \frac{1}{L} \tan \delta \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{y} &= u \sin \theta \\ \dot{\theta} &= u \eta \end{aligned} \quad (2)$$

siendo:

η la nueva variable introducida

L la distancia entre ejes del tractor en m.

δ el ángulo de dirección en rad.

\dot{y} la derivada del error de seguimiento de la trayectoria en m/s.

u la velocidad de avance del tractor en m/s.

θ el rumbo del tractor en rad.

Para el sistema descrito, el punto de equilibrio se obtiene cuando $y = 0$ y $\theta = 0$. La ley de control propuesta para trayectorias rectas es la que se muestra en la ecuación (3).

$$\eta = \begin{cases} -k_1 y \frac{\sin \theta}{\theta} - k_2 \theta & \theta \neq 0 \\ -k_1 y & \theta = 0 \end{cases} \quad (3)$$

donde k_1 y k_2 son las ganancias de control.

Para demostrar que esta función es estable en el punto de equilibrio, se toma la función de la ecuación (4).

$$L = \frac{1}{2} k_1 y^2 + \frac{1}{2} \theta^2 \quad (4)$$

siendo una función positiva en el entorno del punto de equilibrio (propiedad I).

Derivando se obtiene (5):

$$\dot{L} = k_1 y \dot{y} + \theta \dot{\theta} \quad (5)$$

y sustituyendo las ecuaciones de estado del tractor (2) se obtiene (6).

$$\dot{L} = k_1 y u \sin \theta + \theta u \eta \quad (6)$$

Aplicando la ley de control (3), se obtiene la función de la ecuación (7).

$$\dot{L} = -k_2 u \theta^2 \quad (7)$$

Siendo $\dot{L} \leq 0$ y cumpliéndose la propiedad II. Por lo tanto, la función L es una función de Lyapunov.

Además, como $\dot{L} = 0$ cuando $\theta = 0$ se cumple la propiedad III, satisfaciéndose el Teorema II de Lyapunov y siendo el punto de equilibrio obtenido de esta ley de control asintóticamente estable.

Trayectorias circulares

Para el caso de trayectorias circulares se utilizarán coordenadas polares para definir la trayectoria y el estado del vehículo. El modelo cinemático del vehículo en coordenadas polares, esta descrito por la ecuación (8).

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= u \cos(\theta - \phi) \\ \dot{\phi} &= u \frac{\sin(\theta - \phi)}{\rho} \\ \dot{\theta} &= \frac{u}{L} \tan \delta\end{aligned}\quad (8)$$

donde:

ϕ el ángulo polar en rad.

ρ el radio polar en m.

u la velocidad de avance del tractor en m/s.

L la distancia entre ejes del tractor en m.

δ el ángulo de dirección en rad.

θ el rumbo del tractor en rad.

Los errores en distancia y orientación están determinados por las ecuaciones (9) y (10).

$$e_\rho = \rho - \rho^* \quad (9)$$

$$e_\theta = \frac{\pi}{2} - (\theta - \phi) \quad (10)$$

siendo estos errores nulos cuando el tractor sigue la trayectoria.

Sustituyendo los errores de las ecuaciones (9) y (10) en (8), se obtiene (11).

$$\begin{aligned}\dot{e}_\rho &= u \sin e_\theta \\ \dot{\phi} &= u \frac{\cos e_\theta}{e_\rho + \rho^*} \\ \dot{e}_\theta &= u \left(-\frac{\tan \delta}{L} + \frac{\cos e_\theta}{e_\rho + \rho^*} \right)\end{aligned}\quad (11)$$

Aplicando la transformación (12) a las ecuaciones (8), el estado del vehículo queda determinado por (13).

$$\eta = -\frac{\tan \delta}{L} + \frac{\cos e_\theta}{e_\rho + \rho^*} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}\dot{e}_\rho &= u \sin e_\theta \\ \dot{e}_\theta &= u\eta\end{aligned}\quad (13)$$

Siendo estas ecuaciones las mismas que para el caso de las trayectorias rectas. Por lo tanto, es posible definir una ley de control de la forma descrita en (14), tal que, al igual que en el caso de trayectorias rectas, el punto $e_\rho = 0$ y $e_\theta = 0$ es asintóticamente estable.

$$\eta = \begin{cases} -k_1 e_\rho \frac{\sin e_\theta}{e_\theta} - k_2 e_\theta & e_\theta \neq 0 \\ -k_1 e_\rho & e_\theta = 0 \end{cases} \quad (14)$$

4.2.7. Flujo de procesado de la información del receptor GPS y aplicación de las leyes de control

La Figura 8 muestra el diagrama de flujo para el procesado de la información del receptor GPS y la aplicación de las leyes de control.

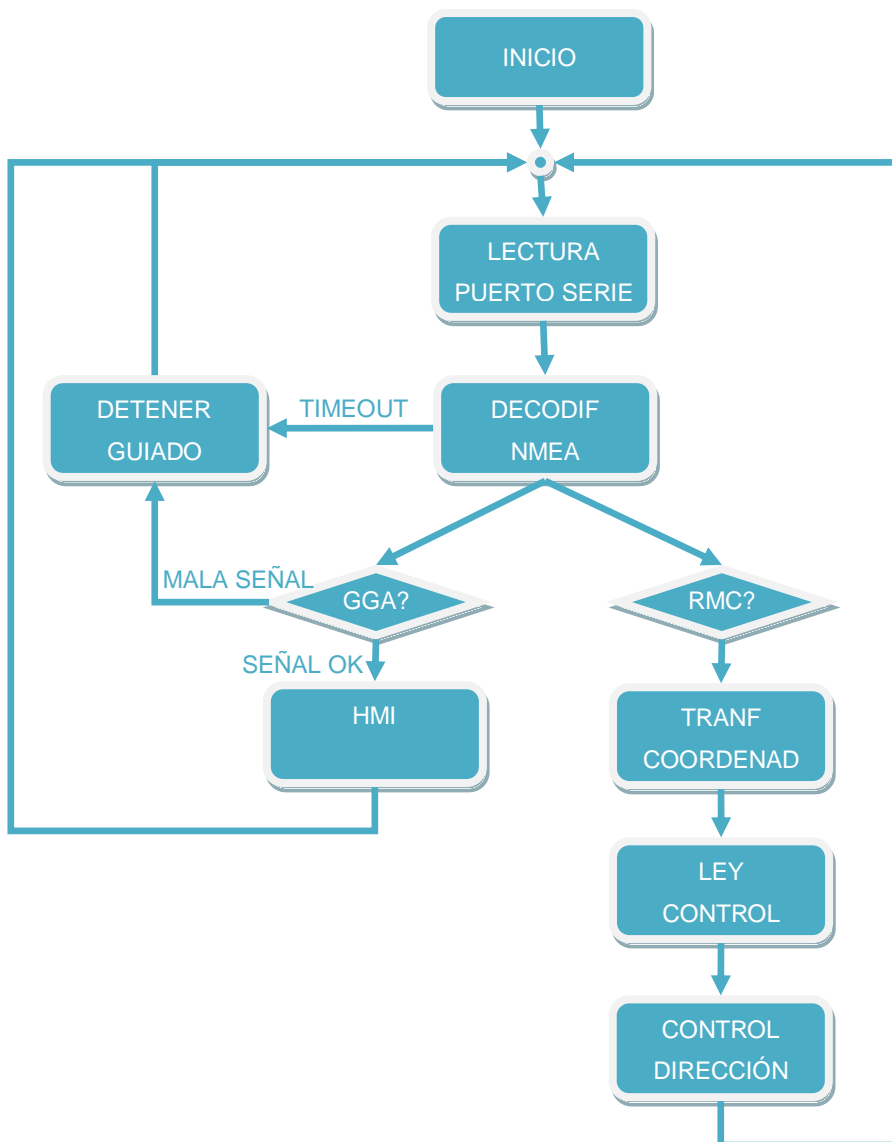


Figura 8: Diagrama de flujo del sistema de guiado implementado.

PARTE I: METODOLOGÍA

En este procesado se realiza una lectura continua del puerto serie que gestiona el receptor GPS. Los datos recibidos del receptor se procesan y se extraen las tramas NMEA (National Marine Electronic Association). Las tramas erróneas se descartan. Para verificar que las tramas son correctas se emplea el código de redundancia cíclica de las mismas (CRC). Las tramas NMEA utilizadas en el proceso son las tramas RMC (Recommended Minimum Navigation) y GGA (Global Positioning System Fix Data) a las frecuencias máximas proporcionadas por el receptor. Una vez recibidas estas tramas se decodifican y se extrae la información correspondiente. De la trama GGA se utiliza la información de HDOP (Horizontal Dilution of Precision) y el número de satélites. Esta información se utiliza para detener el motor si la recepción no es lo suficientemente buena para el guiado y para informar al operador del sistema. De las tramas RMC se extrae la información del posicionamiento. Esta información, en coordenadas geodésicas, se transforma a coordenadas planas UTM utilizando el elipsoide definido por el datum WGS84. Una vez transformadas, con la información de la trayectoria se aplica la ley de control y se obtiene la posición de la dirección necesaria para el seguimiento de la trayectoria que se introduce al controlador de dirección.

5. Conclusiones

En esta sección se resumen los principales resultados obtenidos en las diversas publicaciones llevadas a cabo a lo largo de esta tesis doctoral.

- **Conclusión 1: Es posible realizar el guiado autónomo de un tractor agrícola con un receptor GPS de bajo coste con una frecuencia de actualización de 1 Hz como único sensor de posicionamiento a una velocidad de hasta 9 km/h.** A una velocidad superior, el sistema se hace inestable.
- **Conclusión 2: El error de posicionamiento relativo aproximado para un receptor GPS de bajo coste es de 1 m para un intervalo de tiempo no superior a 15 minutos.** Tal y como se ha analizado en la publicación 1 del compendio, el error en el guiado puede ser calculado como la suma del error estático relativo de posicionamiento del receptor más el error de guiado autónomo o tracking de la trayectoria. Como consecuencia, se ha analizado el error de posicionamiento relativo para tres receptores de bajo coste del mercado, tres días diferentes, obteniendo un error RMS aproximado de 1 m sobre la media de las medidas, para un intervalo de tiempo no superior a 15 minutos.
- **Conclusión 3: El error de guiado aproximado entre pasadas consecutivas trazadas en un intervalo de tiempo inferior a 15 minutos utilizando receptores de bajo coste es de 1.25 m.** El error de guiado obtenido para tres leyes de control evaluadas con este tipo de receptores es inferior a 0.25 m para el seguimiento de una línea recta. Teniendo esto en cuenta, el error relativo o entre pasadas (ISO, 2008) en el guiado será inferior a 1.25 m el 95% del tiempo para trayectorias trazadas con un tiempo inferior a 15 minutos. Este error puede ser suficiente para algunas tareas agrícolas de gran ancho de trabajo, como la distribución de fertilizantes minerales u orgánicos.
- **Conclusión 4: El comportamiento de las leyes de control *proporcional orientación-distancia*, *vector pursuit* y *controlador cuadrático lineal (LRQ)* comparadas en la primera publicación del compendio es similar y está muy condicionado por el ajuste de las mismas.** De la comparación de la respuesta escalón y del seguimiento en línea recta con las tres leyes de control evaluadas, puede extraerse que el comportamiento es similar para todas ellas y que está muy condicionado por el ajuste de las mismas.

- **Conclusión 5: Se han desarrollado dos leyes de control asintóticamente estables, una para líneas rectas y otra para circunferencias, sin puntos singulares y se ha demostrado su estabilidad tanto teórica como experimentalmente.** Uno de los problemas de las leyes de control analizadas en la primera publicación del compendio es que tienen puntos singulares donde no son estables y que solo sirven para el seguimiento de trayectorias rectas. Por este motivo, en la segunda publicación del compendio se han desarrollado dos leyes de control asintóticamente estables, una para trayectorias rectas y otra para trayectorias curvas, y se ha demostrado su estabilidad teóricamente mediante el criterio de Lyapunov-LaSalle y experimentalmente mediante simulación y pruebas de campo.
- **Conclusión 6: Colocar la antena del receptor GPS en la parte delantera del tractor, favorece el guiado de un tractor agrícola. Esto se debe a que la dirección del tractor se encuentra en la posición delantera,** por lo que los giros producen un mayor desplazamiento del vehículo en esta zona, permitiendo ser detectado mucho antes que en la parte trasera y más aun si el receptor no es preciso.
- **Conclusión 7: Se ha desarrollado un método geométrico que traslada la posición de la antena de un receptor GPS en una posición adelantada del vehículo al punto de giro del vehículo y se ha demostrado como este método favorece a la estabilidad y precisión de un sistema de guiado con un receptor GPS de bajo coste.** Este método permite calcular el estado del vehículo a partir de los datos proporcionados por un receptor GPS de bajo coste y el modelo cinemático del vehículo. En las pruebas experimentales se ha comprobado como el guiado utilizando este método permite una reducción del error RMS de guiado de 32 a 4.8 cm a una velocidad de 1 m/s con un adelanto de la antena del receptor de 5 m.

6. Líneas futuras

Tal y como se ha visto a lo largo de esta memoria, uno de los principales problemas de un sistema de guiado agrícola es la determinación del estado del vehículo de forma precisa y con un coste reducido. Los receptores GPS de bajo coste mejoran cada día sus prestaciones haciendo que ya sea posible utilizarlos para algunas tareas agrícolas, sin embargo, para otras muchas tareas agrícolas la precisión de estos receptores todavía está bastante limitada. Los sensores de tipo inercial como giróscopos y acelerómetros han ido reduciendo su coste, con unas prestaciones aceptables, gracias a la tecnología MEMS. Los sensores de tipo radar o ultrasonidos para la medida de la velocidad de un vehículo son cada vez más populares. Por lo tanto, uno de los primeros pasos a realizar en la mejora del sistema es la fusión de los datos de posición proporcionados por los receptores de bajo coste, combinados con el algoritmo geométrico de posicionamiento desarrollado en esta tesis, con sensores de tipo inercial y con el modelo del vehículo, el cual puede ser mejorados gracias a los datos de sensores en el propio vehículo como un radar para la medida de la velocidad real, encoders en las ruedas para conocer el deslizamiento del vehículo y un sensor de posición para conocer la orientación de la dirección.

La fusión de datos del receptor GPS, sensores de tipo inercial y del estado del vehículo influirán en el tiempo de respuesta y estabilidad del sistema lo que permitirá trabajar en peores condiciones y a mayor velocidad. Sin embargo, la precisión final seguirá estando muy influenciada por la precisión del receptor. El desarrollo de los receptores diferenciales de fase junto con el abaratamiento de los receptores que proporcionan datos "raw", permite el desarrollo de sistemas diferenciales de bajo coste. Este sería otro aspecto a desarrollar, un receptor diferencial, de una o varias frecuencias y estudiar su precisión.

La incorporación de sensores inerciales permitirá determinar la actitud del vehículo. Los terrenos agrícolas se encuentran en ocasiones en terrenos con pendiente de hasta 30°. Estas inclinaciones producen errores en el sistema de guiado. La incorporación de estos datos y la corrección de estos errores sería un aspecto clave de estudio.

En cuanto al control, la dinámica del vehículo hace que, incluso siendo posible, la velocidad influya sobre el confort de conducción en trayectorias curvas. Por lo tanto, un aspecto a estudiar sería la adaptabilidad de la respuesta de la ley de control en

PARTE I: LÍNEAS FUTURAS

función de la velocidad, de forma que se garantice tanto la seguridad del vehículo como el confort de conducción.

7. Relación temática de las publicaciones

El guiado autónomo agrícola forma parte de la agricultura de precisión en cuanto a que permite distribuir de una forma más uniforme semillas, herbicidas y fertilizantes, sin desperdiciar productos como consecuencia de solapes innecesarios y sin dejar zonas sin tratar, reduciendo el tiempo de trabajo y la fatiga del conductor. Por este motivo, el guiado autónomo agrícola ha sido una de las áreas más estudiadas en la literatura científica. En concreto, el guiado autónomo agrícola por GPS ha sido una de las técnicas más empleadas, puesto que constituye una solución global, sin necesidad de marcas en la parcela y con independencia de las condiciones atmosféricas o de visibilidad. Sin embargo, en las soluciones propuestas en la literatura científica, el tipo de receptores GPS preferentemente empleados son del tipo RTK-CDGPS, siendo receptores muy caros y difíciles de manejar, constituyendo esto un problema para la expansión a gran escala de estos sistemas. Por este motivo, el abaratamiento de estos sistemas y la utilización de receptores GPS más económicos ha constituido el tema principal de esta tesis. De hecho, en el primer artículo se analiza la posibilidad de realizar el guiado con este tipo de receptores. En primer lugar se analiza la precisión relativa de los mismos, para después analizar la precisión en el guiado con tres diferentes leyes de control utilizadas en varios importantes artículos científicos anteriores. La problemática vista en estas leyes de control, con puntos de críticos, junto con la mayor inestabilidad del guiado con estos como consecuencia de la menor tasa de refresco de estos receptores y la menor precisión, ha propiciado el desarrollo de los dos siguientes artículos presentados como parte de este compendio.

En el segundo artículo del compendio, se desarrollan dos leyes de control que solucionan algunos de los problemas vistos en las leyes de control estudiadas en el primer artículo. Esto es, son asintóticamente estables, sin puntos críticos de inestabilidad y, además, se desarrollan para el guiado en curvas, aspecto muy poco estudiado en la literatura científica. La estabilidad además se demuestra de forma teórica mediante los criterios de Lyapunov.

Finalmente, en el tercer artículo, se desarrolla un método geométrico que aumenta la estabilidad del sistema de guiado con receptores GPS de bajo coste, permitiendo guiar

PARTE I: RELACIÓN TEMÁTICA DE LAS PUBLICACIONES

al tractor de forma autónoma a mayor velocidad y realizando el filtrado de los datos de estos receptores de forma natural.

8. Contribuciones originales

A lo largo de esta tesis se han realizado diversos estudios y desarrollos que han partido de la necesidad del abaratamiento de los sistemas de guiado desarrollados en la literatura científica. Tras un profundo análisis de la literatura científica y del estado del arte en el guiado agrícola se ha determinado que los sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS) constituyen una de las mejores fuentes para la determinación del estado del vehículo, puesto que proporcionan una posición global, con independencia de las condiciones ambientales o visuales y sin necesidad de balizas, marcas sobre la tierra u otros sistemas que pudiesen complicar la instalación del sistema. Sin embargo, en la literatura científica se han utilizado comúnmente los caros sistemas diferenciales RTK-CDGPS, siendo muy pocos estudios los que tratan sobre receptores GPS de bajo coste (Peters & Evett, 2005; Devlin et. al., 2007; Willson, et. al., 2000; Reid, et. al., 2000; Auernhammer, 2008; Li, et. al. 2009), siendo aun menos, los artículos que tratan sobre la aplicación de estos receptores para el guiado autónomo agrícola (Guo, et. al., 2003). Por lo tanto, como contribuciones originales de esta tesis se pueden enumerar:

- **Análisis y estudio de la precisión de los receptores GPS de bajo coste para el guiado agrícola.** Este análisis se ha realizado centrándose en la precisión relativa para un periodo de tiempo de 15 minutos, puesto que es el tiempo aproximado entre pasadas tal y como establece la norma ISO/DIS 12188-1. Diversos estudios han realizado con anterioridad el estudio de la precisión de los receptores GPS para agricultura (Devlin et. al., 2007; GanMor et. al., 2007; Sama et. al., 2009; Valbuena et. al., 2010), sin embargo, centrándose en una precisión absoluta y de forma totalmente diferente a la desarrollada en este trabajo.
- **Comparación de tres leyes de control con receptores GPS de bajo coste.** En la literatura científica comúnmente se han desarrollado leyes de control (O'Connor et. al., 1996; Stoll & Kutzbach, 2000; Tuillot et. al., 2002), e incluso algunos trabajos emplean las mismas leyes de control. Sin embargo, en el estudio del estado del arte no se ha encontrado ningún trabajo publicado en el cual se comparen varias de estas leyes de control. Además, en este caso, estas leyes se aplican para receptores GPS de bajo coste.
- **Propuesta de dos leyes de control, una para trayectorias rectas y otra para trayectorias circulares, asintóticamente estables y sin puntos**

singulares para cualquier orientación del vehículo. El buen comportamiento de estas leyes de control se ha demostrado tanto teórica como experimentalmente. El desarrollo se ha realizado a partir del modelo cinemático del vehículo.

- **Desarrollo de un algoritmo para la determinación del estado de un tractor agrícola a partir de los datos de un receptor GPS con la antena colocada en una posición adelantada en el tractor.** La mayor parte de los trabajos realizados en la literatura científica que utilizan como sensores de posicionamiento el GPS (Reid, et. al., 2000), sitúan éste sobre la cabina del tractor en el punto de intersección entre el eje trasero del tractor y la línea longitudinal de simetría del mismo. Esto es debido a que este punto es el origen de coordenadas del modelo, puesto que es el punto sobre el que gira el vehículo. En esta tesis se ha analizado y demostrado como la colocación del receptor sobre un punto adelantado mejora la respuesta y estabilidad del sistema de guiado y como, aplicando el método desarrollado, se puede conseguir una reducción de error para un GPS de bajo coste de 32 a 4.8 cm RMS a una velocidad de 1 m/s con un adelanto del receptor de 5 m

9. Aportaciones científicas

En esta sección se presentan las aportaciones científicas relacionadas con la tesis así como otras aportaciones en las que el autor ha participado pero que no constituyen parte del compendio.

9.1. Aportaciones científicas relacionadas con la tesis

Esta sección presenta los datos de las aportaciones científicas que se incluyen como parte del compendio. La Figura 9 muestra los datos del autor en la base de datos Scopus editada por Elsevier. Según la base de datos Scopus (Scopus) de la editorial Elsevier, el índice h (*h-index*) del autor es 2. El número de artículos publicados es 6, con un total de 37 citas. Los artículos incluidos en el compendio tienen un total de 13 citas.

Alonso-García, Sergio [About Scopus Author Identifier](#) | [View potential author matches](#)
 Universidad de Valladolid, Department of Signal Theory, Communications and Telematics Engineering, Valladolid, Spain
 Author ID: 41760965800
 Other name formats: Alonso-García, Alonso-García, Sergio, Alonso-García

Documents: 6 | Citations: 37 total citations by 36 documents | *h-index*: 2 | Co-authors: 10
 Subject area: Engineering, Chemistry | [View More](#)

6 Documents | Cited by 36 documents | 10 co-authors

6 documents | [View in search results format](#) | Sort on: Date | Cited by

Export all | Add all to my list | Set document alert | Set document feed

A Kalman filter implementation for precision improvement in Low-Cost GPS positioning of tractors	Gomez-Gil, J., Ruiz-Gonzalez, R., Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, F.J.	2013	Sensors (Switzerland)	1
Development and validation of globally asymptotically stable control laws for Automatic tractor guidance	Gomez-Gil, J., Ryu, J.-C., Alonso-Garcia, S., Agrawal, S.K.	2011	Applied Engineering in Agriculture	0
Steering a tractor by means of an EMG-based human-machine interface	Gomez-Gil, J., San-Jose-Gonzalez, I., Nicolas-Alonso, L.F., Alonso-Garcia, S.	2011	Sensors	21
Evaluación del uso de receptores GPS de bajo coste en el guiado autónomo de tractores agrícolas [Evaluation of the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors]	Alonso-García, S., Gomez-Gil, J., Arribas, J.I.	2011	Spanish Journal of Agricultural Research	2
A simple method to improve autonomous GPS positioning for tractors	Gomez-Gil, J., Alonso-Garcia, S., Gómez-Gil, F.J., Stombaugh, T.	2011	Sensors	11
Design, development and implementation of a steering controller box for an automatic agricultural tractor guidance system, using fuzzy logic	Carrera-González, A., Alonso-García, S., Gómez-Gil, J.	2010	Technological Developments in Education and Automation	2

Figura 9: Información del autor Sergio Alonso García en la base de datos Scopus.

A continuación, se detallan los datos de cada una de las publicaciones del compendio, incluyendo tanto los datos del propio artículo como los datos de la revista en la que se publica.

9.1.1. Artículo 1 del compendio

El primer artículo del compendio (Alonso-Garcia, et. al., 2011) tiene por título *Evaluation of the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors* y cubre los objetivos 1 y 2 de esta tesis. En él se estudia la precisión de los receptores GPS de bajo coste y su adecuación para el guiado agrícola, analizando la precisión total en el guiado utilizando tres leyes de control diferentes.

Este artículo se publicó en la revista *Spanish Journal of Agricultura Research* en el año 2011. El factor de impacto de la revista en este año según el JRC era de 0.615. El factor de impacto en 5 años 0.724 y estaba posicionada en el cuartil 2 en el área *Agriculture/Multidisciplinary*.

Este artículo ha sido citado 2 veces (JCR) a fecha de realización de la tesis.

9.1.2. Artículo 2 del compendio

El segundo artículo del compendio (Gomez-Gil, et. al., nov 2011) tiene por título *Development and Validation of Globally Asymptotically Stable Control Laws for Automatic Tractor Guidance* y cubre los objetivos 3 y 4 de esta tesis. En él se desarrollan dos nuevas leyes de control para el guiado agrícola y se demuestra su estabilidad de forma teórica y experimental.

Este artículo se publicó en la revista *Applied Engineering in Agriculture* en el año 2011. El factor de impacto de la revista en este año según el JRC era de 0.526. El factor de impacto en 5 años 0.78.

9.1.3. Artículo 3 del compendio

El tercer artículo del compendio (Gomez-Gil, et. al., jun 2011) tiene por título *A Simple Method to Improve Autonomous GPS Positioning for Tractors* y cubre los objetivos 5, 6 y 7 de esta tesis. En él se estudia la influencia de la colocación del receptor GPS sobre el tractor agrícola y como afecta al guiado, tanto en precisión, como en estabilidad y respuesta y se desarrolla un método geométrico que permite obtener el estado del vehículo a partir de una posición adelantada del receptor.

Este artículo se publicó en la revista *Sensors* en el año 2011. El factor de impacto de la revista en este año según el JRC era de 1.739. El factor de impacto en 5 años 2.06 y estaba posicionada en el cuartil 2 en las áreas *Analytical Chemistry, Atomic and*

Molecular, Physics and Optics , Medicine(Miscellaneous) , Electrical and Electronical Engineering.

Este artículo ha sido citado 11 veces (JCR) a fecha de realización de la tesis.

9.2. Otras aportaciones científicas no relacionadas con la tesis

En esta sección se presentan otros artículos científicos, congresos, conferencias, revisiones de artículos o publicaciones en revistas divulgativas en las que ha colaborado el autor, pero que no se presentan como parte del compendio.

9.2.1. Artículos científicos

9.2.1.1. A Kalman filter implementation for precision improvement in low cost GPS positioning of tractors

En este artículo (Gomez-Gil, et. al., 2013) se presenta un filtro de Kalman para el filtrado de los datos de receptores GPS de bajo coste para el guiado agrícola. Muchos de estos receptores proporcionan pocos decimales en los datos que proporcionan por lo que el error de cuantización es grande. Este filtro elimina parte de estos errores de cuantización y filtra el ruido derivado del movimiento del tractor.

Este artículo se publicó en la revista *Sensors* en el año 2013. El factor de impacto de la revista en este año según el JCR era de 2.048.

Este artículo ha sido citado 3 veces (JCR) a fecha de realización de la tesis.

9.2.1.2. Steering a tractor by means an EMG-based human machine interface

En este artículo (Gomez-Gil, et. al., jul 2011) se presenta la aplicación un interfaz electromiographic (EMG) para el guiado de un tractor agrícola. El sistema se entrena y se conecta con la dirección del tractor para el guiado por diferentes tipos de trayectorias. El control se realiza detectando el movimiento de los ojos.

Este artículo se publicó en la revista *Sensors* en el año 2011. El factor de impacto de la revista en este año según el JRC era de 1.739. El factor de impacto en 5 años 2.06 y estaba posicionada en el cuartil 2 en las áreas *Analytical Chemistry , Atomic and*

Molecular, Physics and Optics , Medicine(Miscelaneous) , Electrical and Electronical Engineering.

Este artículo ha sido citado 14 veces (JCR) a fecha de realización de la tesis.

9.2.2. Congresos

En esta sección se presentan los trabajos presentados en congresos y conferencias durante el tiempo de la realización de la tesis.

9.2.2.1. CISSE Conference 2008

Es una conferencia internacional de tipo electrónico organizada por la Universidad de Bridgeport en la cual se presentan artículos tecnológicos sobre áreas variadas. Los artículos presentados se publican posteriormente en forma de libro editado por la editorial Springer. El autor presentó el artículo titulado: *Design, development and implementation of a steering cotroller box for an automatic agricultural tractor guidance system, using fuzzy logic* (Carrera-Gonzalez, et. al., 2008), en el cual se desarrolla una caja de control para la dirección de un tractor agrícola y se realiza una comparación de diferentes métodos de control.

El artículo fue publicado posteriormente en el libro *Technological Developments in Education and Automation* de la editorial Springer (Iskander, et. al., 2010).

9.2.2.2. III Jornadas Ibero-Americanas de Agricultura de Preciçao

Congreso internacional sobre agricultura de precisión realizado en Évora (Portugal) los días 2 y 3 de marzo de 2010. En este congreso se presentó una revisión del estado del arte en el guiado agrícola (Alonso-Garcia, Gomez-Gil, 2010), junto con un poster.

9.2.3. Artículos de revista divulgativa

En este caso se presentan artículos publicados en revistas de tipo divulgativo.

9.2.3.1. Agricultura de precisión: la nueva revolución agrícola

Artículo publicado en la revista Tierras (Alonso-Garcia, Gomez-Gil, feb 2010) que trata sobre la agricultura de precisión. En este artículo se presentan las bases y las principales ventajas de la Agricultura de Precisión y se realiza un pequeño repaso por los principales sistemas que abarca. Entre estos sistemas se describen los sistemas

de posicionamiento GPS, los sistemas de guiado, los sistemas de siembra, abonado y fumigación variable, los sistemas de documentación y realización de mapas de rendimiento y diversos robots empleados para la realización de diversas labores agrícolas.

9.2.3.2. La extensión del GPS en la agricultura: receptores GPS de bajo coste para el guiado agrícola

Artículo publicado en la revista Tierras que trata sobre la aplicación de los receptores de bajo coste para el guiado agrícola.

9.2.3.3. Una implementación del filtro de Kalman para la mejora de la precisión en el posicionamiento de tractores basado en receptores de bajo coste

Artículo publicado en la revista Mapping (Ruiz-Gonzalez, et. al., 2014) que trata sobre la aplicación del filtro de Kalman para el filtrado de los datos de posición procedentes de un receptor de bajo coste para el guiado agrícola.

9.2.4. Empresa

El autor, a partir de los conocimientos adquiridos durante la realización de sus estudios, proyecto fin de carrera, la realización de estudios de esta tesis y el trabajo en la empresa privada, en el año 2009 registró la marca *tractorDrive*[®], marca bajo la cual ha desarrollado y comercializa sistemas de guiado por GPS para maquinaria agrícola (www.tractordrive.es). Las figuras Figura 10 y Figura 11 muestran algunos de los productos comercializados bajo la marca.

tractorDrive®
Technology for Agriculture

RECEPTORES GPS

tractorDrive®-Avanzado
Un receptor económico ideal para aplicaciones que no requieran gran precisión.

tractorDrive®-Alta Precisión-E
Receptor de gran precisión en todas las situaciones. Muy estable frente a multipath y a un buen precio. Precisión entre pasadas aprox. 15-25 cm.

tractorDrive®-Avanzado+
La mejor relación calidad-precio. Muy buena precisión para tratamientos de herbicida y abonado.

tractorDrive®-Alta Precisión
La máxima precisión en todas las situaciones. Ideal para la mayor parte de trabajos agrícolas. Precisión entre pasadas de 10-15 cm 95%. GPS + GLONASS + EGNOS. GLIDE.

EQUIPOS DE GUIADO

tractorDrive®-Mobile 8P Avanzado
Tablet 8" Intel, 1GB RAM, 16GB, GPS, Bluetooth
Receptor GPS tractorDrive®-Avanzado

tractorDrive®-Mobile 8P Avanzado+
Tablet 8" Intel, 1GB RAM, 16GB, Bluetooth
Receptor GPS tractorDrive®-Avanzado+

tractorDrive®-Mobile 8P Alta Precisión-E
Tablet 8" Intel, 1GB RAM, 16GB, GPS, Bluetooth
Receptor GPS tractorDrive®-Alta Precisión-E

tractorDrive®-Mobile 8P Alta Precisión
Tablet 8" Intel, 1GB RAM, 16GB, Bluetooth
Receptor GPS tractorDrive®-Alta Precisión

DISTRIBUIDOR AUTORIZADO:

www.tractordrive.es
info@tractordrive.es

tractorDrive®
Technology for Agriculture

EL GPS AGRÍCOLA AL ALCANCE DE TODOS

CATÁLOGO DE PRODUCTOS



Figura 10: Catálogo de productos tractorDrive® (1).

tractorDrive®
Technology for Agriculture

DESCRIPCIÓN

tractorDrive®-Mobile es una línea de sistemas de guiado agrícola o GPS agrícola diseñada para cumplir las necesidades de los agricultores más exigentes. Están basados en tablets Android de última generación, lo que le convierte en uno de los sistemas más económicos y polivalentes del mercado, puesto que además de ser utilizados como sistemas de guiado, puede utilizarlos para navegar por internet, tomar fotos, escuchar música o ver películas. La aplicación de guiado es una de las más completas teniendo características como diversos tipos de patrones de guiado, medidas de áreas totales, parciales y distancias, indicación de velocidad y corte de secciones y poseer una avanzada base de datos para la gestión de los trabajos realizados. Todo ello además realizado por el buen servicio y soporte técnico que llevamos proporcionando a nuestros clientes durante los últimos años.

COMPONENTES

- Tablet Android de 8" de última generación con pantalla IPS capacitiva multitouch y procesador Intel Atom 1.83 GHz, 1GB de RAM y 16GB de almacenamiento interno.
- Receptor GPS de altas prestaciones
- Adaptador de alimentación AC-DC 220V
- Adaptador de alimentación tipo mechero 12V
- Adaptador Bluetooth® tractorDrive®-BT
- Tarjeta micro-SD con licencia tractorDrive®-Mobile y manual de usuario
- Soporte metálico tablet con tornillos de sujeción
- Soporte metálico antena
- Funda para la tablet

tractorDrive®
Technology for Agriculture

CARACTERÍSTICAS

- Gran pantalla IPS a color para mejorar la visibilidad con el sol
- Marcadón de zonas tratadas y sin tratar y solapes
- Marcadón del contorno de la parcela
- Cálculo del área total, parcial y distancias de la parcela
- Diversos tipos de patrones de guiado: rectas, curvas y circunferencias
- Indicación de guiado mediante flechas fácil e intuitiva
- Definición completa y precisa del accesorio
- Indicación de corte de secciones
- Base de datos para el almacenamiento de trabajos
- Zoom y representación en perspectiva 2D y 3D
- Tres configuraciones de color: día, noche y marrón-verde



Figura 11: Catálogo de productos tractorDrive® (2).

PARTE I: APORTACIONES CIENTÍFICAS

Actualmente se encuentra en el desarrollo/industrialización de un sistema de guiado autónomo y un sistema de control de secciones. Puede encontrarse un video de unas pruebas de guiado autónomo en la dirección web:

<https://www.youtube.com/watch?v=ldXStgO6Yio>.

10. Referencias

Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, J., feb 2010, Agricultura de precisión: la nueva revolución agrícola, Tierras, nº 165, pp. 22-32.

Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, J., mar 2010, Revisión de los Sistemas de Guiado en la Agricultura, III Jornadas de Ibero-Americanas de Agricultura de Precisão. Evora 2-3 de marzo de 2010.

Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, J., 2012, La extensión del GPS en la agricultura: receptores GPS de bajo coste para el guiado agrícola, Tierras, nº 191, pp. 26-30.

Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, J., Arribas, J.I., 2011, Evaluation of the Use of Low-Cost GPS Receivers in the Autonomous Guidance of Agricultural Tractors, Spanish Journal of Agricultural Research, 9(2), pp. 377-388.

Ashraf, M. A., Takeda, J., Osada, H., Chiba, S., 2003, Generalised Steering Strategy for vehicle navigation on sloping ground, Biosystems engineering, 86, (3), pp. 267 - 273.

Auernhammer, H., 2008, Precision farming - the environmental challenge, computer and electronics in agriculture, 30, pp. 31 - 43.

August, P., Michaud, J., Lavash, C., Smith, C., 1994. GPS for environmental applications: accuracy and precision of locational data. Photogramm Engineering for Remote Sensors, 60, (1), pp. 41-45.

Bonicelli, B.; Monod, M. O., 1987, A self propelled ploughing robot. American Society of Agricultural Engineers, Paper 87-1064.

Caron, F., Duflos, E., Pomorski, D., Vanheeghe, P., 2006, GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects. Information Fusion, 7, pp. 221 - 220.

Carrera-Gonzalez, A., Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, J., 2008, Design, development and implementation of a steering controller box for an automatic agricultural tractor guidance system, using fuzzy logic, Paper presented to CISSE 2008. Published as part of Iskander, et. al. 2010.

PARTE I: REFERENCIAS

Cho, S. I., Ki, N. H., 1999, Autonomous Speed Sprayer Guidance Using Machine Vision and Fuzzy Logic, Transactions of the ASAE, 42(4), pp 1137 - 1143.

Devlin, G. J., McDonnel, P., Ward, S. M., 2007, Performance accuracy of low cost dynamic non-differential GPS on articulated trucks. Applied Engineering in Agriculture, 23(3), pp. 273 - 279.

Gan-Mor, S., Clark, L. R., Upchurch, B. L., 2007, Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance, Computer and Electronics in Agriculture, 59, pp. 31 - 38.

Ge, S. S. , Wang, J., Lee, T. H., Zhou, G. Y., 2001, Adaptive Robust Stabilization of Dynamic Nonholonomic Chained Systems, Journal of Robotic Systems, 18(3), pp 119 - 133.

Gomez-Gil, J., Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, F.J., Stombaugh, T., jun 2011, A Simple Method to Improve Autonomous GPS Positioning of Tractors, Sensors, 11(6), pp. 5630-5644.

Gomez-Gil, J., San-Jose-Gonzalez, I., Nicolas-Alonso, L.F., Alonso-Garcia, S., jul 2011, Steering a Tractor by Means of an EMG-based Human-Machine-Interface, Sensors, 11(7), pp. 7110-7126.

Gomez-Gil, J., Ryu, J.C., Alonso-Garcia, S., Agrawal, S.K., nov 2011, Development and Validation of Globally Asymptotically Stable Control Laws for Automatic Tractor Guidance, Applied Engineering in Agriculture, 27(6), pp. 1099-1108.

Gomez-Gil, J., Ruiz-Gonzalez, R., Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, F.J., 2013, A Kalman Filter Implementation for Precision Improvement in Low-Cost GPS Positioning of Tractors, Sensors, 13(11), pp. 15307-15323.

Guo LS, Zhang Q, Feng L. A low-cost integrated positioning system of GPS and inertial sensors for autonomous agricultural vehicles. In: ASAE annual international meeting, Las Vegas, Nevada, USA; 27–30 July, 2003.

Hameed, I. A., Bochtis, D. D., Sorensen, C. G., Noremark, M., 2010, Automated generation of guidance lines for operational field planning. Biosystems Engineering, 107, pp. 294 - 306.

PARTE I: REFERENCIAS

Han S, Zhang Q., 2001, Map-based control functions for autonomous tractors. In: ASAE annual international meeting, California, USA; July 30–August 1.

Han S., Zhang Q., Reid J. F., 2004, A guidance directrix approach to vision based vehicle guidance systems, *Computers and Electronics in Agriculture*, 43, pp. 179–195.

Harries, G. O., Ambler, B, 1981, Automatic Ploughing: A Tractor Guidance System Using Opto-electronic Remote Sensing Techniques and a Microprocessor Based Controller, *J Agric Engng Res*, 26, pp 33 - 53.

Iskander, M., Kapila, V., Karim, M.A., 2010, *Technological Developments in Education and Automation*, Editorial Springer.

ISO, 2008. ISO/DIS 12188-1, Test procedures for positioning and guidance systems in agriculture. Part I: Dynamic testing of satellite-based positioning devices. International Organization for Standardization.

ISO, 2009. ISO/WD 12188-1, tractors and machinery for agriculture and forestry. Testing procedures for positioning and guidance systems in agriculture. Part II: Satellite-based auto-guidance systems tested during straight and level travel. International Organization for Standardization.

John Deere. Portal web del fabricante de maquinaria agrícola John Deere. www.johndeere.com. Última visita 20 de octubre de 2015.

John Deere. Guiado automático de aperos. Web en la que se detallan las características del sistema de guiado automático de aperos de John Deere. http://www.deere.com/en_US/products/equipment/ag_management_solutions/guidance/active_implement_guidance/active_implement_guidance.page?. Última visita 20 de octubre de 2015.

Khalil, H.K. 1996 , *Nonlinear systems*, 2nd edn, Prentice-Hall.

Kise, M., Zhang, Q., Rovira Mas, F., 2005, A Stereovision /based crop row detection method for tractor automated guidance, *Biosystems engineering* 90, 4, pp. 357-367.

Lawson, G., 1985, Laser beams steer straight course for tractors. *Grower*, 1985, October 10, pp. 24-25.

PARTE I: REFERENCIAS

Lenain, R., Thuillot, B., Cariou, C., Martinet, P., 2006, High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. *Autonomous Robots*, 21, pp 79-97.

Li, M., Imou, K., Wakabayashi, K., Yokoyama, S., 2009, Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. *International Journal of Agriculture and Biological Engineering*, 2 (3), pp. 1 - 26.

Matveev, A. S., Hoy, M., Katupitiya, J., Savkin, A. V., 2013, Nonlinear sliding mode control of an unmanned agricultural tractor in the presence of sliding and control saturation. *Robotics and Autonomous Systems*, 61, pp. 973 - 987.

Mizushima A, Noguchi N, Ishii K. Monitoring system of peat areas using agricultural robot. In: ASAE proceedings of the automation echnology for off-road equipment conference, Kyoto, Japan; 7–8 October, 2004.

Murakami, N., Ito, A., Jeffrey, D., Will, D., Steffen, M., Inoue, K., Kita, K., Miyaura, S., 2008, Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63, pp. 81 - 88.

Noguchi, N., Will, J., Reid, J. F., Benson, E. R., Stombaugh, T. S., 1998, Vehicle automation system based on multisensor integration. An ASAE Meetind presentation. Paper Number 983111.

Noguchi, N., Will, J., Reid, J., Zhang, Q., 2004, Development of a master-slave robot system for farm operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, pp. 1 - 19.

O'Connor, M., Bell, T., Elkaim, G., Parkinson, B.W., 1996, Automatic steering of farm vehicles using GPS. In: *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, MN, June 23–26, 1996, pp. 767–778.

Ogata, K., 1997, *Modern control engineering*, 3rd edition. Pentice-Hall.

Oksanen, T., Visala, A., 2007, Path planning algorithms for agricultural machines. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal*. ATOE 07009. Vol. IX.

Peters, R. T., Evett, R., 2005, Using low-cost GPS receivers for determining field position of mechanized irrigation systems. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(5), pp. 841 - 845.

PARTE I: REFERENCIAS

Pinto, F. A. C., Reid, J. F., Zhang Q., Noguchi, N., 2000. Vehicle Guidance Parameter Determination from Crop Row Images Using Principal Component Analysis. *Journal. Agricultural Engineering Research*, 75: 257-264.

Reid, J.F., Searcy, S.W., 1988, An Algorithm for separating guidance information from row crop images. *Trans ASEA*, pp. 1624-1632.

Ruiz-Gonzalez, R., Gomez-Gil, J., Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, F.J., 2014, Una implementación del filtro de Kalman para la mejora de precisión en el posicionamiento de tractores basado en receptores de bajo coste, *Mapping*, 23(163).

Sama, M. P., Stombaugh, T. S., Zandonadi, R. S., Shearer, S. A., 2009, Dynamic GNSS testing and applications. 2009 ASABE Annual International Meeting. Reno, Nevada. Paper number 096714.

SCImago Journal & Country Rank. Portal que incluye la información de indicadores científicos de revistas y países desarrollados a partir de la base de datos Scopus editada por Elsevier. <http://www.scimagojr.com/>. Ultima visita 20 de agosto de 2015.

Scopus. Base de datos de citas y resúmenes de revistas científicas editada por Elsevier. www.scopus.com. Ultima visita 20 de agosto de 2015.

Searcy, S. W.; Schueller, J. K.; Bae, Y. H.; Stout, B. A., 1990, Measurement of agricultural field location using microwave frequency triangulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 4(3): 209-223.

Seong In Cho, Jae Hoon Lee, 2000, Autonomous Speedsprayer using Differential Global Positioning System, Genetic Algorithm and Fuzzy Control, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76, pp. 111 - 119.

Stenz, A., Dima, C., Wellington, C., Herman, H., Stager, D., 2002, A system for semiautonomous tractor operations, *Autonomous Robots*, 13, pp. 87 - 104.

Stoll, A., Kutzbach, H. D., 2000, Guidance of a forage harvester with GPS, *Precision Agriculture*, 2, pp. 281 - 291.

Stombaugh, T.S., Benson, E.R., Hummel, J.W., 1998, "Automatic Guidance of Agricultural Vehicles at High Field Speeds." Presented at July 12 – 15 at the 1998 Annual International Meeting, Paper No. 983110, ASAE, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085- 9659 USA.

PARTE I: REFERENCIAS

Subramanian, V., Burks, T. F., Arroyo, A. A., 2006, Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance system for citrus grove navigation, *Computers and electronics in agriculture*, 53, pp. 130 - 143.

Thuillot, B., Cariou, C., Martinet, P., Berducat, M., 2002, Automatic Guidance of a Farm Tractor Relying on a Single CD-DGPS, *Autonomous Robots*, 13, pp. 53 - 71.

Tillet, N. D., 1991, Automatic Guidance Sensors for Agricultural Field Machines: A Review, *J. agric, Engng Res*, 50, pp 167-187.

Torisu, R., Hai, S., Takeda, J., Ashraf, M. A., 2002, Automatic tractor guidance on sloped terrain (Part 1), formulation of neural network vehicle model and design of control law for contour line travel. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 64, (6), pp. 88–95.

tractorDrive[®], Portal de los sistemas de guiado agrícola tractorDrive[®].
www.tractordrive.es. Última visita 20 de septiembre de 2015.

Trimble, Portal de los sistemas para Agricultura de Precisión desarrollados por la empresa americana Trimble. *www.trimble.com/agriculture/index.aspx*. Última visita 20 de octubre de 2015.

Video prototipo autoguiado tractorDrive[®]. Video de las primeras pruebas del prototipo de auto-guiado tractorDrive[®]. *https://www.youtube.com/watch?v=ldXStgO6Yio*. Última visita 21 de septiembre de 2015.

Valbuena, R., Mauro, F., Rodriguez-Solano, R., Manzanera, J. A., 2010, Accuracy and precision of GPS receivers under forest canopies in a mountainous environment. *Spanins Journal of Agricultural Research*, 8(4), pp. 1047 - 1057.

Wilson, J. N., 2000, Guidance of agricultural vehicles - a historical perspective, *Computers and Electronics in Agriculture*, 25, pp. 3 - 9.

Widden, M. B., Blair, J. R., 1972, A New Automatic Tractor Guidance System, *J Agric. Engng Res*, 17, pp 10 - 21.

Wu, D., Zhang, Q., Reid, J. F., 2001, Adaptive steering controller using Kalman estimator for wheel-type agricultural tractors. *Robotica*, 19, pp. 527 - 533.

PARTE I: REFERENCIAS

Zhang, Q., Wu, D., Reid, J. F., Benson, E. R., 2002, Model recognition and validation for an off-road vehicle electrohydraulic steering controller. *Mechatronics*, 12, pp. 845 - 858.

PARTE II: ARTÍCULOS DEL COMPENDIO

1. Artículo 1 del compendio

1.1. Datos del artículo

Los datos del artículos son los siguientes:

- **Título:** Evaluation of the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors
- **Autores:** Sergio. Alonso García; Jaime Gómez Gil; Juan Ignacio Arribas Sánchez
- **Revista de publicación:** Spanish Journal of Agricultura Research

1.2. Artículo

El artículo completo se muestra en las siguientes páginas.

Evaluation of the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors

S. Alonso-García*, J. Gomez-Gil and J. I. Arribas

*ETSI Telecomunicaciones. Universidad de Valladolid. Campus Miguel Delibes.
Camino del Cementerio, s/n. 47011 Valladolid. Spain*

Abstract

This paper evaluates the use of low-cost global positioning system (GPS) receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors. An autonomous guidance system was installed in a 6400 John Deere agricultural tractor. A low-cost GPS receiver was used as positioning sensor. Three different control laws were implemented in order to evaluate the autonomous guidance of the tractor with the low-cost receiver. The guidance was experimentally tested with the tracking of straight trajectories and with the step response. The total guidance error was obtained from the receiver accuracy and from the guidance error. For the evaluation of the receiver's accuracy, positioning data from several low-cost receivers were recorded and analyzed. For the evaluation of the guidance error, tests were performed with each control law at three different speeds. The conclusions obtained were that relative accuracy of low-cost receivers decreases with the time; that for an interval lower than 15 min, the error usually remains below 1 m; that all the control laws have a similar behavior and it is conditioned by the control law adjustment; that automatic guidance with low-cost receivers is possible with speeds that went up to 9 km h⁻¹; and finally, that the total error in the guidance is mainly determined by the receiver's accuracy.

Additional key words: control law; fuzzy logic; inertial navigation system (INS); linear quadratic regulator; step response; trajectory tracking.

Resumen

Evaluación del uso de receptores GPS de bajo coste en el guiado autónomo de tractores agrícolas

Este artículo evalúa el uso de receptores de posicionamiento global (GPS) de bajo coste en el guiado autónomo de tractores agrícolas. Para ello, se instaló un sistema de guiado autónomo en un tractor John Deere 6400. Como sensor de posicionamiento se utilizó un único receptor GPS de bajo coste. Se implementaron tres leyes de control diferentes para la evaluación del guiado con el receptor GPS de bajo coste. Se realizaron pruebas de seguimiento de trayectorias rectilíneas y de respuesta escalón. El error de guiado total se obtuvo de la precisión del receptor y del error relativo instantáneo en el seguimiento de una trayectoria. Para la evaluación de la precisión del receptor, se tomaron y analizaron datos de posición de varios receptores. Para la evaluación del error en el guiado, se realizaron pruebas con cada una de las leyes de control a tres velocidades diferentes. Como conclusiones se ha obtenido que la precisión relativa de los receptores GPS de bajo coste disminuye con el tiempo; que en un intervalo de tiempo inferior a 15 min, la precisión relativa es aproximadamente 1 m; que el comportamiento de las diferentes leyes de control es similar y está condicionado por el ajuste de las mismas; que el guiado es posible a velocidades de hasta 9 km h⁻¹ y, finalmente, que el error total en el guiado está principalmente determinado por la precisión del receptor.

Palabras clave adicionales: ley de control; lógica difusa; regulador cuadrático lineal; respuesta escalón; seguimiento de trayectorias; sistema de navegación inercial (INS).

* Corresponding author: salonsog@ribera.tel.uva.es

Received: 11-03-10; Accepted: 05-05-11.

Abbreviations used: CDMA (code division multiple access), CVI (C Virtual Instrument), DC (direct current), DGPS (differential global positioning system), EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), GNSS (global navigation satellite systems), GPS (global positioning system), INS (inertial navigation system), LRQ (linear quadratic regulator), NMEA (National Marine Electronics Association), PID (proportional integral derivation), RTK-CDGPS (real time kinematic carrier phase differential global positioning system), UTM (universal transverse mercator), WAAS (wide augmentation area system).

Introduction

Agriculture has experienced enormous advances in the past century as a result of a mechanical revolution that has made possible the replacement of animal-powered equipment with internal combustion engines. A chemical revolution has made the use of fertilizers and herbicides ubiquitous. A biological revolution has produced many varieties of plants and animals more productive and disease resistant, while an electronic revolution has allowed the optimization and automation of numerous tasks (Wilson, 2000; Auernhammer, 2001). One of the most recent modern technologies making this advance possible (Zhang *et al.*, 2002) is the global positioning satellite system (GPS), and one of the tasks to which it is being applied is the autonomous guidance of agricultural machinery (Ashraf *et al.*, 2003).

The first guidance systems were mechanical (Parish *et al.*, 1970; Kirk *et al.*, 1976; Busse *et al.*, 1977). Later, machine vision guidance systems (Billingsley and Schoenfisch, 1997; Benson *et al.*, 2003) and GPS guidance systems (Keicher and Seufert, 1999) were developed. Today, GPS guidance systems are the most popular.

Autonomous guidance systems can be divided into two groups: relative positioning systems and absolute positioning systems (Slaughter *et al.*, 2008). Relative positioning systems are those that use relative references to the current or previous position of the tractor. For example, vision systems (Subramanian *et al.*, 2006) that use the line of separation between the previous trajectory and the current one, or systems that use a laser reference (Leemans and Destain, 2007). On the other hand, absolute positioning systems use an external and global reference. Of these systems, the most widespread are those based on global navigation satellite systems (GNSS) (Stafford, 1999; Gan-Mor *et al.*, 2007).

The accuracy of autonomous GPS guidance systems depends on many variables. The most important is the accuracy of the GPS receiver. The accuracy of GPS receivers depends strongly on the employment of one or two frequencies and the use of differential corrections. Another variable that influences the accuracy is the frequency with which the GPS receiver supplies the positioning information. This frequency is usually in the range of 1 to 20 Hz. Thus, based on these variables, it is possible to reduce errors from several meters to a few centimeters with differential corrections. Precise real time kinematic carrier phase differential global positioning systems (RTK-CDGPS) have been usually

used in the scientific literature (Noguchi *et al.*, 1998; Reid *et al.*, 2000; Thuillot *et al.*, 2002; Lenain *et al.*, 2006; Gan-Mor *et al.*, 2007). Positioning rates of 5 Hz or more have been used. No studies in the scientific literature analyze with detail the viability and precision of autonomous agricultural guidance systems based on low-cost single frequency GPS receivers that provide one position per second.

The tracking method or the guidance control has a great influence on the accuracy of the system. Control must allow quick approximation to the path without oscillations. Guidance control has been studied in many articles offering different control laws and technologies. One of the most common methods for the automatic guidance of an agricultural tractor, due to its simplicity and excellent results at low speeds, is the method that takes an advanced point on the path and then either points the front wheels directly at this point, or applies a steering angle proportional to the difference of orientation between this vector and the tractor (Gerrish *et al.*, 1997). A second method, also simple and commonly used, applies a proportional control to the distance and the difference of orientation between the path and the tractor trajectory (Noguchi *et al.*, 1998; Stoll and Kutzbach, 2000). However, the problem of this method is the loss of stability when the distance to the trajectory is increased. A third method is connected with the theory of state variables (Benner and Faßbender, 1999) and its derivations. Previous studies have looked at hybrid control systems (O'Connor *et al.*, 1996; Cordesses *et al.*, 1999; Thuillot *et al.*, 2002), which use «coarse» control laws when the errors are big and «thin» laws when they are small. Linear quadratic regulators (LRQ) were used for the «thin» control law. For resolving these problems, adaptive controllers have been used (Zhang *et al.*, 2003; Lenain *et al.*, 2006). Another more complex method is called chained systems. Here, a lineal model is obtained from the state model applying first order chained derivations (Lenain *et al.*, 2006). Finally, studies have also been carried out in which the control was implemented with fuzzy logic or neural networks (Blochl and Tsinas, 1994; Zhu *et al.*, 2005).

In order to obtain acceptable precision results, it is necessary to have a good steering response. Many studies have focused on the use of electrohydraulic valves in steering (Wu *et al.*, 1999; García-Pérez *et al.*, 2008), whereas others have looked at a simpler system using a direct current (DC) motor that turns the steering wheel.

The objective of this paper is to evaluate the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance

of agricultural tractors. For that, three different control laws were implemented and studied in order to determine the behavior of the system with this kind of receiver. For every control law the maximum tracking error for straight trajectories and the step response were analyzed by means of field automatic guidance tests. The static accuracy of the receiver was also studied experimentally. For that, horizontal position data were taken for fixed positions of the receiver at different times, evaluating the results. Global accuracy of the guidance system was determined from the precision of the GPS receiver and the precision of the tracking system.

Material and methods

Materials

A 6400 John Deere tractor with a maximum power of 73.5 kw was used for the experimental tests (Fig. 1a). The steering control was programmed in a microcontroller. The actuator was an RE-30 Maxon DC motor joined by means of a striated pulley to the steering wheel of the tractor (Fig. 1c). A GP 32 Maxon reducer gear adapted the motor turning speed to the steering wheel speed. The reduction rate was 14:1 for the reducer gear and 6:1 for the pulley. An MA3 US Digital magnetic encoder was used to measure the steering angle position (Fig. 1b) and an MD03 power stage was used to drive the DC motor. The power stage was controlled

through an I2C bus from the microcontroller. The range of values for this control was 0 to 243. The GPS was a HI-204III Haicom, with a refreshment frequency of 1 Hz. The price of this GPS was lower than € 40. This GPS provides relative good performance with very low cost. Two other low-cost receivers were used to analyze the low-cost receiver's accuracy and its evolution with time. These receivers were a Garmin 16 and a Garmin 18 5 Hz.

A portable computer was used to control the whole system. It processed National Marine Electronics Association (NMEA) frames from the GPS receiver, calculated the error from the tractor to the desired trajectory and computed the control law for the steering. Windows XP was the operating system and LabWindows CVI was the development environment. Although this environment is not a real time system, this is not a problem due to the low processing frequency (1 Hz).

Methods

The study was focused on rectilinear paths, since they are the most common shapes in agricultural work. In order to obtain precise and repeatable results, the guidance of the tractor was done independent of different factors such as the steering control, the navigation information measurement and the path position. Consequently, it was necessary to calibrate and obtain good conditions for these systems and to hold these configurations constant for all the tests. Within this

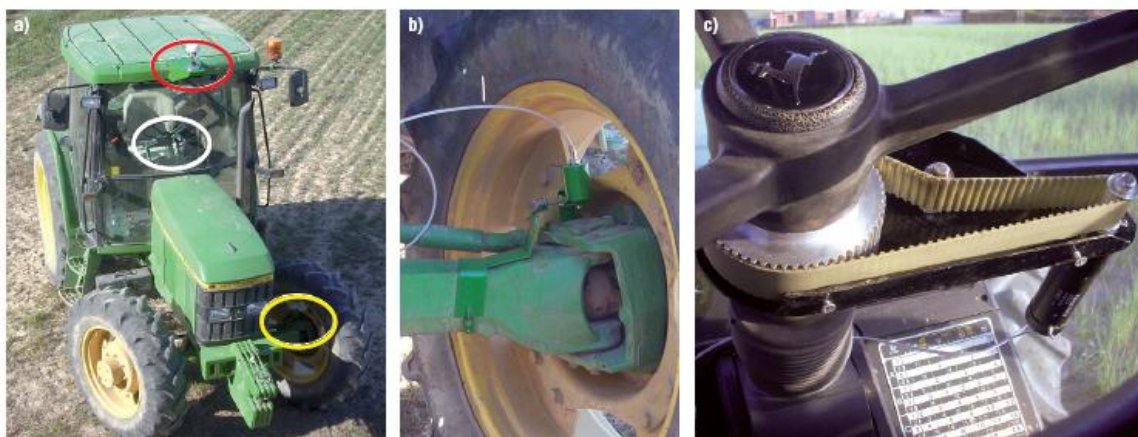


Figure 1. a) 6400 John Deere used in the test. The red circle indicates the position of the GPS, the white circle the DC motor for controlling the steering and the yellow circle the magnetic encoder. b) Magnetic encoder used for measuring the steering angle. c) DC motor and pulley used for moving the steering.

section the calibration and configuration of the tractor for the tests is described.

Steering control and calibration

Steering control has a great influence on the guidance of the tractor. A very quick steering response (<0.2 s), absence of peaks and oscillations, and a resolution lower than one half degree is necessary for a good guidance control. In this case, the control was accomplished by means of a DC motor joined with a pulley to the steering wheel. A reducer gear was used to adapt the motor speed to the steering wheel speed. The feedback for the controller was a magnetic encoder with a resolution of 10 bits that offered an effective resolution of 0.35°. The control was implemented using a microcontroller and fuzzy logic. Triangular functions were chosen for the fuzzy logic. Figure 2 shows the shape of the logic functions of this controller.

The mathematical expression of these functions is defined by equations [1] and [2]:

$$u(t) = \pm \left((PA - O_1) \frac{Gain_1}{Ramp} + (PA - O_2) \frac{Gain_2}{Ramp} \right) [1]$$

$$u(t) = \pm Far\ Gain [2]$$

Eq. [1] is used for triangular functions and 1 and 2 sub-indices are for positive and negative slopes respectively. Eq. [2] is applied in the far gain area. In these equations, $u(t)$ is the value applied to the power driver, $Gain$ is the maximum value for each interval, $Ramp$ is the width of the interval, O is the origin of the interval, PA is the instantaneous position of the steering and $Far\ Gain$ is the voltage for the trapezoidal function.

The adjustment of the controller parameters was done experimentally. The far gain was the saturation value of the DC motor. In our implementation it was

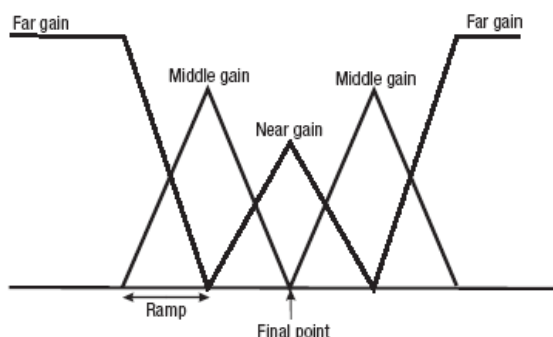


Figure 2. Typical triangular functions of fuzzy logic.

243. The lower gain was set to a value sufficient to correct stationary errors and move the steering with small errors quickly but without continuous current peaks. The middle value and the ramp were adjusted experimentally to a value that provided a smooth and quick response. Once the controller was implemented, the steering angle was obtained from the encoder angle and the equations of the Ackerman steering model.

GPS receiver

GPS receivers range in price from a few dozen to several thousand euros. The GPS receiver is one of the components that most affects the price and the precision of guidance system. An HI-204III Haicom low-cost receiver was chosen for this study. It is a one frequency code receiver that supports code differential corrections. In this case, European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) corrections were used to improve the navigation data.

GPS. Principles, kinds and errors

The navigation system time and ranging (NAVSTAR) GPS is a satellite-based radio-navigation system that allows determining the position of a mobile anywhere in the world. It was developed by the United States (US) Department of Defense in 1978 and it is formed by 24 satellites turning around the earth. It calculates the position of a receiver based on the delays of the signals from the satellites (Borgelt et al., 1996).

Nowadays, three radio carrier frequencies are used. They are known as L1, L2 and L5. The most used for civil navigation is called L1C and it has a frequency of 1,575.42 MHz (DAF, 2008). Two codes are transmitted modulating these signals: a standard C/A (coarse acquisition) code and a precise P code restricted to US government use. The codes are transmitted using a technique called code division multiple access (CDMA). Each satellite sends a unique code.

GPS receivers can be classified as code or phase GPS receivers according to if the receiver evaluates the code or the phase of the carrier wave of the signals transmitted by the satellite.

Code receivers compare the coded signal transmitted from the satellites with an exact replica of the code generated in the receiver. The time delay between the two signals provides a measurement of the distance to

each satellite. This distance is called pseudo-range. At least four pseudo-range measurements are necessary for the computation of the receiver position in three dimensions and the receiver clock offset. Code receivers have a 2dRMS accuracy of 100 m due to ionosphere effects, multipath and other effects (Borgelt *et al.*, 1996). This accuracy can be improved using differential corrections. These corrections are obtained from a receiver in a static position and are used to correct mobile receiver errors. The corrections can be distributed via radio or satellite. Free satellite corrections, for example, EGNOS, can give to the receivers an accuracy of 5 m 2dRMS. Other non free corrections, such as OMNISTAR or SF2 system of John Deere, can improve the accuracy until 1 m 2dRMS. Code receivers are usually low cost and are used in a lot of applications, for example, car navigation.

Phase receivers analyze the phase of the carrier frequency. They need to know the carrier phase lag between the receiver and the base station. Phase receivers can be classified into two types according to the method used for calculating the phase lag: static carrier phase differential GPS (S-CPDGPS) and real time kinematic carrier phase differential GPS (RTK-CPDGPS). On one hand, S-CPDGPS is applied for static receivers. The number of cycles of the carrier frequency is calculated with post processing. A small amount of data is necessary in order to obtain the precise position of the receiver. On the other hand, RTK-CPDGPS is used to determine the position of mobile receivers. They resolve the ambiguity of the number of cycles supposing that they are an integer number. Then, there are only a few possible values for the equation of the number of cycles. This kind of receivers resolves the equation really quickly but they do not always obtain the optimal solution. Both the S-CPDGPS and the RTK-CPDGPS have an accuracy of a few centimeters.

Error considerations for GPS receivers

Two kinds of errors can be defined for GPS receivers and GPS guidance systems (August *et al.*, 1994; ISO, 2008; ISO, 2009): (i) relative accuracy, precision, reproducibility or repeatability is the degree to which the measurements reported by a GPS receiver under a fixed placement of the receiver provide close positions and (ii) absolute accuracy is the degree of closeness of positions to their true value.

Figure 3 shows the difference between relative accuracy or precision and absolute accuracy.

For guidance systems, in applications where the time between pass and pass is relatively short and the trajectories must not be saved from year to year, precision or relative accuracy can be taken as the most important variable.

Coordinates and lateral error calculation

The GPS system was developed for determining the position of a receiver on the earth.

GPS receivers usually provide their position in geodetic coordinates. This coordinate system is based on an ellipsoid. In the case of the HI 204 III Haicom GPS receiver, the ellipsoid is defined in the World Geodetic System of 1984 (WGS84) datum. However, this kind of coordinate system is not appropriate to work with tractors, because they are not Cartesian coordinates. Consequently, these coordinates were transformed to Universal Transverse Mercator (UTM) coordinates (DMA, 1989), which are Cartesian coordinates. UTM coordinates project geodetic coordinates over a cylinder perpendicular to the rotational axis of the earth. It divides the earth surface into sixty zones. Coticchia-Surace equations (Martin-Asin, 1983; Ferrero *et al.*,

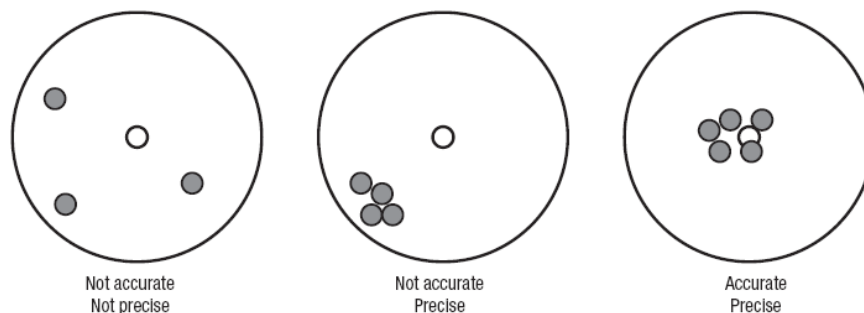


Figure 3. Difference between precision and accuracy.

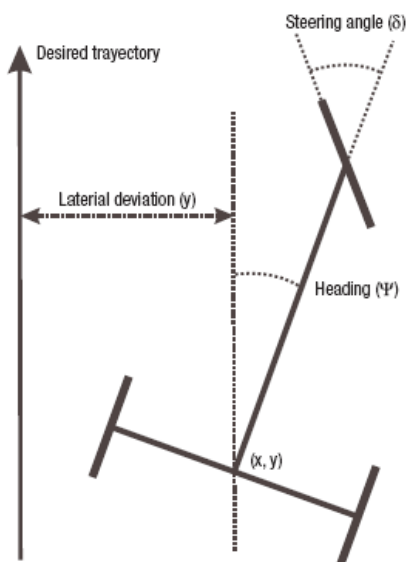


Figure 4. Instantaneous error from the tractor to the desired trajectory.

2009) were used to convert geodetic coordinates into UTM coordinates. With Cartesian coordinates, the representation of the straight trajectory and the calculation of the distance from the tractor to the trajectory are trivial, and this calculation was done by means of geometric relationships. Figure 4 shows how the distance from the tractor to the desired trajectory was calculated.

Placement of the GPS receiver on the tractor

A delay in the heading information affects the guidance. The position of the GPS receiver influences the heading measurement (Stombaugh *et al.*, 1999). Consequently, diverse tests were done to evaluate the influence of the receiver placement in the heading measurement. From these tests, it was deduced that the placement of the GPS in an advanced position with regard to the central point of the rear axle of the tractor, produces enlargements in the heading that are as substantial as the displacement of the receiver. This is because the GPS uses the variation of position to calculate the course. Therefore, placing the GPS in an advanced position produces a bigger position variation in a turn than placing it on the tractor pivot point.

Therefore, the receiver was placed in the front of the cabin on its symmetry line because this position

provides considerable stability and a quick system response (Stombaugh *et al.*, 1999).

Control laws

This section provides a brief theoretical description of each one of the evaluated control laws.

Orientation and distance proportional control law

The steering angle is calculated as the addition of two terms. The first term is proportional to the angle difference between the heading of the tractor and the orientation of the desired trajectory. The second term is proportional to the distance from the tractor to the desired trajectory. This second term allows the correction of path deviations. However, it produces instabilities when the distance to the path increases. For this reason, the second term has been modified decreasing K_2 gain when the distance to the path is very large. Eq. [3] represents the control applied in this case, where $\theta_{trajectory}$ is the instantaneous path orientation, $\theta_{tractor}$ is the instantaneous heading of the tractor, $d_{trajectory}$ is the distance from the tractor to the trajectory and K_1 and K_2 are adjustable proportional constants for the orientation and the distance, respectively.

$$\delta = K_1 \cdot (\theta_{trajectory} - \theta_{tractor}) + K_2 \cdot d_{trajectory} \quad [3]$$

The adjustment of this control law was done experimentally for every tested speed. The step response was analyzed for the adjustment. Initially K_2 was fixed to 0 and K_1 was fixed to a low value. K_1 was incremented up to the maximum value that did not cause instability in the system and allowed a quick response. It was done by tracking a step trajectory for each value of K_1 and analyzing only the heading response. Next, this maximum value of K_1 was decreased a bit and K_2 was increased until a value that kept the system stable and only small deviations over the trajectory were observed.

Vector pursuit control law

There are several kinds of vector pursuit control laws. All of them are based on applying a vector that goes from the tractor to an advanced point in the path (Gerrish *et al.*, 1997). The type of control depends on the point that is considered on the tractor. In this study,

the vector is applied from the central point of the back axle of the tractor. The steering angle is obtained applying a proportional-integral-derivative (PID) controller over the angle formed between this vector and the orientation of the tractor. The equations used in this law are [4] and [5], where K_P , K_D and K_I are the constants of the controller and $\theta'_{tractor}$ is the angle between the tractor heading and the pursuit vector [6].

$$\delta = K_P \cdot \theta'_{tractor} + K_D \cdot \frac{(\theta'_{tractor} - \theta'_{tractor-1})}{T} + I \quad [4]$$

$$I = I_{-1} + K_I \cdot (\theta'_{tractor} - \theta'_{tractor-1}) \cdot T \quad [5]$$

$$\theta'_{tractor} = \theta_{tractor} - \theta_{pursuit_vector} \quad [6]$$

The precision of this law depends on the adjustment of its parameters. If the distance of the anticipated point decreases, a better approximation to the path is obtained, the response is quicker and the tracking error is smaller. Nevertheless, a decrease in the anticipated point distance produces bigger and quicker movements in the steering and increases sensitivity to noises in the GPS position, to pot-holes in the land or oscillations of the tractor. The adjustment of the PID controller is similar to that of any other application so that, as the proportional constant is increased, the oscillations in the steering will also be increased. The derivative part largely smoothes these oscillations, while the integral part allows for the correction of small deviations over the path produced by small calibration errors when the tractor is very close to the path.

For the experimental adjustment of this control law, the advance point distance was looked for first. To do this, K_D and K_I constants were fixed to zero and K_P was fixed to a small value. Later, the advance point distance was changed until a value that had a good response was found. When this value was found, K_P constant was incremented until the critical gain where the system started to oscillate was found. Later, this gain was decreased by half. Next, the integral constant was looked for. This value was adjusted to eliminate stationary errors. Finally, the derivative constant was not considered.

Linear quadratic regulator

This control law is based on linearization along with a Linear Quadratic Regulator (O'Connor *et al.*, 1996; Thuillot *et al.*, 2002). The expression for this controller is given by Eq. [7], where δ is the steering angle, K_1 and K_2 the gain constants, L is the distance between

the axles of the tractor, $d_{trajectory}$ is the distance to the path, and θ is the difference of orientation between the tractor and the path.

$$\delta = \arctan[(-K_1 d_{trajectory} - K_2 \tan \theta) L \cos^3 \theta] \quad [7]$$

The stability of this control law can be mathematically proven, but this control law suffers from singularities at $\cos \theta = 0$. In other words, if the heading of the tractor is oriented perpendicular to the desired trajectory, the steering angle input will be zero. In this situation, the vehicle will get stuck and will be unable to follow the desired trajectory. In addition, even near the singularity, the steering angle input is close to zero. In this situation, even though the vehicle is able to eventually converge to the desired trajectory, the actual path of the vehicle may not be desirable.

The experimental adjustment of this control law was similar to the orientation-distance control law. Initially, K_1 was fixed to 0 and K_2 was fixed to a low value. K_2 was incremented up to the maximum value that did not cause instability in the system and allowed a quick response. It was done by tracking a step trajectory for each value of K_1 and analyzing only the heading response. Next, this maximum value of K_2 was decreased a bit and K_1 was increased until a value that kept the system stable and only small deviations over the trajectory were observed.

Results

Two types of tests were done in order to evaluate the accuracy of the autonomous guidance system using a low cost GPS as unique positioning receiver. On one hand, the static relative horizontal GPS receiver accuracy was measured. On the other hand, automatic guidance errors were evaluated. Total guidance error can be calculated taking into account the static error of the receiver and the guidance error.

GPS positioning errors

One of the most evaluated variables of guidance systems is pass to pass accuracy (ISO, 2008). The tests for obtaining this variable must be done in passes spaced out less than 15 minutes. Consequently, accuracy of guidance systems is mainly important in short periods of time.

In order to evaluate GPS accuracy, positioning data were taken for three different low-cost receivers at a fixed position in three consecutive days. Figure 5 shows

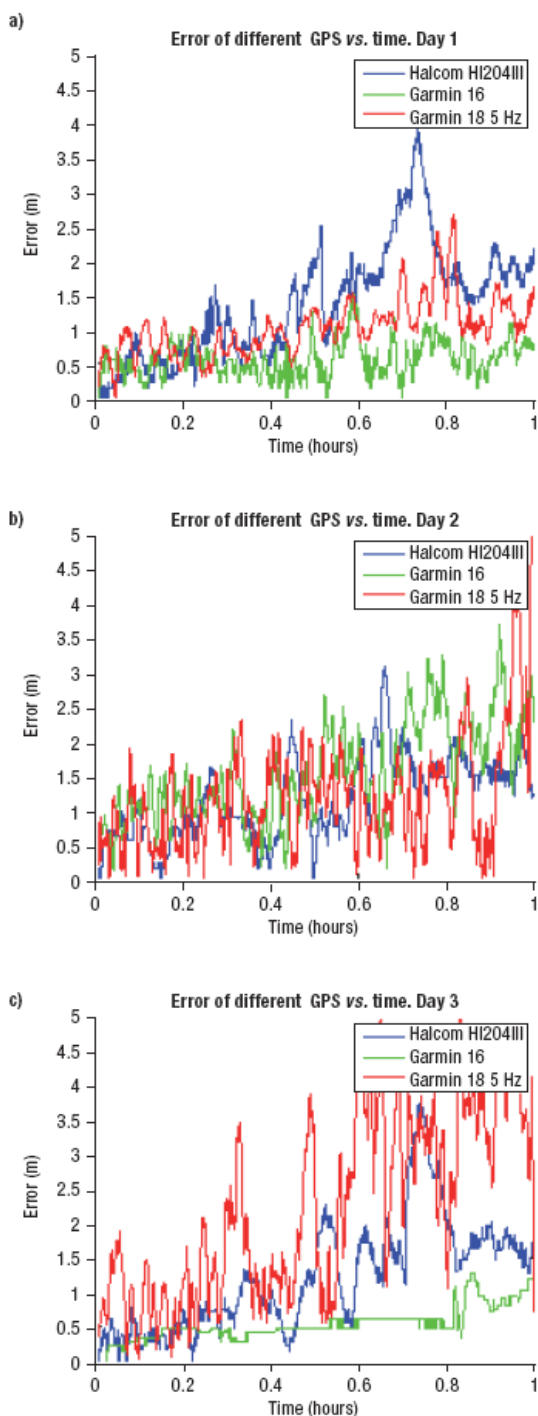


Figure 5. Instantaneous relative accuracy for three low-cost receivers during one hour on three different days. a) First day. b) Second day. c) Third day.

the error of each GPS during one hour for the three days. Error was calculated as the distance between the initial position reported for the receiver and the rest of the positions, and it had an upward trend with the time. In the first 15 min, error was less than 1 m.

Trajectory tracking errors

Real guidance tests were carried out in order to evaluate guidance error. Tests were done with the three different control laws described before. Straight tracking and step response were evaluated. The reference trajectory was taken for each test from the first and the last position of the trajectory marked on the ground. These points were taken directly from the positions reported by the GPS. The total length of the trajectory was 200 m. The step was placed at 50 m from the beginning of the trajectory and the remaining 150 m were used to study the step response and the continuous tracking error. All the tests were done at three speeds: 3, 6 and 9 km h⁻¹. The control laws were experimentally adjusted for each speed as is described in the Methods section. Table 1 shows the adjustment parameters for the tests.

Figure 6 shows the step response and the instantaneous error for the three control laws at a speed of 3 km h⁻¹.

The step response was similar for the three control laws. The instantaneous error was similar too. The

Table 1. Adjustment parameters for the control laws used in the study. Parameters were adjusted for every tested speed (3, 6 and 9 km h⁻¹). Each control law has its own parameters (explained earlier in the control laws section)

Parameter	Speed (km h ⁻¹)		
	3	6	9
Orientation-distance			
K_1	900	750	500
K_2	0.5	0.4	0.35
Pursuit			
Advance point distance (m)	4	8	10
K_p	0.5	0.35	0.3
K_D	0	0	0
K_I	0.01	0.01	0
O'Connor			
K_1	0.1	0.06	0.03
K_2	0.35	0.25	0.18

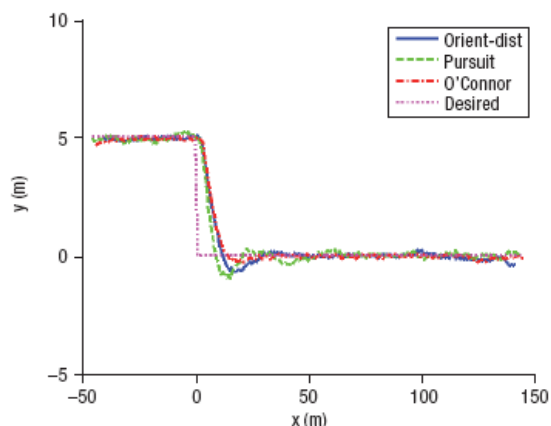


Figure 6. Step response and instantaneous error for Pursuit, O'Connor and Orientation-distance proportional control laws at 3 km h⁻¹.

distance that the tractor needed to reach the trajectory after the step was applied was approximately 40 m. The movement of the tractor was lightly underdamped. The instantaneous error was constant along the trajectory. The pursuit law had more oscillation. The three control laws were adjusted to be very slow. The control law that presented the best behavior in the step response and in the continuous guidance was the O'Connor control law.

Figure 7 shows the step response and the instantaneous error for the three control laws at a speed of 6 km h⁻¹. In this case, it is possible to see how the instantaneous error was very similar to that obtained for 3 km h⁻¹. The system was stable with all the control

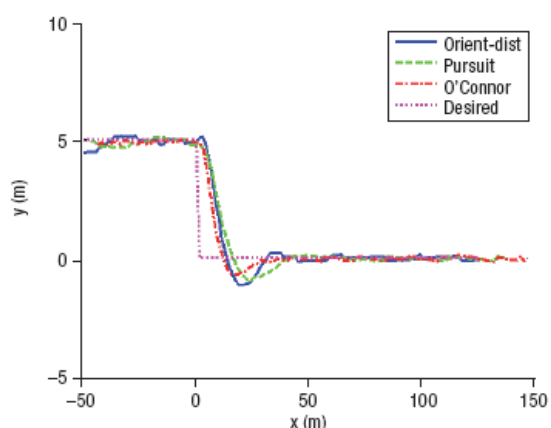


Figure 7. Step response and instantaneous error for Pursuit, O'Connor and Orientation-distance proportional control laws at 6 km h⁻¹.

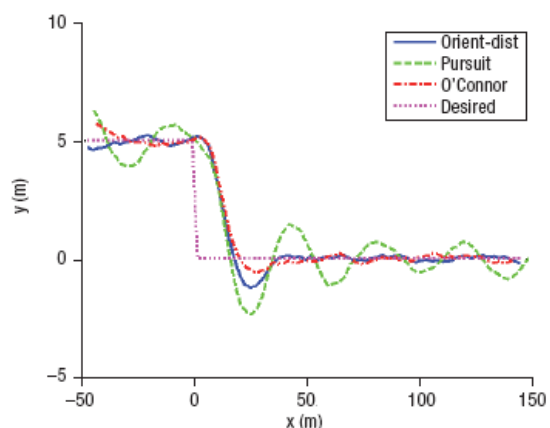


Figure 8. Step response and instantaneous error for Pursuit, O'Connor and Orientation-distance proportional control laws at 9 km h⁻¹.

laws and it was capable of driving the tractor at this speed. All responses were very similar, but the O'Connor control law was a little faster.

Finally, Figure 8 shows the step response and the instantaneous error for each control law at 9 km h⁻¹. In this figure, the differences were greater. The pursuit control law was slower reaching the trajectory and it had some oscillations. These oscillations were constant along the trajectory. The orientation and distance proportional law was faster, although it had a larger over peak than O'Connor. The tractor advanced several meters between the step and the achievement of the trajectory.

Finally, a histogram is presented in Figure 9 for analyzing the errors of the three control laws at the three

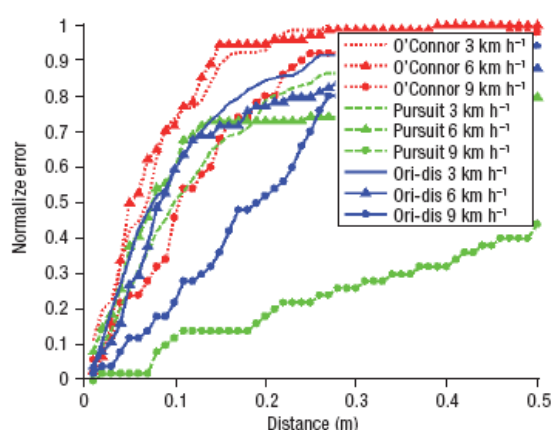


Figure 9. Accumulative histogram for the instantaneous error of the O'Connor, the Pursuit and the Orientation-Distance control laws at 3, 6 and 9 km h⁻¹.

speeds in the continuous tracking of the trajectory. This histogram was obtained from the instantaneous error when the trajectory was stable; it is between 50 and 150 m. The histogram represents the normalized accumulated error for each distance.

From this histogram it is possible to deduce that the O'Connor control law produced the lowest errors independent of speed and the Pursuit control law was the worst. Moreover, it is possible to observe that error was very similar for 3 and 6 km h⁻¹ and it was increased for 9 km h⁻¹.

Total guidance error

Total guidance error was calculated from the previous tests. This error is the result of adding GPS error and guidance error. The total guidance error for all the control laws and for all tested speeds was lower than 1.25 m in 75% of the trajectory, except in the pursuit vector control law at 9 km h⁻¹, which was unstable. This error will increase with time, due to the relative accuracy of the receiver which grows with time and it is the main component of the total guidance error.

Discussion

This paper describes the implementation of an autonomous guidance system for an agricultural tractor and analyzes the use of a low-cost GPS as the only positioning sensor for guidance. This article covers a gap in the scientific literature in the field of precision agriculture because there are no articles in the scientific literature that study the guidance of a tractor using only a low-cost GPS receiver as a positioning sensor. Usually, expensive RTK-CDGPS are used in the scientific literature (Noguchi *et al.*, 1998; Reid *et al.*, 2000; Thuillot *et al.*, 2002; Lenain *et al.*, 2006; Gan-Mor *et al.*, 2007). Only few articles (Guo and Zhang, 2004; Peters and Evett, 2005; Keskin and Say, 2006) have used this kind of receiver for obtaining the position of an irrigation system (Peters and Evett, 2005), measuring the speed of a vehicle (Keskin and Say, 2006), or the guidance of an off-road vehicle (Guo and Zhang, 2004; Price and Nistala, 2005). In this article, the complete guidance system has been implemented and static and relative errors have been studied obtaining clear results. Several articles (Devlin *et al.*, 2007; Gan-Mor *et al.*, 2007) have studied GPS errors or guidance

tracking errors, however, none have applied and studied a low-cost guidance system.

GPS accuracy can range from 1-2 cm to 100 m (Czajewski, 2004; Gan-Mor *et al.*, 2007; Valbuena *et al.*, 2010) depending on the kind of GPS receiver employed. For low-cost GPS receivers using wide augmentation area system (WAAS) corrections, position accuracy of 95% can be less than 3 m (Peters and Evett, 2005). In contrast, relative accuracy or pass to pass accuracy (ISO, 2008) is the variable that is really important for multiple agricultural applications. Experimental tests carried out in this article have demonstrated that for a short period of time of 15 min this relative accuracy can be reduced to approximately 1 m. This relative accuracy could be enough for applications where wide width of work is used, for example, fertilizer application.

Novelty guidance systems and control laws have been employed in a multitude of scientific articles (Gerrish *et al.*, 1997; Stoll and Kutzbach, 2000; Thuillot *et al.*, 2002; Lenain *et al.*, 2006). However, all of them have been developed and analyzed with expensive RTK-CDGPS receivers and, in several cases, combined with expensive INS systems (Noguchi *et al.*, 1998). In contrast, this article studied the behavior of these control laws with low-cost receivers. Three control laws were implemented and analyzed by means of real tests. A soft adjustment of the control laws was done in order to avoid making the system unstable. In contrast to other articles (O'Connor *et al.*, 1996; Steinz *et al.*, 2002) where big differences were found between control laws, in this article a similar behavior for all the control laws was obtained and it was determined by the control law adjustment and by the receiver accuracy.

In summary, it is possible to guide autonomously an agricultural tractor with a low-cost receiver as positioning sensor. No more sensors are necessary for the autonomous guidance of the tractor. The maximum speed for the automatic guidance is approximately 9 km h⁻¹. Higher speeds make the autonomous guidance system unstable.

The behavior of the different control laws is similar with low-cost GPS receivers and it is conditioned by its adjustment. With a proper adjustment of the control laws, all of them obtain similar results.

Errors in pass-to-pass trajectories can usually be less than 1 m. This error is composed by the guidance error, typically less than 20 cm, and the positioning error relative to a previous pass that increases with time.

Acknowledgments

This work was supported partially by the regional 2010 Research Project Plan of the *Junta de Castilla y León* (Spain), under project VA034A10-2 and partially by the 2009 ITACyL project entitled «Realidad aumentada, Bci y correcciones RTK en red para el guiado GPS de tractores (ReAuBiGPS)». J. I. Arribas work was supported by the *Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología* under grant TEC2007-67037 and by fellowship JC-2009-00255 under «Programa Nacional de Movilidad de Recursos Humanos de Investigación, *Ministerio de Educación, Spain*».

References

- ASHRAF M.A., TAKEDA J., OSADA H., CHIBA S., 2003. Generalised steering strategy for vehicle navigation on sloping ground. *Biosyst Eng* 86, 3, 267-273.
- AUERNHAMMER H., 2001. Precision farming – the environmental challenge. *Comput Electron Agric* 30(1-3), 31-43.
- AUGUST P., MICHAUD J., LAVASH C., SMITH C., 1994. GPS for environmental applications: accuracy and precision of locational data. *Photogramm Eng Remote Sens* 60(1), 41-45.
- BENNER P., FAßBENDER H., 1999. SLICOT drives tractors. Research results of the European Community BRITE_EURAM III Thematic Networks Programme NICONET. Available in <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.48.6815&rep=rep1&type=ps>. [5 May 2011].
- BENSON E.R., REID J.F., ZHANG Q., 2003. Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester. *T ASABE* 46(4), 1255-1264.
- BILLINGSLEY J., SCHOENFISCH M., 1997. The successful development of a vision guidance system for agriculture. *Comput Electron Agric* 16(2), 147-163.
- BLOCHL B., TSINAS L., 1994. Automatic road following using fuzzy control. *Control Eng Pract* 2(2), 305-311.
- BORGELT S.C., HARRISON J.D., SUDDUTH K.A., BIRRELL S.T., 1996. Evaluation of GPS for applications in precision agriculture. *Appl Eng Agric* 12(6), 633-638.
- BUSSE W., COENENBERG H., FELDMAN F., CRUSINBERRY T.F., 1977. The first serial produced automatic steering system for corn combines and forage harvesters. *Proc Int Grain and Forage Harvesting Conf*, Ames, IA (USA). pp. 43-47.
- CZAJEWSKI J., 2004. The accuracy of the global positioning systems. *IEEE Instrum Meas Mag* 40, 56-60.
- CORDESSES L., CARIOU C., MARTINET P., THIBAUD C., 1999. CP-DGPS based combine harvester without orientation sensor. *Int Conf of the Institute of Navigation, ION-GPS'99*, Nashville, USA. pp. 2041-2046.
- DAF, 2008. Interface specification IS-GPS-800. Navstar GPS Space Segment/User Segment L1C interfaces. Department of the Air Force, Science Applications International Corporation, California.
- DEVLIN G.J., MCDONNELL K.P., WARD S.M., 2007. Performance accuracy of low cost dynamic non-differential GPS on articulated trucks. *Appl Eng Agric* 23(3), 273-279.
- DMA, 1989. DMATM 8358.2, the universal grids: universal transverse mercator (UTM) and the universal polar stereographic (UPS). Defense Mapping Agency, Washington.
- FERRERO S., PIEROZZI M., REPETTI L., SURACE L., 2009. An algorithm for the unambiguous determination of the equidistant boundary line between two (or more) coastlines. *Appl Geomat* 1(3), 49-58.
- GAN-MOR S., CLARK R.L., UPCHURCH B.L., 2007. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Comput Electron Agric* 59(1-2), 31-38.
- GARCÍA-PÉREZ L., GARCÍA-ALEGRE M.C., RIBEIRO A., GUINEA D., 2008. An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle. *Comput Electron Agric* 60(1), 39-48.
- GERRISH J.B., FEHR B.W., VAN EE G.R., WELCH D.P., 1997. Self-steering tractor guided by computer-vision. *Appl Eng Agric* 13(5), 559-563.
- GUO L.S., ZHANG Q., 2004. A low-cost navigation system for autonomous off-road vehicles. *Proc Automation Technology for Off-road Equipment Conf. ASABE*, 701P1004.107-119.
- ISO, 2008. ISO/DIS 12188-1 test procedures for positioning and guidance systems in agriculture. Part I: Dynamic testing of satellite-based positioning devices. International Organization for Standardization.
- ISO, 2009. ISO/WD 12188-1, tractors and machinery for agriculture and forestry. Testing procedures for positioning and guidance systems in agriculture. Part II: Satellite-based auto-guidance systems tested during straight and level travel. International Organization for Standardization.
- KEICHER R., SEUFERT H., 1999. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Comput Electron Agric* 25(1-2), 169-194.
- KESKIN M., SAY S.M., 2006. Feasibility of low cost GPS receivers for ground speed measurement. *Comput Electron Agric* 54, 36-43.
- KIRK T.G., ZOERB G.C., WILSON J.N., 1976. A furrow-following tractor guidance system. *Proc ASABE Annual International Meeting*, St Joseph, MI, USA. Paper No. 76-001.
- LEEMANS V., DESTAIN M.F., 2007. A computer-vision based precision seed drill guidance assistance. *Comput Electron Agric* 59(1-2), 1-12.
- LENAIN R., THUILLOT B., CARIOU C., MARTINET P., 2006. High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. *Auton Robot* 21, 79-97.
- MARTIN-ASIN F., 1983. *Geodesia y cartografía matemática*, 3ª ed. Ed Paraninfo, Madrid. [In Spanish].

- NOGUCHI N., REID J.F., WILL J., BENSON E.R., 1998. Vehicle automation systems based on multi-sensor integration. Proc ASABE Annual International Meeting. St Joseph, MI, USA. Paper No. 983111.
- O'CONNOR M., BELL T., ELKAIM G., PARKINSON B., 1996. Automatic steering of farm vehicles using GPS. III Int Conf Precision Agriculture, Minneapolis, MN, USA.
- PARISH R.L., GOERING C.E., 1970. Developing an automatic steering system for a hydrostatic vehicle. T ASABE, 523-527.
- PETERS R.T., EVETT S.R., 2005. Using low cost GPS receivers for determining field position of mechanized irrigation systems. Appl Eng Agric 21(5), 841-845.
- PRICE R.R., NISTALA G., 2005. Development of an inexpensive autonomous guidance system. Proc ASABE Annual International Meeting. Paper No. 051139.
- REID J.F., ZHANG Q., NOGUCHI N., DICKSON M., 2000. Agricultural automatic guidance research in North America. Comput Electron Agric 25(1-2), 155-167.
- SLAUGHTER D.C., GILES D.K., DOWNEY D., 2008. Autonomous robotic weed control systems: a review. Comput Electron Agric 61(1), 63-78.
- STAFFORD J.V., 1999. GPS in agriculture – A growing market! J Navig 52(1), 60-69.
- STEINZ A., DIMA C., WELLINGTON C., HERMAN H., STAGER D., 2002. A system for semi-autonomous tractor operations. Auton Robot 13, 87-104.
- STOLL A., KUTZBACH H.D., 2000. Guidance of a forage harvester with GPS. Prec Agric 2, 281-291.
- STOMBAUGH T.S., BENSON E.R., HUMMEL J.W., 1999. Guidance control of agricultural vehicles at high field speeds. T ASABE 42(2), 537-544.
- SUBRAMANIAN V., BURKS T.F., ARROYO A.A., 2006. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. Comput Electron Agric 53, 130-143.
- THUILLOT B., CARIOU C., MARTINET P., BERDUCAT M., 2002. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS. Auton Robot 13(1), 53-71.
- VALBUENA R., MAURO F., RODRÍGUEZ-SOLANO R., MANZANERA J.A., 2010. Accuracy and precision of GPS receivers under forest canopies in a mountain environment. Span J Agric Res 8(4), 1047-1057.
- WILSON J.N., 2000. Guidance of agricultural vehicles – a historical perspective. Comput Electron Agric 25(1-2), 3-9.
- WU D., ZANG Q., REID J.F., QIU H., BENSON E. R., 1999. Adaptive control of electrohydraulic steering system for wheel-type agricultural tractors. Proc ASABE Annual International Meeting, Toronto, Ontario, Canada. Paper No. 993079.
- ZHANG N.Q., WANG M.H., WANG N., 2002. Precision agriculture-a worldwide overview. Comput Electron Agric 36, 113-132.
- ZHANG Y., CHUNG J.H., VELINSKY S.A., 2003. Variable structure control of a differentially steered wheeled mobile robot. J Intell Robot Syst 36(3), 301-314.
- ZHU Z.X., TORISU R., TAKEDA J.I., MAO E.R., ZHANG Q., 2005. Neural networks for estimating vehicle behaviour on sloping terrain. Biosyst Eng 91(4), 403-411.

2. Artículo 2 del compendio

2.1. Datos del artículo

Los datos del artículos son los siguientes:

- **Título:** Development and Validation of Globally Asymptotically Stable Control Laws for Automatic Tractor Guidance
- **Autores:** Jaime Gómez Gil ; Ju-Chil Ryu; Sergio. Alonso García; Sunil K. Agrawal.
- **Revista de publicación:** Applied Engineering in Agriculture

2.2. Artículo

El artículo completo se muestra en las siguientes páginas.

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF GLOBALLY ASYMPTOTICALLY STABLE CONTROL LAWS FOR AUTOMATIC TRACTOR GUIDANCE

J. Gomez-Gil, J.-C. Ryu, S. Alonso-Garcia, S. K. Agrawal

ABSTRACT. *Automatic guidance of agricultural vehicles requires the use of sensors and control techniques. While the Global Positioning System (GPS) is widely used as a position sensor, different control laws have been used in the scientific literature based on geometry, heuristics, and models. In this article, two new control laws for navigation control of agricultural tractors were developed with one for following straight lines and the other for tracking circular arcs. These two controllers have virtually the same structure based on the tractor's kinematic model. They have no singularity point in the state space. Also, global asymptotic stability is guaranteed with the control laws. Guidance with the proposed controllers in straight lines and circular arc trajectories was simulated and field-tested. The experiments were performed with a tractor equipped with an automatic GPS guidance system. In both simulation and experiment, the control laws led the tractor to converge to the desired trajectories of straight lines and circular arc paths under three different low speeds of 1, 2, and 3 m/s and four different initial conditions that are 90° apart. The simulation and experimental results show the practical validity of the proposed controllers.*

Keywords. *Control, Global Positioning System (GPS), Guidance, Agricultural vehicles.*

Guidance and control of agricultural vehicles has experienced impressive advances in the last decade (Keicher and Seufert, 2000; Reid et al., 2000; Auernhammer, 2001; Zhang et al., 2002; Slaughter et al. 2008). These advances have been facilitated by the development of positioning systems using GPS (Lechner and Bumann, 2000; Borgelt et al. 1996), machine vision (Wilson, 2000; Subramanian et al., 2006), or both for improved precision and reliability (Kalman, 1960; Barshalom and Forman, 1987; Zhang et al., 1999).

Scientific literature provides information about different implementations employed in the guidance of agricultural tractors. Some used machine vision to look ahead and obtain the next via point along a path (Gerrish et al., 1997; Pilarski et al., 2002). This next via point can then be reached using a simple control law proportional to an angle difference between the vehicle orientation and the goal (Kise et al., 2005), by steering to reach the goal following a circular arc (Ku and Tsai, 1999; García-Pérez et al., 2008) or using the

orientation information from the theory of screws (Wit et al., 2004).

Even though motion of a tractor is governed by non-linear models (Feng and He, 2005), *PID* controllers have yielded practical results (Benson et al., 2003; Subramanian et al., 2006). Other strategies are based on linearization of the desired path along with a *P* controller to reduce distance and orientation errors (Noguchi et al., 1997; Stoll and Kutzbach, 2000; Nagasaka et al., 2004). Other implementations use linearization, followed by a *LQR* controller (O'Connor et al., 1996; Thuilot et al., 2002). Fuzzy logic controllers and neural networks have also been used to control steering of agricultural vehicles (Cho and Ki, 1999; Cho and Lee, 2000; Ashraf et al., 2003).

Some of the control laws do not have the property of global asymptotic stability. In other words, the tractor may not converge to the desired trajectory when it starts far away from the desired trajectory. Some other controllers do have a mathematical proof of stability, but they have singularities in certain conditions where the controller will not work properly. To the authors' knowledge, no control laws have been reported to have these both properties in the agricultural scientific literature. Therefore, the goal of this study is to develop simple but effective controllers for agricultural tractors without these limitations. Furthermore, experimental validation of the proposed controllers is also an important objective of this study as the design of the controllers. These controllers are based on the nonlinear kinematic model of a tractor and were designed for following straight line trajectories and circular arcs, respectively, so it is expected that the tractor could follow any kinematically admissible trajectory. In addition, the two controllers have virtually the same structure. The performance of the controllers was assured using Lyapunov stability theory and was experimentally tested.

Submitted for review in September 2009 as manuscript number IET 8216; approved for publication by Information & Electrical Technologies Division of ASABE in June 2011.

The authors are **Jaime Gomez-Gil**, Lecturer, Department of Signal Theory, Communications and Telematic Engineering, University of Valladolid, Valladolid, Spain; **Ji-Chul Ryu**, Postdoctoral Fellow in the Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois; **Sergio Alonso-Garcia**, Engineer, Department of Signal Theory, Communications and Telematic Engineering, University of Valladolid, Valladolid, Spain; and **Sunil Kumar Agrawal**, Professor, Mechanical Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware. **Corresponding author:** Jaime Gomez-Gil, E.T.S. Ing. Telecomunicación, Camino del Cementerio s/n, 47011 Valladolid, Spain; phone: 0034-983423660; e-mail: jgomez@tel.uva.es.

MATERIALS AND METHODS

KINEMATIC MODEL

The vehicle has a steered front wheel and the rear wheels are forward-driven without being steered (fig. 1). Therefore, the inputs to this system are the driving speed, u , and the front wheel steering angle, δ . The position of the midpoint O of the rear wheel axle is (x, y) . θ is the orientation of the vehicle with respect to X-axis. δ is the steering angle of the front wheel with respect to forward direction of the vehicle. L is the length from O to the center of the front wheel.

Assuming no-slip condition on the wheels, the kinematic model of the vehicle is given by:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \theta \\ \dot{y} &= u \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{u}{L} \tan \delta \end{aligned} \quad (1)$$

This model is typically called the bicycle model. This kinematic model will be used for the controller design in the next section and the kinematic model-based controllers are suggested to be used at lower speeds, for example, under 4.5 m/s since they cannot represent dynamic effects such as slipping (Karkee and Steward, 2010).

CONTROLLER DESIGN

In this section, two controllers are presented; one for a farming tractor to follow straight lines and the other for circular arcs. The two proposed controllers have virtually the same structure and their asymptotic global stability are proven using Lyapunov stability.

Controller for Following a Straight Line

When a farming vehicle follows a straight line, the coordinates can be reoriented, without loss of generality, so that x-axis is along the desired straight line and y-axis the deviation from this straight line. Therefore, the desired trajectory for this system is described by $y = 0$. Moreover, the driving speed u is considered to be a (positive) constant α since the driving speed is usually kept constant while operating in the field. With a positive driving speed, the problem of following a straight line can be considered a stabilization problem to the origin $(0, 0)$ of y and θ .

On introducing an input transformation:

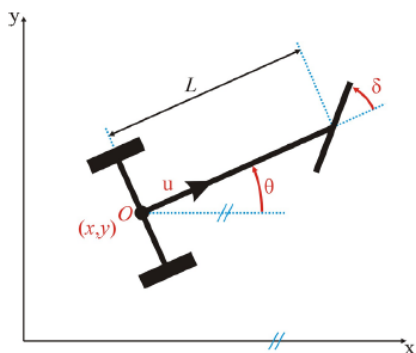


Figure 1. The schematic of a farm tractor in Cartesian coordinates.

$$\eta = \frac{1}{L} \tan \delta \quad (2)$$

where η is a new input, the kinematic variables that are of interest in the control are given by:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \alpha \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \alpha \eta \end{aligned} \quad (3)$$

Theorem 1: For the system described in equation 3, the equilibrium point, $y = 0$ and $\theta = 0$, is globally asymptotically stable if the control η is chosen as:

$$\eta = \begin{cases} -k_1 y \frac{\sin \theta}{\theta} - k_2 \theta & \theta \neq 0 \\ -k_1 y & \theta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

where k_1 and k_2 are positive constant control gains.

Proof: Let us consider a Lyapunov function:

$$V = \frac{1}{2} k_1 y^2 + \frac{1}{2} \theta^2 \quad (5)$$

The time derivative of V is:

$$\dot{V} = k_1 y \dot{y} + \theta \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\dot{V} = k_1 y \alpha \sin \theta + \alpha \theta \eta \quad (7)$$

On substitution equation 4 into equation 7, \dot{V} can be expressed as:

$$\dot{V} = -k_2 \alpha \theta^2 \quad (8)$$

$$\dot{V} \leq 0 \quad (9)$$

Note that $\dot{V} = 0$ when $\theta = 0$ as it expected from equation 7. Although \dot{V} is only negative semi-definite, it can be proven that the origin is a globally asymptotically stable equilibrium point by LaSalle's theorem since $(y, \theta) = (0, 0)$ is the only point in the invariant set of $\dot{V} = 0$.

Note that the control input η is a continuous function. In addition, it is independent of the velocity α . In fact, the driving speed $u(t)$ does not have to be a constant because, in that case, $\dot{V} = -k_2 u \theta^2 \leq 0$ and LaSalle's theorem still can be applied except when $u = 0$, which is a trivial case.

Finally, the original input δ can be obtained from equation 2 as:

$$\delta = \tan^{-1}(L \eta) \quad (10)$$

Controller for Following a Circular Arc

Using the polar coordinate system, the kinematic equation 1 described in the Cartesian coordinates can be converted into:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= u \cos(\theta - \phi) \\ \dot{\phi} &= u \frac{\sin(\theta - \phi)}{\rho} \\ \dot{\theta} &= \frac{u}{L} \tan \delta \end{aligned} \quad (11)$$

where ρ and ϕ are the polar coordinates as described in figure 2 and θ is the same in the orientation of the tractor as in Cartesian coordinates.

Then, let us introduce the error variables defined by:

$$\rho_e = \rho - \rho_d \quad (12)$$

$$\theta_e = \frac{\pi}{2} - (\theta - \phi) \quad (13)$$

where ρ_d denotes the desired radius of curvature. When a tractor follows an arc of a circle with radius, ρ_d , it satisfies:

$$\rho_e = 0, \quad \theta_e = 0 \quad (14)$$

Consequently, similar to the straight line following controller in the previous subsection, the problem of following a circular arc can now be considered a stabilization problem to the origin of ρ_e and θ_e .

Equation 11 can be further rewritten in terms of ρ_e and θ_e as:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_e &= u \sin \theta_e \\ \dot{\phi} &= u \frac{\cos \theta_e}{\rho_e + \rho_d} \\ \dot{\theta}_e &= u \left(-\frac{\tan \delta}{L} + \frac{\cos \theta_e}{\rho_e + \rho_d} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

By introducing an input transformation similar to the one in the design of the straight line following controller, given by:

$$\eta = -\frac{\tan \delta}{L} + \frac{\cos \theta_e}{\rho_e + \rho_d} \quad (16)$$

the part of equation 15 that we are interested in is expressed as:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_e &= u \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e &= u \eta \end{aligned} \quad (17)$$

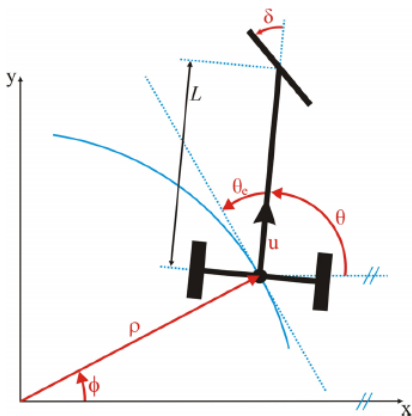


Figure 2. The farm tractor in the polar coordinates.

Note that these equations are in the same form as equation 3.

Theorem 2: For the system described in equation 17, the equilibrium point, $\rho_e = 0$ and $\theta_e = 0$, is globally asymptotically stable if the control η is chosen as:

$$\eta = \begin{cases} -k_1 \rho_e \frac{\sin \theta_e}{\theta_e} - k_2 \theta_e & \theta_e \neq 0 \\ -k_1 \rho_e & \theta_e = 0 \end{cases} \quad (18)$$

where k_1 and k_2 are positive constant control gains.

The proof of this theorem is the same as for Theorem 1 with substitution of ρ_e and θ_e for y and θ , respectively.

The original input δ can be obtained from equation 16 as:

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ L \left(\frac{\cos \theta_e}{\rho_e + \rho_d} \right) - \eta \right\} \quad (11)$$

COMPARISON WITH OTHER CONTROLLERS

In this section, the proposed controller designed in the previous section is compared with two of the most commonly used controllers. Their control laws are expressed (with notations used in this article) as:

Controller I: $\delta = -k_1 y - k_2 \theta$. This control law applies a P control to correct for deviation distance and the orientation error (Noguchi et al., 1997; Stoll and Kutzbach, 2000; Nagasaka et al., 2004).

Controller II: $\delta = \arctan \left((-k_1 y - k_2 \tan \theta) L \cos^3 \theta \right)$.

This control law is based on linearization along with a Linear Quadratic Regulator (O'Connor et al., 1996; Thuilot et al., 2002).

Controller I does not have a proof for global stability, hence, is limited in its performance. For example, the controller cannot make a tractor converge to the desired trajectory when it starts far away from the desired trajectory. Even though controller II has a mathematical proof for stability, it has singularities at $\cos \theta = 0$. In other words, if the orientation of the vehicle is oriented perpendicular to the desired trajectory, the steering angle input will be zero. In this situation, the vehicle goes straight and cannot follow the desired trajectory. In addition, even near the singularity, the steering angle input is close to zero. In this situation, even though the vehicle is able to eventually converge to the desired trajectory, the actual path of the vehicle may not be desirable. One example of such a case is shown in figure 3 that plots four trajectories with the same initial position $(x(0), y(0)) = (0, 5)$ m, but with different initial orientations of 0° , 45° , 80° , and 88° . This figure shows that Controller II does not work properly with initial orientations near 90° . Although different choices of control gains, vehicle speed and initial conditions may result in different trajectories, the phenomenon shown in the figure, i.e., large deviations from the desired path, will not disappear, since the steering angle input δ becomes close to zero when $\cos \theta$ is close to zero.

EXPERIMENTAL SYSTEM

Experiments were conducted on a two-wheel drive tractor (model 6400, Deere and Company, Moline, Ill.) with a maximum power of 73 kW (100 hp). The steering control system was implemented using a RE-30 Maxon DC motor with a GP 32 Maxon reducer (Sachseln, Switzerland). A

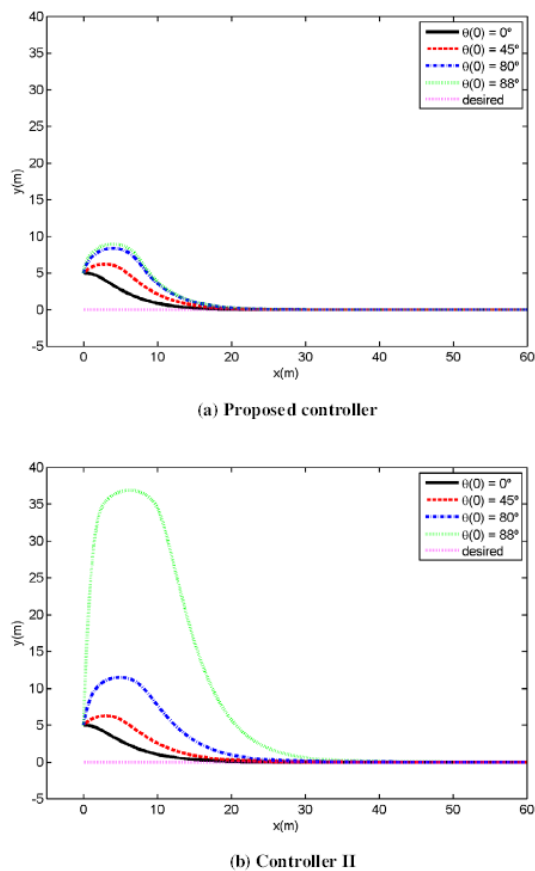


Figure 3. Trajectories of the proposed controller and controller II with different initial orientations.

pulley was used to join the DC motor with the steering wheel of the tractor as shown in figure 4b. The reduction rate was 14:1 for the reducer gear and 6:1 for the pulley.

An absolute magnetic encoder (US Digital MA3, Vancouver, Wash.) was used to measure the steering angle. A power stage (MD03) drives the DC motor with a maximum current of 20 A. A single GPS receiver Trimble R4 unit (Sunnyvale, Calif.) located at the middle of the tractor rear axle was employed. This unit received network RTK corrections from a Virtual Reference Station (VRS) by means of a GPRS connection. The GPS provided latitude, longitude location as well heading information with a rate of 5 Hz. A mean filter was applied to the last three heading data in order to smooth the orientation data. A portable laptop computer running Windows XP with an Intel T4200 processor was used to read positions from the GPS, convert the positions to the grid based Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system, calculate the steering angle δ using the control law, and send the desired steering to the controller box by serial connection. Under the Windows XP operating system, National Instruments' Lab Windows CVI (Austin, Tex.) was used as the development environment for the implementation. The steering control was implemented in a Microchip PIC16F877A microcontroller inside the controller box. It

reads the actual steering from the encoder, receives the desired steering from the laptop, and applies fuzzy logic to compute the desired speed and direction of the DC motor (Carrera-González et al., 2010). The detailed block diagram of the guidance implementation over the laptop and over the controller box is shown in figure 5. A maximum steering angle rate of 30 deg/s is achieved through this controller box. The detailed description of the controller box is beyond the scope of this article, so this article only analyzes the high level guidance control, that is, the outer loop of figure 5.

The experiments were done on a flat land with loose soil in Pozal de Gallinas, Spain. Due to the mechanical characteristics of the tractor steering, the maximum steering angle was limited to 30°. The tractor length was $L = 2.3$ m. The starting position $(x(0), y(0))$ was $(0, 5)$ m. The four initial conditions for the orientation $\theta(0)$ were 0, 90°, -180°, and -90°. The tests were performed at three different speeds of 1, 2, and 3 m/s for each initial condition.

ADJUSTING THE CONTROL GAINS

In the (kinematics-based) simulations, the control gains can be determined by only considering the shape of the path the tractor would create while converging to the desired trajectory. However, the actual gains in practical implementation need to be selected more carefully since they can be affected by other factors such as a delay in executing the steering commands, the limited GPS update frequency and position errors, and other unmodeled dynamics. To choose the control gains k_1, k_2 for the experiments, we took the following steps: (i) Initially, we fixed $k_1 = 0$ and searched for the maximum value of k_2 that did not cause an oscillation in the motion of the system at the forward speed of 1 m/s. (ii) Next, we took 80 % of this maximum value for k_2 in order to give some margin for tuning k_1 such that the system's motion stays stable when k_1 is increased. (iii) With this selected k_2 , we searched for the maximum value of k_1 that did not cause an oscillation in the motion of the tractor. This procedure of gain tuning worked satisfactorily throughout the experiments.

One can use different sets of control gains depending on the region where the tractor travels using a technique called gain scheduling because the control gains may need to be adjusted when the starting position is significantly changed. In our tests, although the gains should have been determined separately for each speed condition in order to have optimal performance, the same values of control gains were used for all three speed conditions of 1, 2, and 3 m/s in order to examine the influence of speed change to the system performance.

RESULTS

SIMULATION RESULTS

Controller for following a Straight Line

In the simulations the constant driving speed α was set at 1 m/s. The farm tractor's length L was selected to be 2.3 m which is the actual length of the tractor to be used in experiments. The initial conditions for $(x(0), y(0))$ were given as $(0, 5)$ m combined with four different initial conditions (0, 90°, -180°, -90°) of $\theta(0)$ so that the initial errors in y and θ were present in order to check the control performance. Since the proposed controller is nonlinear, there is no straight-



(a)



(b)



(c)

Figure 4. (a) Farm tractor used, (b) DC motor connected to the steering wheel, and (c) magnetic encoder.

forward way to choose appropriate control gains. By performing several simulations, we first found out the qualitative characteristic of each gain: (i) when k_2 was fixed, the increase of k_1 tended to shift the transient trajectory toward the negative X-axis before converging to the desired trajectory. In addition, it increased overshoot of the trajectory. (ii) The decrease of k_1 , when k_2 was fixed, caused

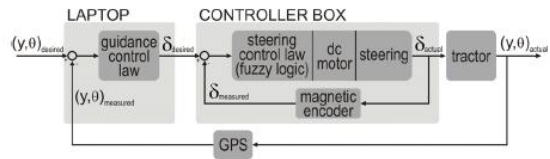
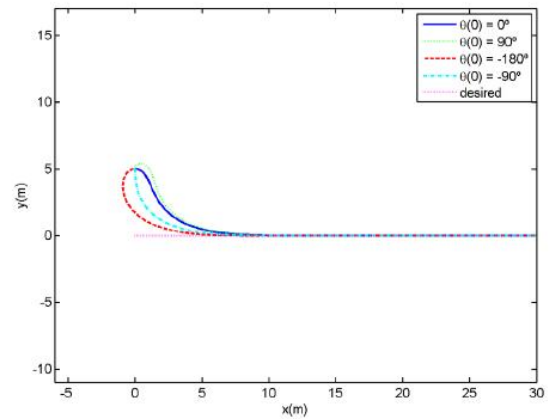


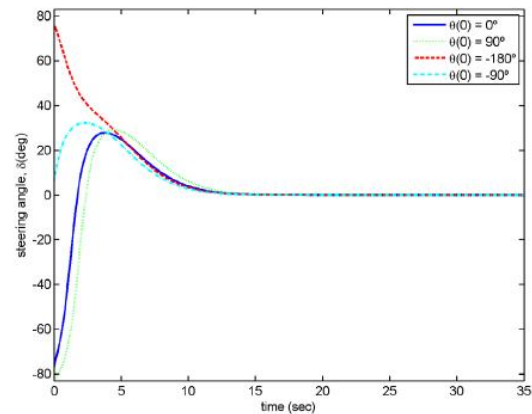
Figure 5. Block diagram of guidance implementation.

slower convergence to the desired trajectory. (iii) when k_1 was fixed, the increase of k_2 caused slower convergence to the desired trajectory, which was a similar effect caused by the increase of k_1 . (iv) The decrease of k_2 , when k_1 was fixed, caused oscillation of the trajectory before the convergence. With these characteristics in mind, the control gains were chosen as $(k_1, k_2) = (0.4, 1.1)$ by trial and error. The desired and actual trajectories under the proposed controller are shown in figure 6a.

As expected, for all four different initial orientations the actual trajectories converge to the desired trajectory, $y = 0$, as shown in figure 6a. The computed control inputs δ corresponding to each initial condition are presented in figure 6b.



(a) Trajectories followed



(b) Computed steering angle δ

Figure 6. Convergence to the desired trajectory of four trajectories with different starting orientations.

The range of computed steering angles (fig. 6b) is not applicable for practical purposes because the largest steering angle that can typically be achieved mechanically is about 30° . Hence, the steering angle input δ was limited to $\pm 30^\circ$ in the second simulation set presented in figure 7. That is, when the computed control input δ exceeded $\pm 30^\circ$, it was set to $\pm 30^\circ$. In addition, the steering rate was constrained to $30^\circ/\text{s}$, which is also necessary for practical purposes.

Controller for Following a Circular Arc

The simulations for this controller were performed under the same conditions: 1 m/s of the driving speed, $L = 2.3$ m, and the starting point of (0, 5) m with four different initial orientations θ of (0, 90° , -180° , -90°). The control gains k_1 , k_2 can be chosen similarly by taking advantage of using the same qualitative nature due to the same structure of the control law. As a result, the same value of control gains, $(k_1, k_2) = (0.4, 1)$ was used in this simulation. The desired radius of a circle ρ_d is taken $\rho_d = 10$ m. The desired and actual

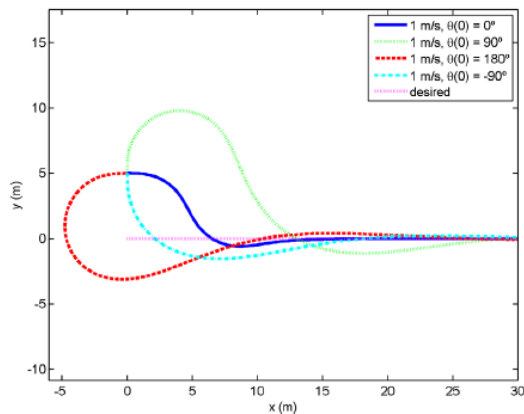
trajectories under the proposed controller are shown in figure 8a.

The actual trajectories converge to the desired trajectory for all four different initial orientations as shown in figure 8a. The computed control inputs δ corresponding to each initial condition are presented in figure 8b.

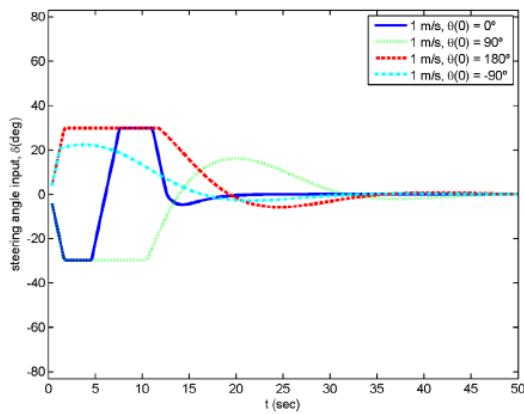
Since the range of computed steering angles (fig. 8b) is not applicable in practice, the steering angle limit of 30° as well as the $30^\circ/\text{s}$ of the steering rate constraint was taken into account in another set of simulations presented in figure 9.

EXPERIMENTAL RESULTS

The adjustment of the control gains was done with the experimental system as described in the Materials and Methods section. The iterative process to obtain the gain parameters was performed at 1 m/s speed. $(k_1, k_2) = (0.06, 0.25)$ was experimentally obtained for the controller to follow a straight line and $(k_1, k_2) = (0.04, 0.3)$ was experimentally obtained for following a circular arc.

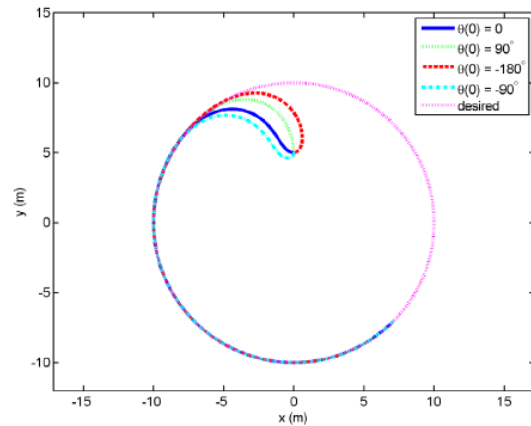


(a) Trajectories followed



(b) Computed steering angle δ

Figure 7. Convergence to the desired trajectory of four trajectories with different starting orientations, a steering angle limit of 30° , a steering rate limit of $30^\circ/\text{s}$, and a speed of 1 m/s.



(a) Trajectories followed

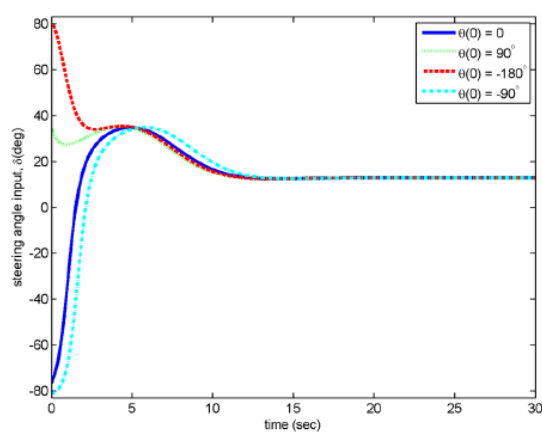
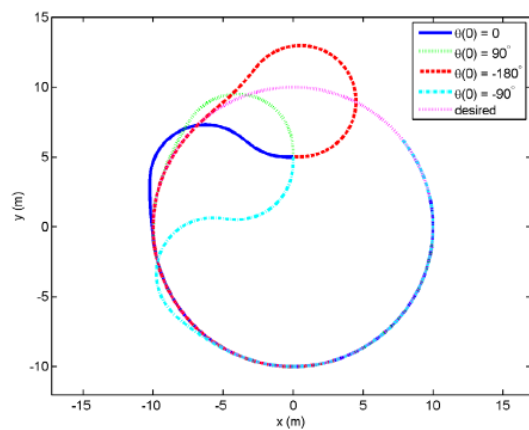
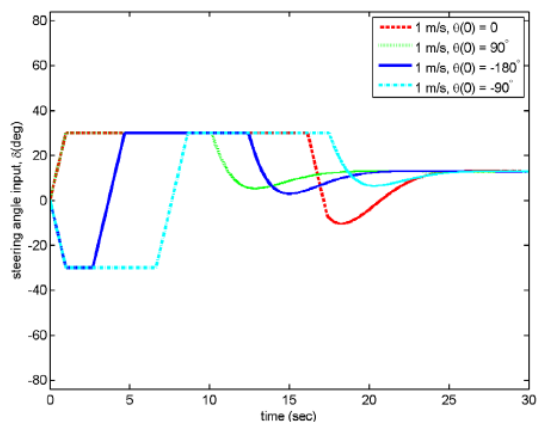


Figure 8. Convergence of four trajectories with different starting orientations to the desired trajectory.



(a) Trajectories followed

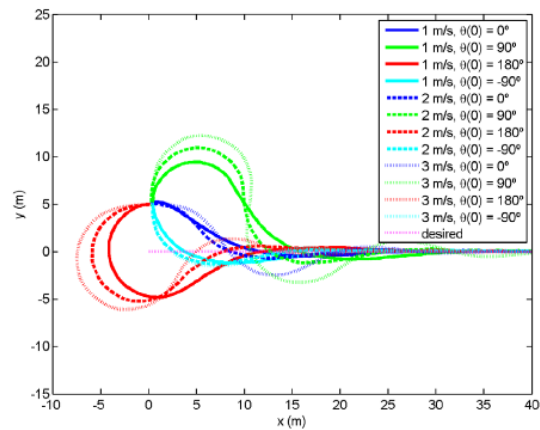


(b) Steering angle δ

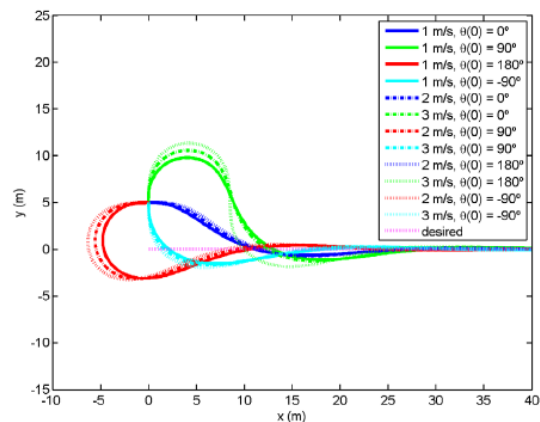
Figure 9. Convergence to the desired trajectory of four trajectories different starting orientations with a steering angle limit of 30° , a steering rate limit of $30^\circ/\text{s}$ and a speed of 1m/s .

The trajectories under the proposed controller are shown in figure 10a. The computed control inputs δ corresponding to each initial condition are presented in figure 10b. The simulation results with the same control gain used in the experiments are shown together with the experimental results. As in the simulations, for all four different initial orientations, the actual trajectories in the experiment converge to the desired trajectory of $y = 0$. The experiments were conducted five times for each initial condition, but only one of them is presented in the graph because the repeated experiments showed negligible difference.

The experiment result of the 0 deg initial orientation gives a step response performance with an input magnitude of 5 m . The settling distances to stay within $\pm 5\%$ of the step input were 17 , 22 , and 26 m for 1 , 2 , and 3 m/s , respectively. In addition, the overshoots were 9% , 14% , and 48% and the peak distance (the distance at the maximum overshoot point) were 16.5 , 12.5 and 12.9 , respectively for 1 , 2 , and 3 m/s of the tractor speeds. The root mean square (RMS) error of the actual trajectory beyond the settling distance was 0.055 , 0.058 , and 0.067 m , respectively.



(a) Experimental results



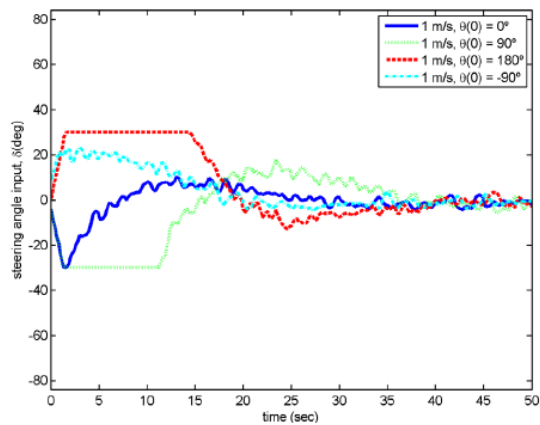
(b) Simulation results

Figure 10. Comparison between the actual and simulated trajectories of the tractor with four different starting orientations at 1 , 2 , and 3 m/s speeds, with a steering rate constraints of $30^\circ/\text{s}$ and a steering angle limit of $\pm 30^\circ$.

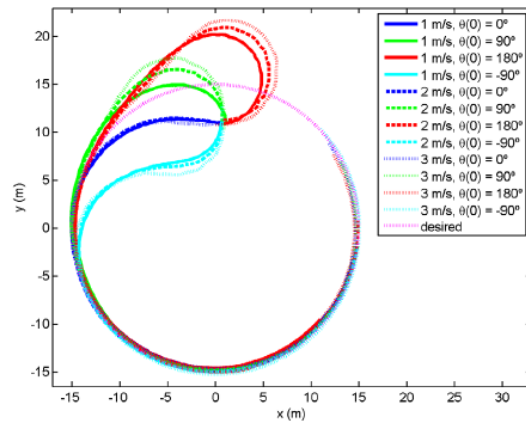
The difference between the experiments and simulations is mainly due to the delays in the guidance system. It is shown that in figure 10 that these delays become more significant at higher speeds.

The trajectories under the proposed controller following circular arcs with a radius of curvature of 15 m are shown in figure 12. The test results in figure 12a show the convergence to the desired trajectories. The RMS error after the tractor reached within $\pm 5\%$ of the initial distance offset, i.e., $\pm 0.25\text{ m}$, from the desired circle trajectory were 0.17 , 0.33 , and 0.40 m , respectively for 1 , 2 , and 3 m/s tractor speeds.

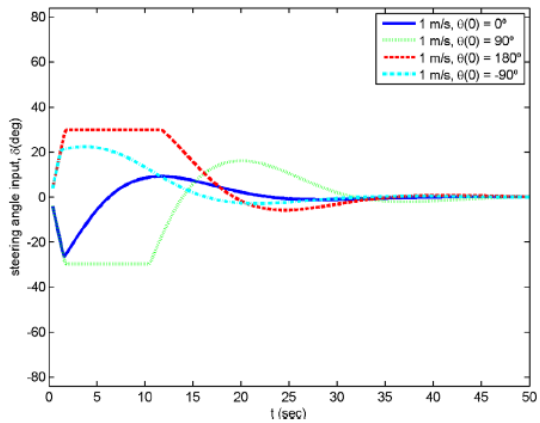
Since the steering angle is typically limited to about 30° by its mechanism, to cope with this limitation the computed control input δ was set to $\pm 30^\circ$ when it exceeded $\pm 30^\circ$. The mathematical proof of the global asymptotic stability with such an input constraint is not provided in this article. However, interestingly, we observed that the system still converges to the desired trajectory in our experiments as well as in the simulations.



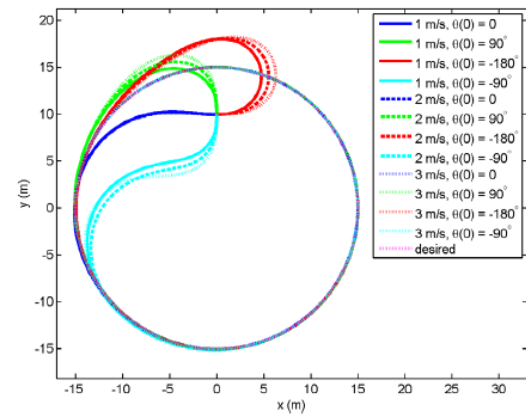
(a) Experimental results



(a) Experimental results



(b) Simulation results



(b) Simulation results

Figure 11. The computed steering angle input δ used during the experiments and simulation for the 1m/s trajectory in figure 10.

As it can be seen in figures 10 and 12, the trajectories of the tractor from the experiments show very similar qualitative behaviors to the simulation results. The trajectory differences depending on the tractor's speed are also well captured in the simulation results conducted with the constraints on the steering angle and its rate.

The improvement of the guidance accuracy could be made with the following suggestions: (i) the use of an inertial navigation system (INS) that provides relative positioning information to be fused with the GPS data, (ii) the use of a faster steering system that acts directly over the hydraulic system as opposed to typical steering systems which act mechanically over the steering wheel including the one used in this study, (iii) the use of a terrain compensator that eliminates the roll and pitch effects over the GPS antenna position, especially in non-flat terrains, and (iv) the use of multiple GPS receivers that allow more accurate calculation of orientation, roll and pitch data of the tractor.

Figure 12. Comparison between the actual and simulated trajectories of the tractor with four different starting orientations at 1, 2, and 3 m/s speeds in the circular trajectory, with a steering rate limit of $30^\circ/\text{s}$ and a steering angle limit of $\pm 30^\circ$.

CONCLUSION

In this article, two new control laws for agricultural tractor navigation control were developed; one for following straight lines and the other for circular arcs. Unlike other common controllers used for farming vehicles, the controllers proposed in this article have the following advantages: (i) global asymptotic stability is guaranteed via a mathematical proof and, (ii) it has no singularity. The performance of the controller was tested through simulations and experiments. From the experimental results along with the simulation, we can conclude that the proposed controllers which possess the two desirable properties mentioned above can be used for automatic guidance control of farming vehicles. Future work will include controller modifications by taking into account the following issues: (i) mathematical proof of convergence with the constraints on the steering

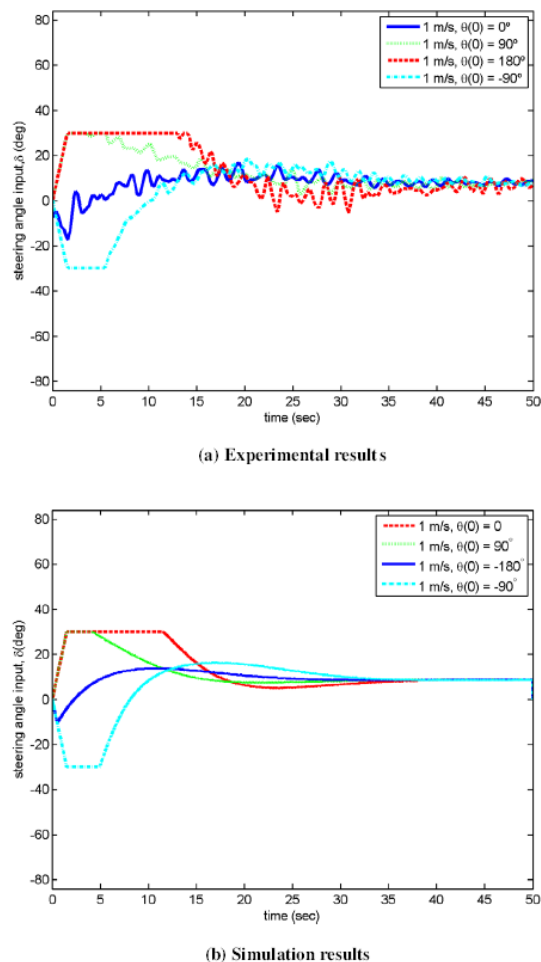


Figure 13. The computed steering angle input δ used during the experiments and simulation for the 1 m/s trajectory of figure 12.

angle and steering angle rate, (ii) use of full dynamic model, and (iii) robustness to wheel slip and parameter uncertainty.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by VA064A08 and VA034A10-2 grants from Junta de Castilla y León, Spain. This research was partly supported by WCU (World Class University) program through the Korea Science and Engineering Foundation funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. R32-2008-000-10022-0).

REFERENCES

Ashraf, M. A., J. Takeda, H. Osada, and S. Chiba. 2003. Generalised steering strategy for vehicle navigation on sloping ground. *Biosystems Eng.* 86(3): 267-273.

Auernhammer, H. 2001. Precision farming: The environmental challenge. *Computers and Electronics in Agric.* 30(1-3): 31-43.

BarShalom, Y., and T. E. Fortmann. 1987. *Tracking and Data Association*. San Diego, Calif.: Academic Press Prof, Inc.

Benson, E. R., J. F. Reid, and Q. Zhang. 2003. Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester. *Trans. ASAE* 46(4): 1255-1264.

Borgelt, S. C., S. C. Harrison, K. A. Sudduth, and S. J. Birrell. 1996. Evaluation of GPS for applications in precision agriculture. *Applied Eng. in Agric.* 12(6): 633-638.

Carrera-González, A., S. Alonso-García, and J. Gómez-Gil. 2010. Design, development and implementation of a steering controller box for an automatic agricultural tractor guidance system, using fuzzy logic. In *Tecnological Developments in Education and Automation*, 153-158. M. Iskander et al., eds. Netherlands: Springer.

Cho, S. I., and N. H. Ki. 1999. Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic. *Trans. ASAE* 42(4): 1137-1143.

Cho, S. I., and J. H. Lee. 2000. Autonomous Speed sprayer using Differential Global Positioning System, Genetic Algorithm and Fuzzy Control. *J. Agric. Eng. Res.* 76(2): 111-119.

García-Perez, L., M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, and D. Guinea. 2008. An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle. *Computers and Electronics in Agric.* 60(1): 39-48.

Gerrish, J. B., B. W. Fehr, G. R. Van Ee, and D. P. Welch. 1997. Self-steering tractor guided by computer-vision. *Applied Eng. in Agric.* 13(5): 559-563.

Kalman, R. E. 1960. A new approach to linear filtering and predictions problems. *J. Basic Eng.* 82(1): 35-45.

Karkee, M., and B. L. Steward. 2010. Study of the open and closed loop characteristics of a tractor and a single axle towed implements systems. *J. Terramechanics* 47(6): 379-393.

Keicher, R., and H. Seufert. 2000. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agric.* 25(12): 169-194.

Kise, M., Q. Zhang, and F. Rovira Más. 2005. A Stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosystems Eng.* 90(4): 357-367.

Ku, C. H., and W. H. Tsai. 1999. Smooth vision-based autonomous land vehicle navigation in indoor environments by person following using sequential pattern recognition. *J. Robotic Systems* 16(5): 249-262.

Lechner, W., and S. Baumann. 2000. Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agric.* 25(1-2): 67-85.

Feng, L., and Y. He. 2005. Study on dynamic model of tractor system for automated navigation applications. *J. Zhejiang Univ. Sci.* 6A(4): 270-275.

Nagasaka, Y., N. Umeda, Y. Kanetai, K. Taniwaki, and Y. Sasaki. 2004. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Computers and Electronics in Agric.* 43(3): 223-234.

Noguchi, N., K. Ishii, and H. Terao. 1997. Development of an agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensors. *J. Agric. Eng. Res.* 67(1): 1-15.

O'Connor, M., G. Elkaim, T. Bell, and B. Parkinson. 1996. Automatic steering of a farm vehicle using GPS. In *Proc. 3rd Intl. Conf. Precision Agriculture*. Minneapolis, Minn.

Pilarski, T., M. Happold, H. Pangels, M. Ollis, K. Fitzpatrick, and A. Stentz. 2002. The demeter system for automated harvesting. *Autonomous Robots* 13(1): 9-20.

Reid, J. F., Q. Zhang, N. Noguchi, and M. Dickson. 2000. Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agric.* 25(1-2): 155-167.

Stoll, A., and H. D. Kutzbach. 2000. Guidance of a Forage Harvester with GPS. *Precision Agric.* 2(3): 281-291.

Slaughter, D. C., D. K. Giles, and D. Downey. 2008. Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and Electronics in Agric.* 6(1): 63-78.

- Subramanian, V., T. F. Burks, and A. A. Arroyo. 2006. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *Computers and Electronics in Agric.* 53(2): 130-143.
- Thuilot, B., C. Cariou, P. Martinet, and M. Berduca. 2002. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS. *Autonomous Robots* 13(1): 53-71.
- Wilson, J. N. 2000. Guidance of agricultural vehicles: A historical perspective. *Computers and Electronics in Agric.* 25(1-2): 3-9.
- Wit, J., C. D. Crane III, and D. Armstrong. 2004. Autonomous ground vehicle path tracking. *J. Robotic Systems* 21(8): 439-449.
- Zhang, Q., J. F. Reid, and N. Noguchi. 1999. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors. In *Proc. of the Intl. Conf. on Field and Service Robotics*. Pittsburg, Pa. UILU-ENG-99-7013.
- Zhang, N., M. Wang, and N. Wang. 2002. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agric.* 36(2-3): 113-132.

3. Artículo 3 del compendio

3.1. Datos del artículo

Los datos del artículos son los siguientes:

- **Título** A Simple Method to Improve Autonomous GPS Positioning for Tractors
- **Autores:** Jaime Gómez Gil ; Sergio. Alonso García; Francisco Javier Gómez Gil. Tim Stombaugh.
- **Revista de publicación:** Sensors

3.2. Artículo

El artículo completo se muestra en las siguientes páginas.

Article

A Simple Method to Improve Autonomous GPS Positioning for Tractors

Jaime Gomez-Gil ^{1,*}, Sergio Alonso-Garcia ¹, Francisco Javier Gómez-Gil ² and Tim Stombaugh ³

¹ Department of Signal Theory, Communications and Telematics Engineering, University of Valladolid, 47011 Valladolid, Spain; E-Mail: salonsog@ribera.tel.uva.es

² Department of Electromechanical Engineering, University of Burgos, 09006 Burgos, Spain; E-Mail: fjggil@ubu.es

³ Biosystems and Agricultural Engineering Department, University of Kentucky, Lexington, KY 40546, USA; E-Mail: tstomb@bae.uky.edu

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: jgomez@tel.uva.es; Tel.: +34-617507469; Fax: +34-983423267.

Received: 14 April 2011; in revised form: 9 May 2011 / Accepted: 20 May 2011 /

Published: 26 May 2011

Abstract: Error is always present in the GPS guidance of a tractor along a desired trajectory. One way to reduce GPS guidance error is by improving the tractor positioning. The most commonly used ways to do this are either by employing more precise GPS receivers and differential corrections or by employing GPS together with some other local positioning systems such as electronic compasses or Inertial Navigation Systems (INS). However, both are complex and expensive solutions. In contrast, this article presents a simple and low cost method to improve tractor positioning when only a GPS receiver is used as the positioning sensor. The method is based on placing the GPS receiver ahead of the tractor, and on applying kinematic laws of tractor movement, or a geometric approximation, to obtain the midpoint position and orientation of the tractor rear axle more precisely. This precision improvement is produced by the fusion of the GPS data with tractor kinematic control laws. Our results reveal that the proposed method effectively reduces the guidance GPS error along a straight trajectory.

Keywords: agricultural vehicles; control; Global Positioning System (GPS); guidance

1. Introduction

Agricultural vehicle guidance has undergone impressive advances in recent years [1-6]. Autonomous guidance is mainly based on two techniques: positioning and control. Tractor positioning may be done globally and/or locally. Laser triangulation and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are global positioning systems used in tractor guidance. Machine vision, accelerometers, gyros, Inertial Navigation Systems (INS), electronic compasses, radars and other devices are all used as local positioning systems [1-4]. Tractor guidance can be achieved using either a local or global positioning system, or even by using several positioning systems simultaneously. Several positioning systems involve multiple sensors which in turn require sensor fusion techniques to combine the information they provide. The Kalman filter [7] is usually employed in this task. There are multiple examples of agricultural autonomous guidance in the scientific literature that only apply either Global Positioning System (GPS) positioning [8-12], machine vision positioning [13-16] or examples that use multiple positioning sensors [17-20].

Control laws for autonomous tractor guidance can be developed by modeling the tractor with a simple kinematic model [8,11,21]. Very accurate or high-speed guidance requires that certain effects such as inertia, sliding and springing be taken into account in the tractor model. Dynamic tractor models may be employed [22-24] for that purpose. Fuzzy logic [9,14] and neural network [17,25] controllers have also been used for autonomous tractor guidance.

One way to improve tractor GPS guidance performance is to employ a more precise tractor positioning system, which can be obtained by means of: (i) a better receiver, (ii) more effective differential GPS corrections or (iii) the fusion of GPS with other local positioning systems such as electronic compasses or Inertial Navigation Systems (INS). These solutions generally result in a more expensive system. This article presents, in contrast, a simple and low-cost method to improve GPS tractor positioning using only a GPS receiver as the positioning sensor. The method is based on placing the GPS receiver in a forward position where changes of the tractor's orientation influence the GPS trajectory more, to obtain a more precise tractor positioning taking into account the data received from the GPS receiver and the tractor kinematic laws. Although researchers such as Stombaugh *et al.* [21] stated that the placement of a GPS receiver influences guidance performance, to the best of our knowledge there are no papers in the agricultural scientific literature that have explored this method.

2. Materials and Methods

2.1. Kinematic Model

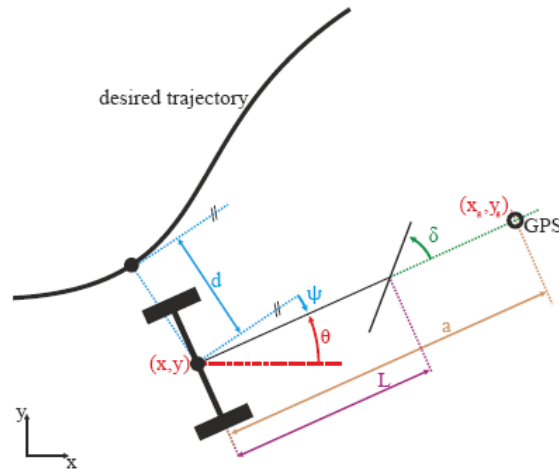
A tractor has front-wheel steering and the rear wheels are forward-driven without being steered. The inputs to this system are therefore the driving speed, u , and the front wheel steering angle, δ . The tractor behavior can be described with a vector in the space state q , defined by the expression:

$$q = [x, y, \theta, \delta]^T \quad (1)$$

where x , y represent the position in Cartesian coordinates of the midpoint of the rear wheel axle, O , θ is the orientation of the vehicle with respect to the X -axis and δ is the steering angle of the front wheels

with respect to the forward direction of the vehicle. L is the length from O to the center of the front axle. Figure 1 shows a schematic of the system and the variables description.

Figure 1. Tractor schematic and variables description.



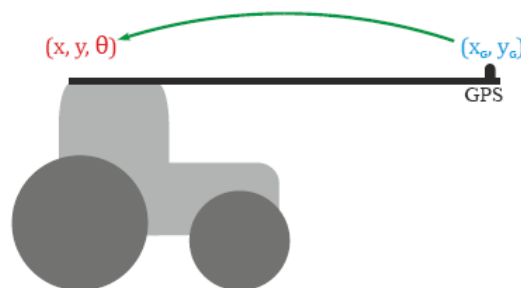
Assuming no-slip conditions on the wheels, the kinematic model of the vehicle is given by:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \theta \\ \dot{y} &= u \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{u}{L} \tan \delta \end{aligned} \quad (2)$$

2.2. Position and Orientation Computation of the Rear Axle Midpoint from GPS Positions: Method 1

The position of the rear axle midpoint and the orientation of the tractor have to be known so that guidance control may be performed more easily. In this article, this information is obtained from the positions supplied by the GPS receiver, which is placed in a forward position (Figure 2).

Figure 2. The position and orientation at the midpoint of the rear axle (x, y, θ) have to be computed from positions received from the GPS placed in a forward position (x_g, y_g) .



The tractor position (x, y, θ) at the midpoint rear wheel axle can be obtained from the positions obtained from the GPS receiver (x_g, y_g) , either with the kinematic tractor model or from geometric relations.

The geometric relationship between (x, y, θ) and (x_g, y_g) is:

$$\begin{aligned} x_g &= x + a \cos \theta \\ y_g &= y + a \sin \theta \end{aligned} \tag{3}$$

where a is the distance between the GPS receiver position and the rear axle midpoint of the tractor.

Differentiation with respect to time in Equation (3) and then by applying Equation (2):

$$\dot{x}_g = \dot{x} - a \dot{\theta} \sin \theta = u \cos \theta - a \dot{\theta} \sin \theta \tag{4}$$

$$\dot{y}_g = \dot{y} + a \dot{\theta} \cos \theta = u \sin \theta + a \dot{\theta} \cos \theta \tag{5}$$

From Equations (4) and (5):

$$(4)^2 + (5)^2 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 &= (u \cos \theta - a \dot{\theta} \sin \theta)^2 + (u \sin \theta + a \dot{\theta} \cos \theta)^2 \\ &= u^2 \cos^2 \theta + a^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta - 2 u a \dot{\theta} \cos \theta \sin \theta \\ &\quad + u^2 \sin^2 \theta + a^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + 2 u a \dot{\theta} \cos \theta \sin \theta = u^2 + a^2 \dot{\theta}^2 \end{aligned} \tag{6}$$

and then, from Equation (6):

$$\dot{\theta} = \pm \frac{1}{a} \sqrt{\dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 - u^2} \tag{7}$$

Then, the position and orientation of the tractor can be obtained in a recursive way using the position obtained from the GPS in a forward position and the previous tractor state, as follows:

$$\theta[n] = \theta[n-1] \pm \frac{\Delta T}{a} \sqrt{\left(\frac{x_g[n] - x_g[n-1]}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{y_g[n] - y_g[n-1]}{\Delta T}\right)^2 - u^2} \tag{8}$$

$$x[n] = x[n-1] + u \Delta T \cos(\theta[n]) \tag{9}$$

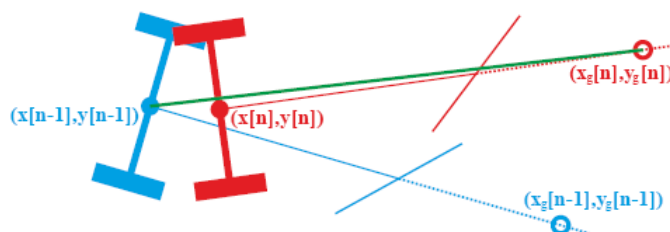
$$y[n] = y[n-1] + u \Delta T \sin(\theta[n]) \tag{10}$$

Equations (8–10) must be sequentially computed at each new GPS position, where ΔT is the time between the reception of two GPS positions. Equation (8) offers two possibilities for $\theta[n]$, and thus two sets of $(x[n], y[n], \theta[n])$ are obtained. With each one, $(x_g[n], y_p[n])$ can be geometrically computed, and any set that does not match the real position received by the GPS may be discarded.

2.3. Position and Orientation Computation of the Rear Axle Midpoint from GPS Positions: Method 2

The computational cost of the previous section can be reduced by an approximation, taking into account Figure 3.

Figure 3. Two near positions of the tractor when following a curved trajectory.



Equation (11) is obtained if it is assumed that $(x[n], y[n])$ lies along the straight green line that joins $(x[n - 1], y[n - 1])$ with $(x_g[n], y_g[n])$ in Figure 3. Once θ is approximately calculated, $x[n]$ and $y[n]$ may be obtained with Equations (12) and (13):

$$\theta[n] = \text{atan} \left(\frac{y_g[n] - y[n - 1]}{x_g[n] - x[n - 1]} \right) \quad (11)$$

$$x[n] = x_g[n] - a \cos(\theta[n]) \quad (12)$$

$$y[n] = y_g[n] - a \sin(\theta[n]) \quad (13)$$

Our experimental tests revealed that when $(x[n], y[n])$ is near to $(x[n - 1], y[n - 1])$ this approximation is accurate. This happens when the speed of the tractor is low and the GPS provides positions at 1 Hz, or when the GPS position rate is higher than 5 Hz at any usual tractor speed.

2.4. Control Law

The control law employed by Noguchi *et al.* [17], Stoll *et al.* [10] and Nagasaka *et al.* [20] among others, which is given by Equation (14), was chosen to test the system. It is one of simplest used in agricultural GPS guidance vehicles. The steering angle is proportional to the error in distance d , and the error in orientation Ψ :

$$\delta = k_1 d + k_2 \psi \quad (14)$$

The following steps were taken to choose the control gains k_1 and k_2 for the experiments: (i) initially, $k_1 = 0$ was fixed and a search was made for the maximum value of k_2 that did not cause oscillations in the motion of the system. (ii) Subsequently, k_2 was fixed as 70% of this maximum value. (iii) The selected value for k_2 was used to find the maximum value of k_1 before oscillation occurred in the motion of the tractor. Then, k_1 was fixed as 80% of this maximum value. This tuning was done at a speed of 1 m/s. This experimental procedure is similar to the second Ziegler-Nichols experimental method for tuning PID controllers [26], because tractor orientation error ψ acts in a similar way to speed at which the distance to the trajectory increases or decreases, which is similar to the differential part of a PID control.

2.5. GPS Errors

GPS receivers produce errors. **Absolute errors** are the distance between real positions and positions obtained by the GPS. Tractors usually make passes along fields with a constant separation. The first

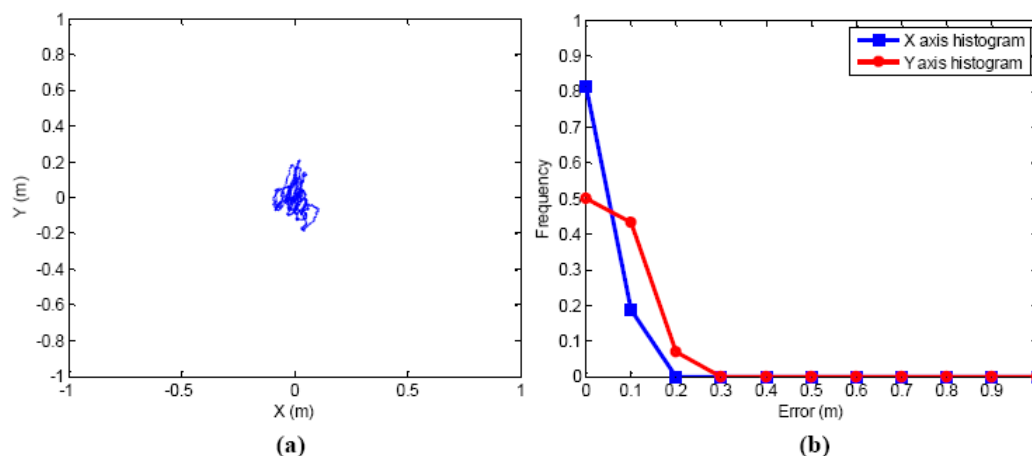
pass is typically done manually by the tractor driver. With autonomous guidance systems, the next passes are done automatically by the guidance system with the desired separation between passes. With assisted guidance systems, the next passes are done manually but in an assisted way by means of the guidance system, at the desired separation between passes. In both situations, **relative errors** occur, which are the distance differences between the desired separations between passes and the real separations between passes.

Relative errors are smaller than absolute errors. In agricultural tasks, farmers notice relative error, which has led companies such as John Deere or Trimble to provide information on relative errors in their GPS-guidance-systems specifications that they refer to as “pass-to-pass accuracy”. Relative errors in tractor GPS guidance systems are usually subject to some conditions, such as Dilution of Precision (DOP) and time between passes. The common time between passes in data sheet specifications is 15 minutes, because this is the habitual time between tractor passes in medium-sized plots.

Figure 4(a) shows 900 Universal Transverse Mercator (UTM) positions offered by a stationary Haicom HI-204III over a 15-minute time frame. These 900 UTM positions are centered over their UTM mean. The GPS used to take these positions had the static navigation disabled and provided one position per second, and in this way, 900 points were obtained in 15 minutes. Figure 4(b) shows the histograms of relative errors along the X and Y axes when the real value is considered as the mean of all positions. It can be observed that the relative error of this low cost GPS stays below 40 cm on measures over 15 minutes. The standard deviation was 10.7 cm in X axis, and 11.9 cm in Y axis.

The relative errors in these 900 points are used in the section Simulation Results with Experimental GPS Errors.

Figure 4. (a) 900 UTM positions obtained by a static Haicom HI-204III. (b) Histogram of these errors.



Taking the previous data into account, a low cost Haicom HI-204III GPS receiver can technically be used to guide a tractor when the time between passes is short and precision is not required. The distance between passes could differ by large amounts from the desired when a long time between passes occurs.

2.6. Experimental System

A 6400 John Deere tractor was equipped with devices to perform autonomous tractor guidance (Figure 5). A DC RE-30 Maxon motor was used to move the steering wheel and a reducer gear was employed to adapt motor speed to steering wheel speed. A striated pulley connected the reducer gear to the steering wheel. The reduction rate was 14:1 for the reducer gear and 6:1 for the pulley. A magnetic encoder was used to measure steering position and a microcontroller was used to control the steering system. A low cost Haicom HI 204III GPS receiver configured to process the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) corrections was used as the navigation GPS. This is a C/A code GPS receiver that provides a 1 Hz position rate, integrates a Sirf Start III chipset and offers an estimated accuracy of 5 m (2D RMS) with EGNOS augmentation. An R4 Trimble receiver was used to measure with precision the trajectories followed by the tractor. This is a high end dual frequency receiver, which when working with carrier-phase measurements in Real Time Kinematic (RTK) mode, offers up to 1 cm accuracy. RTK corrections were provided through a General Packet Radio Service (GPRS) cellular communication from a Virtual Reference Station (VRS) managed by ITACyL, a Spanish regional agrarian institute. The VRS augmentation technology usually allows centimeter-level accuracy to dual frequency receivers when working in RTK mode [27].

Figure 6 shows three placements of the navigation GPS in the field tests at 0, 3 and 5 meters ahead of the tractor rear axle. A low height placement of the navigation GPS would be possible in forward positions, and this would reduce the errors due to rough test surface. But, in order to compare only the distance from the rear axle, the placement height was always the same.

Figure 5. (a) 6400 John Deere tractor used in the tests. The red circle indicates the position of the Haicom HI-204III navigation GPS, the blue circle the position of the Trimble R4 reference GPS, the orange circle the position of the magnetic encoder, and the yellow circle the position of the DC motor and pulley. (b) Magnetic encoder used for measuring the steering angle. (c) DC motor and pulley used for moving the steering system.

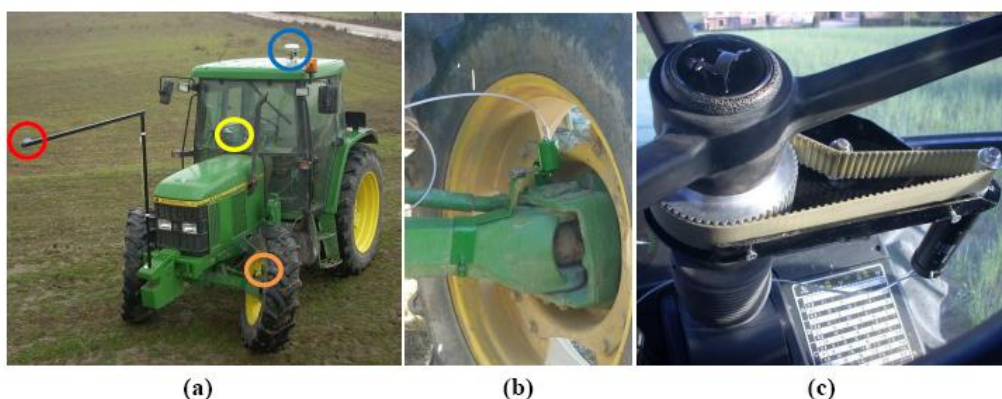
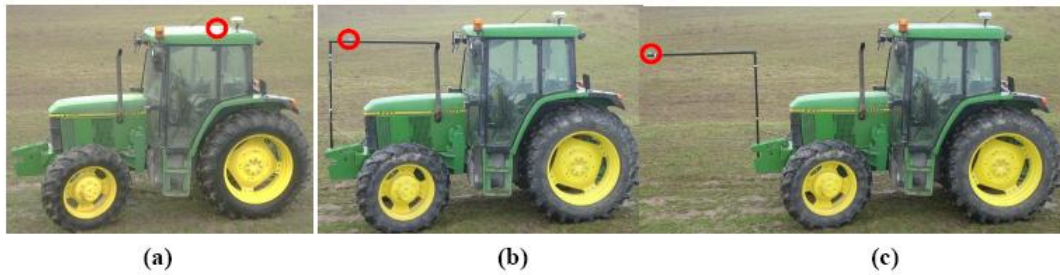


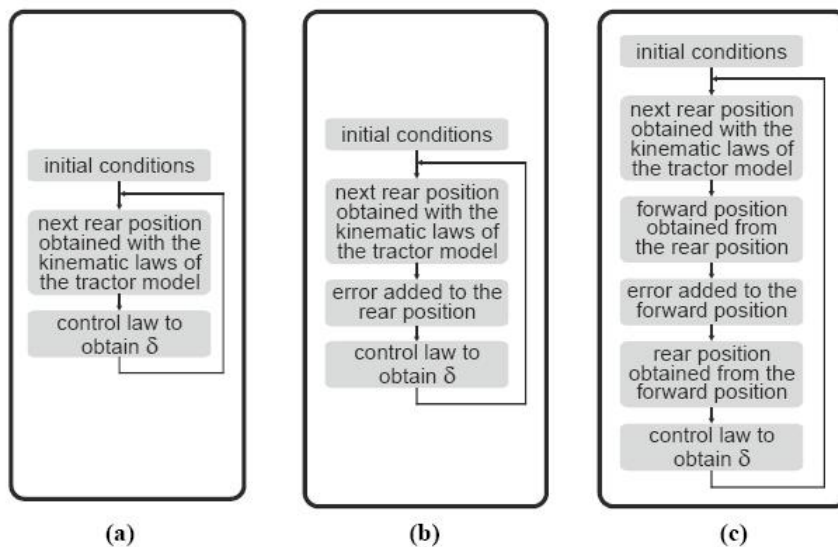
Figure 6. Different positions of the Haicom HI-204III navigation GPS in the field tests. The navigation sensor position is highlighted with a red circle. (a) The guidance GPS placed in the back part of the cabin over the rear axle. (b) The guidance GPS placed 3 m ahead of the rear axle of the tractor. (c) The guidance GPS placed 5 m ahead of the rear axle of the tractor.



2.7. Methods

The methodology of this article comprises certain simulations and field tests to prove the performance of the proposed system. Some simulations of autonomous tractor guidance along a straight line and a step response, according to Figure 7, were computed without errors [Figure 7(a)], adding errors at the rear axle position [Figure 7(b)] and adding errors at forward positions [Figure 7(c)].

Figure 7. Flow charts of the procedures to simulate (a) without errors, (b) with errors added in rear position and (c) with errors added in a forward position.



In these simulations, the kinematic model of the tractor presented in Equation (2) and the control law of Equation (14) were employed. The simulation rate was 1 Hz. Constants $L = 2.3$ m, $u = 1$ m/s, and the control gains obtained experimentally in the field test ($k_1 = 0.08$, $k_2 = 0.5$) were fixed. Experimental errors of Figure 4 were added to each analytically calculated position of the tractor,

according to the flow chart in Figure 7. These added errors were experimentally obtained with the same Haicom HI 204III GPS receiver used as the guidance GPS in the field tests. These errors were graphically shown in Figure 4(a). For each simulation, the difference between two consecutive data positions obtained from the receiver fixed at a static point, was added as the relative error.

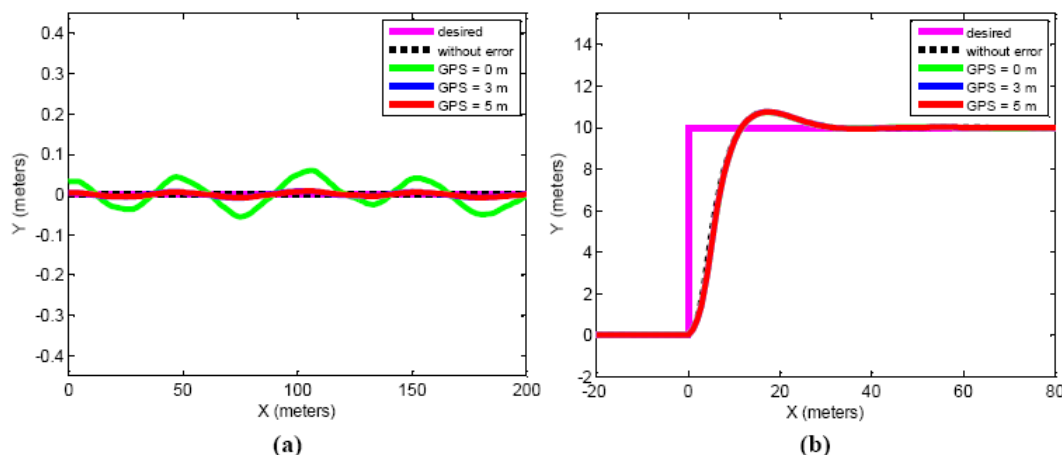
Additionally, field tests were performed with the system described in the experimental system section. The guidance along a straight path, the step response impulse and the maximum stable speed were tested.

3. Results and Discussion

3.1. Simulation Results with Experimental GPS Errors

Simulations of autonomous tractor guidance along a straight line and a step response were performed on a rough plot. The initial conditions for the tractor were $(x, y, \psi, \delta) = (0, 0, 0, 0)$, and the desired trajectory in the step response was $y = 2$ m. Figure 8(a,b) were obtained from the straight line and step response tracking.

Figure 8. (a) Simulation results obtained when the tractor follows a straight line and experimental errors are added. (b) Simulation results obtained in a step response trajectory when experimental errors are added.



Simulations with different forward GPS guidance positions were performed in order to compute the mean and Root Mean Square (RMS) values of the error. Simulation time was 14 minutes ($14 \times 60 = 840$ points) and the reference trajectory was a straight line. Table 1 shows the obtained results.

Table 1. Mean and RMS errors obtained in the simulations with different forward GPS guidance positions.

	Without added error	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	10 m
Mean error (cm)	0	2.6	0.46	0.45	0.43	0.41	0.39	0.29
RMS error (cm)	0	3.0	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.34

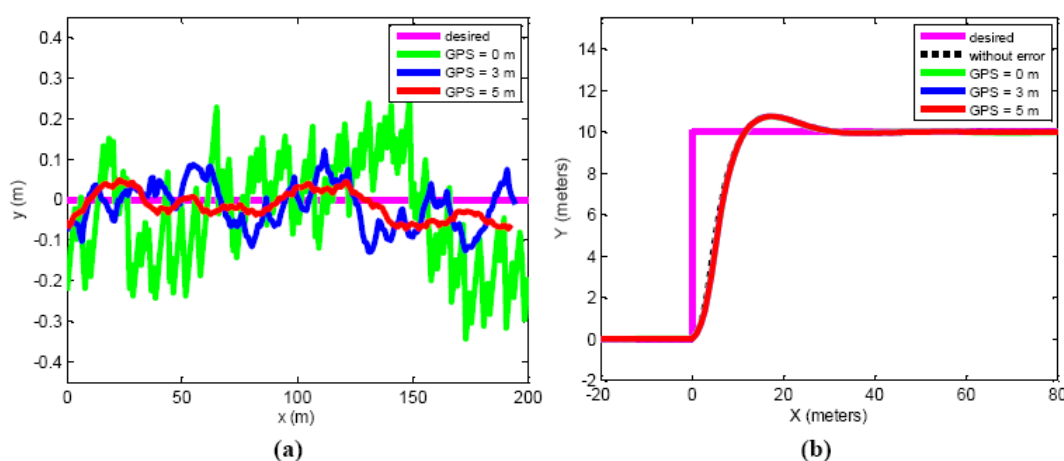
3.2. Experimental Results

Three kinds of tests were performed with the GPS placed ahead of the rear axle at three different distances: the first found the error in the continuous tracking of a straight trajectory; the second tested the step response behavior; the third measured the maximum speed that keeps the guidance control. The control law used for the tests is given by Equation (14). The control law parameters were fixed at $k_1=0.08$ and $k_2=0.5$, values experimentally obtained at 1 m/s speed, following the tuning procedure described in the methods section.

Figure 9(a) shows the trajectory distance error of the straight trajectory. In this figure, it is possible to observe that the error is reduced when the GPS receiver is placed ahead of the tractor. Figure 9(b) shows the trajectories in the tracking of a step response with the GPS placed at 0, 3 and 5 m from the rear axle of the tractor. No major differences were observed regarding the GPS receiver position in the step response.

It is worth mentioning that it was necessary to shift some of the trajectories on the X and Y axes in Figure 9(a,b), due to the behavior of the low-cost Haicom HI-204III guidance GPS receiver that was employed. It offers good precision or relative accuracy in the short periods of time necessary to perform a specific trajectory test, but poor absolute accuracy between the longer periods of time that two specific trajectory tests entail. Buick [28] provides more detailed information on the meaning of the terms relative accuracy or precision and absolute accuracy or accuracy.

Figure 9. (a) Distance error from a desired straight trajectory at 1 m/s with the GPS placed at 0, 3 and 5 meters from the rear axle of the tractor. **(b)** Step response tracking at 1 m/s with the GPS receiver placed at 0, 3 and 5 meters from the rear axle of the tractor.



The standard deviation of the field test was also computed when the tractor followed the straight line trajectory and the results are shown in Table 2.

Table 2. Standard deviation errors obtained in the field tests with different forward GPS guidance positions.

	0 m	3 m	5 m
Standard deviation (cm)	16	4.7	3.7
RMS error (cm)	32	5.7	4.8

The Haicom HI-204III guidance GPS receiver offers a rate of position data of 1 Hz. With this low rate, only low speed autonomous guidance is possible. In the third field test, the desired trajectory was a straight line. From an initial value of 1 m/s, the tractor speed was gradually increased. It was observed that the guidance error was increasing as the speeds increased. Moreover, the maximum speed at which the system remained stable was measured for each GPS position. These values are shown in Table 3.

Table 3. For each advance from the rear axle, this table presents the maximum speed of the tractor that kept the system stable.

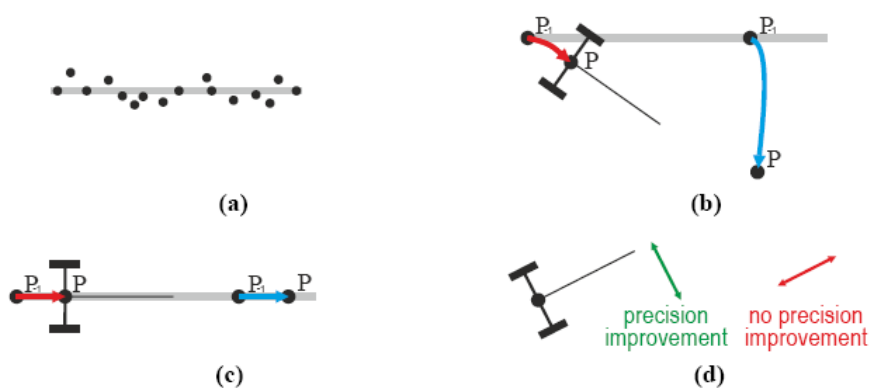
GPS ahead of the rear axle	0 m	3 m	5 m
Speed that leads to guidance instability	1.5 m/s	2.4 m/s	2.6 m/s

3.3. Discussion

Results show that the proposed method improves the guidance performance. This improvement can be intuitively understood. Figure 10(a) sketches the positions that a GPS receiver provides when a tractor goes along a straight line. These positions are not on the straight line due mainly to: (i) the error of the GPS receiver and to (ii) the oscillations that the tractor suffers when it goes along the common rough farm terrain. Figure 10(b) sketches the trajectories of the rear axle and of a GPS receiver placed on a tractor that turns. The red line represents the trajectory of the rear axle of this tractor. The blue represents the trajectory acquired by the GPS placed ahead of the tractor. It can be clearly observed in this figure that the blue trajectory is longer than the red. Our proposed method computes the red trajectory of the tractor rear axle with the blue trajectory acquired by the GPS receiver placed ahead of the tractor. In this process, the rear axle positioning error decreases at a ratio similar to the length of the blue trajectory divided by the length of the red trajectory. It is interesting to realize that lengths of the blue and red trajectories are the same when the tractor goes straight [Figure 10(c)]. Figure 10(b,c) suggest that: (i) the proposed method improves the tractor orientation positioning information and that (ii) the proposed method improves the positioning precision in the transverse axis of the tractor direction, but does not improve the positioning precision over the tractor direction, as Figure 10(d) illustrates.

A more formal explanation of this precision improvement is that more information for the positioning is used in the proposed system; therefore, the tractor positioning is more precise. The data GPS receiver is only used to identify the position of the tractor when the GPS receiver is placed on the tractor rear axle. But with the GPS in a forward position, the rear position of the tractor is computed with the positions of the GPS receiver together with the kinematic model of the tractor laws. GPS data and kinematic model tractor laws are fused in the proposed method to position the tractor.

Figure 10. (a) The straight line represents a trajectory followed by a tractor and the dots represent the positions provided by a GPS receiver placed on the tractor. (b) Trajectory of the rear axle of a tractor that turns (red) and trajectory of a GPS placed ahead of the same tractor (blue). (c) Trajectory of the rear axle of a tractor that goes straight (red) and trajectory of a GPS placed ahead of the same tractor (blue). (d) Directions with respect to the tractor orientation where the proposed method improves the positioning (green) or does not improve the positioning (red).



The proposed method employs only the GPS receiver to provide tractor positioning data. There was a steering angle encoder on the tractor. However, data from this sensor was only used by the steering system controller to help it achieve the desired steering angle.

The initial orientation of the tractor was provided to the system in our simulations and field tests, but an arbitrary value can be employed in the proposed method when the initial orientation of the tractor is not known. In this case, the proposed method would work poorly at the beginning of the trajectory, but after approximately one hundred iterations, it would work fine.

The Kalman filter can be used in GPS tractor guidance. This filter can be used to process (i) only the GPS receiver data or (ii) multiple sensors' data. When it is used to process only the GPS receiver data, this filter produces an effect of smoothing [29]. When it processes the GPS data together with additional sensors' data, this filter improves the tractor GPS positioning precision [20]. Then, Kalman filters can improve the tractor positioning in the same way as our proposed system. But Kalman filters require additional sensors and the system hardware would be further complicated.

Simulations and field test results of this article concur with the previous intuitive discussion. Concretely:

- The guidance errors in both Figure 8(a) and Figure 9(a) are reduced when the GPS is placed in a forward position. In our field tests, these errors are greater than in the simulations. This is because some error components are not modeled in simulations, for example, the positioning error introduced by the GPS receiver due to the tractor cab oscillations produced by the rough land used for the tests, typical of agricultural terrain.
- Differences were neither observed in the step response trajectories, nor in the simulations, nor in the field tests. This makes good sense, because when the tractor reaches the step, the distance to the desired trajectory is a large value of around 10 meters. The control law will

give the maximum value in the δ angle with values close to 10 meters. A more precise positioning will not therefore produce a different response when the step happens.

- A cause that usually makes a real control system unstable is its noise level. From the data in Table 3, it may be deduced that the level of noise with the proposed system decreases.

This article, then, proves that by placing the GPS ahead of the tractor, it is possible to obtain more precise tractor positioning, and subsequently improve the autonomous GPS guidance performance of a guidance system that uses only a GPS receiver as the positioning sensor. This more precise tractor positioning is achieved because the proposed method uses the received GPS data and the kinematic model of the tractor together for tractor positioning, whereas positioning is only obtained with the received GPS data when the receiver is placed on the rear axle. Our results are in agreement with Stombaugh *et al.* [21], who stated that the placement of a GPS receiver influences guidance performance.

Some limitations should be considered. The proposed method has been tested in a guidance system that uses only a GPS receiver as the positioning sensor. Tractor guidance systems sometimes employ more positioning sensors, such as: (i) tilt and (ii) orientation sensors. When a tilt sensor is employed together with the GPS receiver, it is expected that the proposed method will also improve the positioning, but with a lower ratio. This is because in this situation the proposed method reduces only the GPS positioning error. It does not influence the positioning error caused by the oscillations that the tractor suffers when it goes through common rough farm terrain, because this error is eliminated by the tilt sensor. When a digital compass, a gyroscope, an INS or whatever other orientation sensor is employed together with the GPS receiver, it is expected that the proposed system will not improve the tractor GPS positioning. This is because the proposed system improves the precision of the orientation data obtained by the GPS positioning, but it is expected that these data were much more precisely provided by the orientation sensor.

5. Conclusions

By placing the GPS ahead of the tractor, as proposed in this article, it is possible to devise a simple and low cost method a more precise tractor positioning, and thus improve the autonomous GPS guidance performance. This more precise tractor positioning is achieved because the proposed method uses the received GPS data and the kinematic model of the tractor together for tractor positioning, whereas positioning is only obtained with the received GPS data when the receiver is placed on the rear axle. The proposed method improves tractor positioning when only a GPS receiver is used as the positioning sensor. The improvement in the positioning occurs in the tractor orientation and in the positioning with respect to the transverse axis of the tractor's orientation. It is expected that the improvement ratio will decrease when a tilt sensor is employed and that no improvement will be achieved when the tractor positioning system includes an orientation sensor.

Acknowledgements

This work was partially supported by the regional 2010 Research Project Plan of the Junta de Castilla y León, (Spain), under project VA034A10-2. It was also partially supported by the 2009

ITACyL project entitled “Realidad aumentada, Bci y correcciones RTK en red para el guiado GPS de tractores (ReAuBiGPS)”.

References

1. Keicher, R.; Seufert, H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Comput. Electron. Agric.* **2000**, *25*, 169-194.
2. Reid, J.F.; Zhang, Q.; Noguchi, N.; Dickson, M. Agricultural automatic guidance research in North America. *Comput. Electron. Agric.* **2000**, *25*, 155-167.
3. Slaughter, D.C.; Giles, D.K.; Downey, D. Autonomous robotic weed control systems: A review. *Comput. Electron. Agric.* **2008**, *61*, 63-78.
4. Tillett, N.D. Automatic guidance sensors for agricultural field machines: A review. *J. Agr. Eng. Res.* **1991**, *50*, 167-187.
5. Auernhammer, H. Precision farming—the environmental challenge. *Comput. Electron. Agric.* **2001**, *30*, 31-43.
6. Zhang, N.; Wang, M.; Wang, N. Precision agriculture—a worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* **2002**, *36*, 113-132.
7. Kalman, R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASME* **1960**, *82*, 35-45.
8. O'Connor, M.; Bell, T.; Elkaim, G.; Parkinson, B. Automatic steering of farm vehicles using GPS. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, MN, USA, June 1996.
9. Cho, S.I.; Lee, J.H. Autonomous speedsprayer using differential global positioning system, genetic algorithm and fuzzy control. *J. Agric. Eng. Res.* **2000**, *76*, 111-119.
10. Stoll, A.; Dieter Kutzbach, H. Guidance of a forage harvester with GPS. *Precis. Agric.* **2000**, *2*, 281-291.
11. Thuilot, B.; Cariou, C.; Martinet, P.; Berducot, M. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS. *Auton. Robot.* **2002**, *13*, 53-71.
12. Gan-Mor, S.; Clark, R.L.; Upchurch, B.L. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Comput. Electron. Agric.* **2007**, *59*, 31-38.
13. Gerrish, J.B.; Fehr, B.W.; Ee, G.R.V.; Welch, D.P. Self-steering tractor guided by computer-vision. *Appl. Eng. Agric.* **1997**, *13*, 559-563.
14. Cho, S.I.; Ki, N.H. Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic. *Trans. ASABE* **1999**, *42*, 1137-1143.
15. Benson, E.R.; Reid, J.F.; Zhang, Q. Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester. *Trans. ASABE* **2003**, *46*, 1255-1264.
16. Kise, M.; Zhang, Q.; Rovira Más, F. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosyst. Eng.* **2005**, *90*, 357-367.
17. Noguchi, N.; Ishii, K.; Terao, H. Development of an Agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensors. *J. Agr. Eng. Res.* **1997**, *67*, 1-15.

18. Zhang, Q.; Reid, J.F.; Noguchi, N. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors. In *Proceedings of the International Conference of Field and Service Robotics*, Pittsburgh, PA, USA, 1999; pp. 293-298.
19. Pilarski, T.; Happold, M.; Pangels, H.; Ollis, M.; Fitzpatrick, K.; Stentz, A. The demeter system for automated harvesting. *Auton. Robot.* **2002**, *13*, 9-20.
20. Nagasaka, Y.; Umeda, N.; Kanetai, Y.; Taniwaki, K.; Sasaki, Y. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Comput. Electron. Agric.* **2004**, *43*, 223-234.
21. Stombaugh, T.S.; Benson, E.R.; Hummel, J.W. Guidance control of agricultural vehicles at high field speeds. *Trans. ASAE* **1999**, *42*, 537-544.
22. Bevly, D.M.; Gerdes, J.C.; Parkinson, B.W. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor. *J. Dyn. Syst. Meas. Control Trans. ASME* **2002**, *124*, 659-667.
23. Karkee, M.; Steward, B.L. Study of the open and closed loop characteristics of a tractor and a single axle towed implement system. *J. Terramech.* **2010**, *47*, 379-393.
24. Zhang, Q.; Qiu, H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation. *Trans. ASAE* **2004**, *47*, 639-646.
25. Ashraf, M.A.; Takeda, J.; Osada, H.; Chiba, S. Generalised steering strategy for vehicle navigation on sloping ground. *Biosyst. Eng.* **2003**, *86*, 267-273.
26. Ogata, K. *Modern Control Engineering*, 4th ed.; Prentice Hall: Bergen County, NJ, USA, 2001.
27. Hu, G.R.; Khoo, H.S.; Goh, P.C.; Law, C.L. Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning. *J. Geodesy* **2003**, *77*, 292-302.
28. Buick, R. GPS guidance—making an informed decision. In *Proceedings of the 6th International Conference of Precision Agriculture*, Madison, WI, USA, July 2002; pp. 1979-2004.
29. Han, S.; Zhan, Q.; Noh, H. Kalman filtering of DGPS position for a parallel tracking application. *Trans. ASAE* **2002**, *45*, 553-559.

© 2011 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).