

Generación de rutas para el guiado de un tractor en una parcela agrícola mediante GPS

Miguel del Río Salio *

10 de marzo de 2006

Resumen

Los sistemas de guiado autónomo para maquinaria agrícola en una parcela de cultivo han experimentado una rápida evolución a partir del uso generalizado de receptores GPS. Estos sistemas permiten un ahorro de esfuerzo al conductor del vehículo así como minimizar del gasto en combustible, semilla y agroquímicos al reducir la aparición de huecos y solapes entre pasadas sucesivas sobre el terreno. En el proyecto actual se desarrolla un sistema de generación de rutas que permite el guiado de un vehículo agrícola a través de una parcela completa sin intervención alguna del conductor. Se han implementado distintos algoritmos que optimizan la ruta creada de forma que se facilite el guiado y se permita un ahorro máximo de insumos en la zona de cultivo.

Índice

1. Introducción	2
2. Origen y Objetivos	2
3. Desarrollo	4
3.1. Trabajo previo	4
3.2. Planificación de rutas	5
3.2.1. Cobertura de entornos cóncavos	6
3.3. Generación de caminos	6
3.4. Desarrollo de aplicaciones	6
3.4.1. Aplicación de toma de coordenadas para PDA	7
3.4.2. Aplicación de generación de rutas	7
4. Aplicabilidad	8
5. Originalidad	9
5.1. Fundamentos de los sistemas de guiado	10
5.2. Sistemas de asistencia al guiado	10
5.3. Sistemas de guiado autónomo	11
5.4. Valor añadido del proyecto	11

*Ingeniero de Telecomunicación. Julio 2005. E.T.S.I Telecomunicación. Universidad de Valladolid.

6. Resultados	12
6.1. Sistema completo realizado	12
6.1.1. Módulo actuador	12
6.2. Módulo de posicionamiento	13
6.3. Modulo de guiado	13
6.4. Modulo de generación de rutas y servidor	13
6.5. Pruebas realizadas	14
A. Publicaciones y ponencias	15
B. Documentación entregada	15

1. Introducción

La mayoría de las operaciones mecanizadas que se llevan a cabo en una parcela agrícola se realizan mediante recorridos paralelos distanciados un ancho de trabajo fijo. En la práctica, estos trabajos requieren una gran atención por parte del conductor que frecuentemente se debe apoyar en referencias visibles (marcas de espuma, líneas sobre el suelo...) e incluso requiere la acción de varios operarios de apoyo encargados de cambiar la ubicación de las referencias en cada pasada.

Los sistemas de guiado (ya sean de ayuda al conductor o autónomos) para maquinaria agrícola surgen con el objetivo de resolver estos inconvenientes. Permiten un ahorro de esfuerzo al conductor del vehículo así como minimizar del gasto en combustible, semilla y agroquímicos al reducir la aparición de huecos y solapes entre pasadas sucesivas.

La generación de las trayectorias por las que posteriormente se guía el vehículo es muy similar en los soluciones de guiado disponibles de forma comercial en la actualidad como Trimble [1] o AutoFarm [2]. En primer lugar, el conductor realiza un trazada que sirve como referencia para que el sistema determine la posición de las siguientes pasadas paralelas en todo la zona que se pretende tratar.

Aunque esta metodología para crear las rutas resuelve en gran medida el problema del guiado autónomo, carece de varias características que se pretenden aportar en el proyecto actual:

- El sistema global no se puede considerar totalmente autónomo debido a que al final de cada trazada conductor debe conducir de forma manual al vehículo al comienzo de la siguiente.
- No se definen métodos para elegir la colección de rutas óptima entre todas las posibles.

A lo largo de este trabajo se presenta una solución a la generación de trayectorias que contempla los dos problemas anteriores creando una ruta que cubra la parcela sin intervención del conductor en las cabeceras de la zona de cultivo. La búsqueda de la mejor trayectoria se realiza en base a unos criterios que introducen una función que determina el coste de una ruta generada.

2. Origen y Objetivos

En el Grupo de Telemática Industrial de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad de Valladolid existen varias líneas de investigación dedicadas al estudio y desarrollo de herramientas en el campo del teleguiado, asistencia al guiado, navegación autónoma y otras tecnologías involucradas en lo que se ha denominado *agricultura de precisión*. El presente trabajo está enmarcado en un proyecto de mayor tamaño dedicado al estudio de técnicas y desarrollo de sistemas para el guiado autónomo de maquinaria agrícola, ya sea mediante herramientas basadas en visión artificial, teleguiado asistido o técnicas de guiado basadas en navegación por satélite, actualmente conocidas como GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*).

El objetivo global del proyecto pretende crear una plataforma de trabajo modular y escalable (figura 1) compuesta de varios bloques organizados en un modelo de tres capas y que están comunicados entre sí mediante protocolos estándar de transmisión (TCP y RS-232):

- **Módulo de entrada/salida:** Este bloque engloba:
 - *Fuentes de datos del sistema:* Interactúan con dispositivos de entrada de datos como receptores GPS, brújula electrónica, cámaras de vídeo, etc.. y proporcionan la información capturada al resto de módulos.
 - *Salida del sistema. Actuadores:* Estos módulos reciben información de otros módulos acerca del estado de los actuadores del sistema y envían esta información a la parte *hardware* que controla los mandos del vehículo.
- **Módulos base:** Existen aplicaciones que necesitan actuar sobre un mismo módulo. Estos módulos comunes a varias aplicaciones se agrupan en los módulos base.
 - *Fusión GPS+Brújula:* Se encarga de fusionar la información de rumbo proporcionada por el GPS con la dirección ofrecida por la brújula electrónica con el fin de obtener un valor más preciso del rumbo.
 - *Guiado rutas:* Implementa diversas leyes de control para que el tractor siga una trayectoria preestablecida.
 - *Detección de franjas:* Desarrolla algoritmos que permiten distinguir el área tratada de una parcela.
- **Módulos de alto nivel o remotos:** Corresponden a módulos que realizan una parte específica de la aplicación.
 - *Asistencia al guiado:* Proporciona información visual para asistir al conductor en aplicaciones con elevado ancho de trabajo o en condiciones de escasa visibilidad.
 - *Generador/Servidor de rutas:* Se encarga de computar las rutas óptimas a seguir por el tractor para una aplicación total en la parcela. El módulo se encarga de servir las rutas generadas a otros módulos.
 - *Teleguiado:* Módulo que permite conducir el tractor desde una estación remota.
 - *Teleguiado asistido:* Permite conducir el tractor de forma remota por teleguiado. Además permite que en determinados momentos el sistema se guíe de forma autónoma mediante visión artificial o GPS.

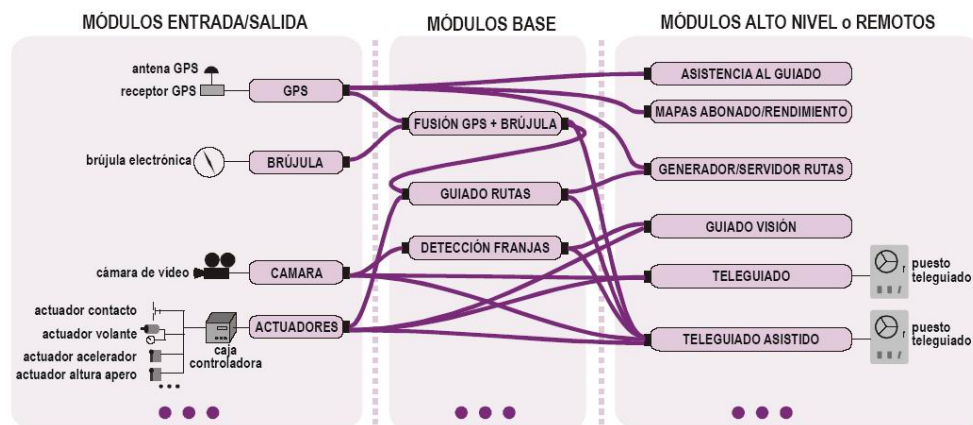


Figura 1: Plataforma de trabajo

Dentro de la arquitectura definida anteriormente, el objetivo del presente proyecto es el diseño de una serie de algoritmos y su implementación en un aplicación que genere las rutas que, seguidas por un vehículo agrícola, permitan la cobertura completa de una parcela.

La aplicación funcionará de la siguiente manera:

1. El operario recorre los bordes del terreno y recoge datos sobre la posición y geometría de la parcela usando un receptor *GPS* conectado al dispositivo que contiene la aplicación.
2. La aplicación, teniendo en cuenta diferentes parámetros (radio mínimo de giro del tractor, ancho del apero agrícola...) debe generar la ruta óptima que seguirá el tractor durante el trabajo. Un ejemplo de ruta se puede ver en la figura 2.
3. La ruta (en forma de pares de coordenadas topográficas cartesianas) debe almacenarse en un archivo para que pueda ser leída por otra aplicación encargada de guiar al tractor (según el modelo presentado anteriormente).

3. Desarrollo

3.1. Trabajo previo

En la bibliografía se pueden encontrar numerosas referencias a trabajos acerca del guiado autónomo de un vehículo a través de un entorno conocido.

Shin and Singh [3] describe el problema de la navegación de un móvil y lo divide en cuatro subtareas (figura 3) que interrelacionadas forman la estructura de control de un sistema de guiado de un vehículo. El sistema desarrollado se ocupa de la implementación de las etapas consistentes en la planificación de la ruta y la generación del camino.

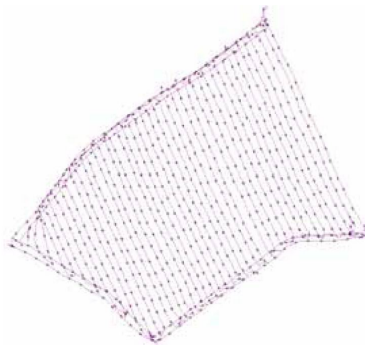


Figura 2: Ruta seguida por un tractor en una parcela

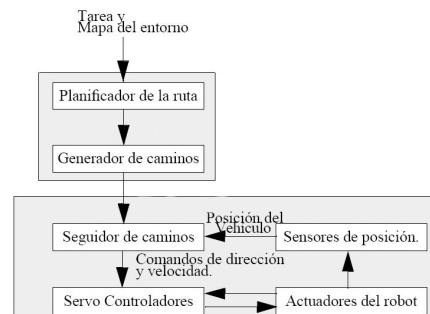


Figura 3: Estructura de un sistema de navegación [3]

La planificación de la ruta crea una secuencia ordenada de posiciones seguras que debe adoptar un vehículo para llegar hasta el destino basada un modelo del entorno creado en un paso anterior (que define perímetro y obstáculos) y en la descripción de una que se debe realizar durante el guiado. Existen una serie de métodos clásicos de planificación de un camino y han sido tratados ampliamente.

Así Nilsson [4] describe un sistema basado en grafos de visibilidad para planificar una ruta en un entorno conocido. Rombaut *et al.* [5] y Brooks [6] desarrollan métodos de planificación para que el vehículo circule lo más alejado posible de los obstáculos del entorno basados en diagramas de Voronoi y cilindros rectilíneos generalizados (CRG) respectivamente.

Otros autores como Thorpe [7] basan la planificación de la ruta en una descomposición del entorno en celdas y la construcción de grafos de adyacencia. Un ejemplo de desarrollo de este tipo es el definido por Latombe [8] que crea divisiones trapezoidales en el área de guiado. Borenstein y Koren [9] desarrolla técnicas en tiempo real basadas en la definición de campos potenciales en el entorno que actúan sobre el vehículo guiado.

El conjunto de métodos de planificación que más se adaptan a las necesidades del sistema son los métodos de cobertura. La planificación de rutas de cobertura consiste en determinar una ruta que debe recorrer un vehículo para pasar por todos los puntos de un entorno. Choset y Pignon [10] y Huang [11] definen un conjunto de métodos que permiten la cobertura mediante trazadas paralelas (*back and forth motions*) en un amplio conjunto de entornos poligonales haciendo uso de técnicas basadas en la descomposición y la creación de grafos de adyacencia y desarrollan heurísticas que determinan la ruta óptima entre todas las posibles.

Schmidt y Hofner [12] describe un algoritmo en tiempo no real para un robot de limpieza basado también en cobertura basada en trazadas de *ida y vuelta*. Otros algoritmos [13] combinan este tipo de trazadas con trazadas paralelas al contorno de la región (*contour parallel motion*) y [14] describe una cobertura en rejilla.

La generación de caminos consiste en crear una trayectoria que resulte admisible cinemática y dinámicamente al vehículo que se pretende guiar a partir de la ruta creada por el planificador en el paso anterior. Las características del vehículo quedan definidas mediante modelos matemáticos que formalizan los distintos estados que puede tomar el vehículo. Thuiot *et al.* [15] define el modelo de la bicicleta que resulta bastante fiable para vehículos con características no holonómicas (*non-holonomic constraints*) [16]. Asimismo la teoría del Triedro Intrínseco de Frenet [17] permite definir las características de cada punto de una trayectoria.

3.2. Planificación de rutas

El concepto de planificación de rutas consiste en encontrar una ruta segura capaz de guiar un vehículo desde una posición inicial a una final pasando por una serie de puntos intermedios de forma que se cumplan una serie de requisitos impuestos. Se denomina ruta segura a un camino continuo y libre de obstáculos. En esta primera especificación de la ruta únicamente se asegura la continuidad en la posición y se pasan por alto características cinemáticas y dinámicas del vehículo, lo que supone que sólo un robot móvil omnidireccional podría seguir esta primera referencia.

Los algoritmos de cobertura son entre todos los métodos de planificación estudiados en el apartado 3.1 los que mejor se adaptan a los requisitos de la aplicación. Su objetivo es determinar una ruta que debe recorrer un vehículo para pasar al menos una vez sobre cada punto de un entorno. Sus aplicaciones son muchas y muy variadas e incluyen trabajos de limpieza (fregado, aspirado ...), vigilancia, agrícolas (rastrillado, arado, fertilizado), creación de cartografía, limpieza de minas, quitanieves, operaciones de rescate, etc.

La eficiencia es muy importante en la mayoría de las aplicaciones que utilizan algoritmos de cobertura; el tiempo es crítico en operaciones de rescate y en las aplicaciones industriales una ruta óptima permite ahorrar tiempo y dinero en combustible. Aunque son muchas las técnicas utilizables para generar rutas de cobertura, pocas de ellas tienen en cuenta el coste del camino generado para cubrir el área especificada.

El tiempo empleado en cubrir una región (suponiendo una cobertura basada en trazadas de ida y vuelta como la que propone Huang [11]) es la suma del tiempo en que se realizan las pasadas más el tiempo necesario en recorrer el trayecto desde el fin de una trazada al comienzo de la siguiente. Sin embargo, los giros llevan asociada una considerable pérdida de tiempo ya que el vehículo al realizarlos debe frenar, realizar un giro cerrado y volver a acelerar. Por tanto parece lógico pensar que un algoritmo será más eficiente cuanto menor sea el número de giros necesarios para completar la cobertura, aunque la distancia total recorrida sea la misma (figura 4).

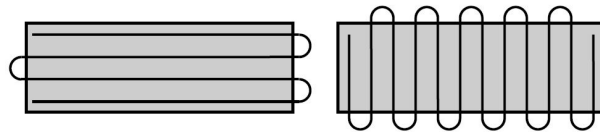


Figura 4: El número de giros determina la ruta óptima entre las posibles

Con el fin de determinar la cobertura óptima del entorno tratado se introduce el concepto de *función diámetro* $d(\theta)$ que se define como la altura del polígono respecto a la dirección de giro.

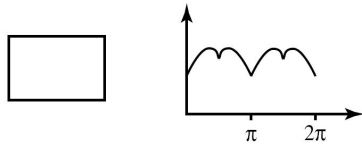


Figura 5: Función diámetro para un rectángulo

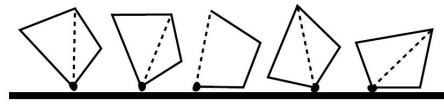


Figura 6: Forma de determinar la función diámetro

Para un determinado ángulo de giro θ (ángulo que forma la dirección de trazada con el eje horizontal), el valor de la función diámetro se calcula rotando el polígono $-\theta$ y midiendo la diferencia entre el punto más alto y el más bajo. El valor de θ que minimiza la función define la dirección en la que se deben realizar las trazadas.

3.2.1. Cobertura de entornos cóncavos

La mayor complejidad en la generación de rutas de cobertura se encuentra en lo que se denominan entornos cóncavos. A diferencia del ejemplo de la figura 4 en el que el entorno mostrado puede ser cubierto mediante trazadas de ida y vuelta en cualquier dirección del plano (aunque sólo una dirección será la óptima), en los entornos cóncavos existen direcciones que no pueden ser usadas para la cobertura sin salirse del entorno de trabajo, bien porque el entorno sólo se puede modelar mediante un polígono cóncavo, o bien porque posee zonas en su interior que no deben ser tratadas.

La filosofía para trabajar en este tipo de entornos se basa en dividirlos en subregiones de tal forma que cada una de ellas sea convexa en la dirección del espacio requerida y minimizar la función que resulta de la suma de la *función diámetro* en cada una de ellas.

3.3. Generación de caminos

El camino es el conjunto de datos que se entregan al seguidor de caminos (figura 3) para que ejecute la tarea de navegación. La misión del generador de caminos consiste en la conversión de la ruta en camino, es decir, construir la curva que interpole los puntos enviados por el planificador y discretizarla de tal forma que se elimine la condición de omnidireccionalidad y se adapte a las características del vehículo guiado según el modelo empleado. Así, las principales restricciones que se necesita imponer a una ruta son:

- *Acotación de los valores que debe tomar la curvatura*: Es equivalente a asignar un ángulo de giro máximo a las ruedas directrices del vehículo.
- *Poseer continuidad en posición, orientación y curvatura*: Las condiciones de no continuidad en la orientación implican la necesidad de cambios bruscos en la orientación del vehículo. Por otro lado una discontinuidad en la curvatura requeriría una aceleración infinita de la rueda de dirección.

El cumplimiento de estas condiciones en la generación de la función matemática que describe el camino permite que este resulte admisible desde el punto de vista cinemático. Además, puesto que se controla la continuidad y variación de la curvatura, se suavizan los cambios en las fuerzas que afectan al vehículo, por lo que las condiciones anteriores resultan también admisibles desde el punto de vista dinámico.

3.4. Desarrollo de aplicaciones

Los estudios anteriores han dado lugar a dos aplicaciones que implementan los distintas técnicas desarrolladas. La primera de ellas ha sido diseñada para ser ejecutada en un dispositivo portátil PDA y permite al agricultor recorrer el perímetro de la parcela que se desea cultivar, realizando un mapa de entorno.

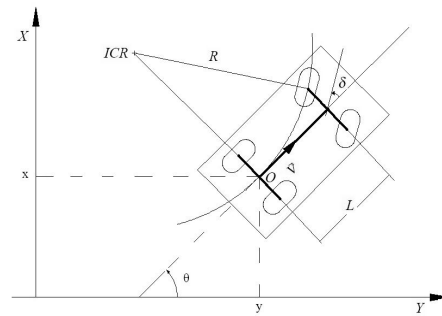


Figura 7: Modelo de la bicicleta usado en el análisis de los caminos

La segunda aplicación recoge los datos del área de cultivo generados y realiza la planificación y generación de caminos en función de un conjunto de parámetros que definen el vehículo (radio mínimo de giro, longitud entre ejes, velocidad lineal,...). El resultado es una secuencia ordenada de puntos que es entregada al seguidor de caminos.

3.4.1. Aplicación de toma de coordenadas para PDA

Para mayor comodidad de uso la instalación se puede realizar en dispositivos portátiles *Palm*, *Pocket PC* y teléfonos móviles que utilicen el sistema operativo con *SymbianOS*.

La aplicación es compatible con receptores GPS con salida según el protocolo NMEA 0183. La figura 8 muestra distintos detalles del programa desarrollado.

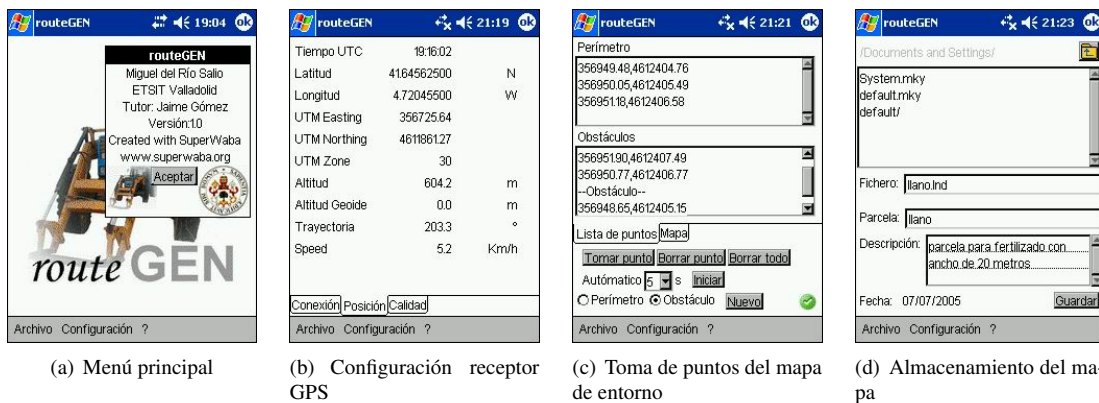


Figura 8: Aplicación para la realización del mapa de entorno de la zona de cultivo

3.4.2. Aplicación de generación de rutas

Una vez obtenido, el mapa de entorno se introduce en la aplicación de generación de rutas, la cual una vez introducidos los distintos parámetros que definen el vehículo que se pretende guiar (figura 9(b)) permite generar una secuencia de puntos que define un camino seguro y admisible que debe seguir el tractor para completar su trabajo (figura 9(a)).

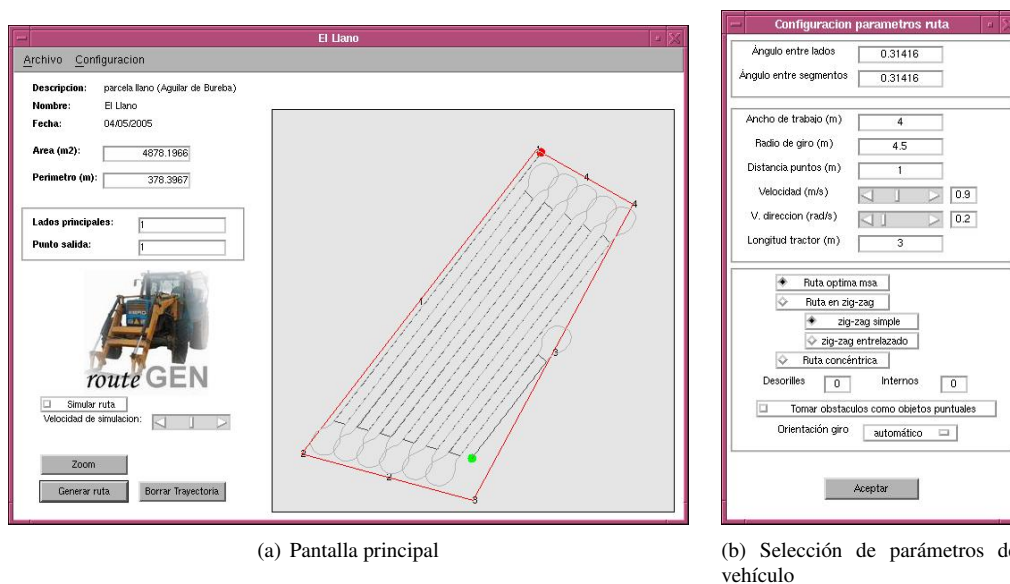


Figura 9: Software para la planificación y generación de caminos

4. Aplicabilidad

El proyecto desarrollado resulta de aplicación directa en lo que actualmente se denomina arquitectura de precisión.

El término agricultura de precisión engloba un conjunto de nuevas herramientas para mejorar la eficiencia de la producción agrícola. Permite mejorar los insumos (fertilizante, herbicida, semilla ...) reduciendo el desperdicio, aumentar las ganancias y mantener la calidad ambiental [18] al permitir el control de la cantidad de producto herbicida aplicado.

La agricultura de precisión está basada en la existencia de variabilidad en campo. Hace uso de nuevas tecnologías, tales como sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores, satélites e imágenes aéreas junto con herramientas de manejo de información (GIS, *Geographical Information Systems*) para obtener datos georeferenciados que permitan estimar, evaluar y entender dichas variaciones. Esta información recolectada puede usarse para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar fertilizantes y otras entradas necesarias, y predecir con exactitud la producción de los cultivos.

La aplicación de conceptos de agricultura de precisión usualmente se considera relativo a la *agricultura sostenible* que pretende evitar la aplicación de las mismas prácticas a un cultivo, sin tener en cuenta las condiciones locales de suelo y clima.

La agricultura de precisión puede ser usada para mejorar una zona o administrar un cultivo desde diferentes perspectivas:

- *Perspectiva agronómica*: Ajuste de prácticas culturales para tener en cuenta las necesidades reales del cultivo (mejores manejos de la fertilización).
- *Perspectiva técnica*: Mejora de la administración del tiempo a nivel de cultivo (planificación de actividades agrícolas).
- *Perspectiva ambiental*: Reducción de impactos agrícolas (mejor estimación de necesidades en nitrógeno implica menos nitrógeno liberado al ambiente).
- *Perspectiva económica*: Incremento en el producto de salida, reducción de insumos, incremento de la eficiencia (bajos costos de fertilización con nitrógeno), reducción de combustible.

Además, permiten al agricultor tener una historia de sus prácticas agrícolas y sus resultados, ayudar en la toma de decisiones y en el seguimiento de exigencias (como las que se requieren cada vez más en los países desarrollados).

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías no es tan obvia como parece. Para que resulte verdaderamente rentable, es necesario disponer de medios, tanto tecnológicos como físicos. En algunas zonas de América, la visión de los sistemas de guiado está logrando éxito pero en España tal vez no cuente a priori con infraestructura suficiente y además se plantea el problema inicial de la poca superficie de las áreas de cultivo que evitan que el gasto generado en la adquisición del sistema no resulte rentable.

Entre los principales problemas para la implantación de la agricultura de precisión se pueden destacar:

- La agricultura de precisión no está disponible para todos los agricultores, sino que se limita a aquellos con escala grande de producción.
- Los agricultores consideran los equipos caros, sin pararse a analizar sus ventajas a largo plazo.
- Problemas de compatibilidad con maquinaria existente.
- Se requieren ciertas habilidades informáticas para la implantación de los sistemas en un sector con poca cultura de innovación.
- Resistencia del sector a pagar por formación.
- Carencia de programas educativos que involucren a ingenieros, investigadores y consultores.

De cualquier manera, de la misma forma que ocurrió con otras tecnologías (aparición de tractores, agroquímicos, etc ..) el uso de estos sistemas por parte del agricultor no tiene marcha atrás, por lo que se deben tener en cuenta en un futuro próximo donde resultará más que conveniente para empresas de explotaciones medianas-grandes en una agricultura donde la competitividad cobrará un mayor protagonismo.

5. Originalidad

La tecnología usada en los sistemas de ayuda al guiado y guiado autónomo de vehículos no es de reciente aparición. Desde hace varios años existen sistemas usados para transporte aéreo, marítimo y minería, encontrando en el campo de la agricultura un espacio de expansión donde las ventajas que proporciona son indudables.

Como norma general, el trabajo en una parcela se realiza mediante pasadas paralelas distanciadas según el ancho de trabajo del apero empleado por la máquina. Sin embargo, en la práctica resulta complicado mantener una perfecta alineación de una pasada respecto a la anterior (y más si el ancho de trabajo es elevado, como sucede en aplicaciones de abonado o pulverización de agroquímicos, figura 10), produciéndose a menudo el solapamiento de dos pasadas o un hueco entre ellas. Para solucionar este problema el conductor debe apoyarse en referencias visibles en el terreno (marcas de espuma, líneas sobre el suelo generadas por discos o rejas trazadoras o simplemente la propia labor que se está realizando).



Figura 10: Labor de pulverización de agroquímicos con elevado ancho de trabajo

Esta metodología de trabajo tiene importantes limitaciones. Por una parte resulta imposible trabajar en condiciones de niebla, poca luz o polvo. Por otra parte los errores cometidos al desviarse de la trayectoria correcta son acumulativos y repercuten en el pase siguiente que también va a resultar desviado. Los sistemas de ayuda al guiado y guiado autónomo surgen con el objetivo de resolver estos inconvenientes.

5.1. Fundamentos de los sistemas de guiado

El método de funcionamiento de los sistemas de guiado se basa en la comparación en cada momento de situación y trayectoria que tiene un vehículo con las que debería tener y que fueron establecidas anteriormente.

En la década de 1920 se realizaron los primeros diseños de control mecánico para realizar tareas agrícolas sin necesidad de conductor. Uno de los primeros sistemas consistía en guiar una máquina por una parcela mediante una rueda que introducida en un surco le servía de referencia. Posteriormente se crearon otros sistemas más complejos (aunque nunca llegaron a implantarse de forma comercial) basados en seguimiento de cables enterrados en el suelo o en el posicionamiento a través de campos magnéticos (creados mediante bobinas de gran tamaño). Todos estos equipos tenían el inconveniente de que para su funcionamiento se necesitaba la instalación de marcadores en la parcela.

Los primeros equipos comercializados de forma masiva fueron los basados en visión artificial o los basados en barridos láser. Algunos equipos comercializados empleaban dispositivos ultrasónicos capaces de distinguir franjas sin vegetación. No obstante, no fue hasta la aparición del sistema de posicionamiento global (GPS) cuando comenzó el verdadero desarrollo de los sistemas de guiado al tratarse de una tecnología robusta, fiable, sin necesidad de ajuste y de un coste asequible.

Dentro de los sistemas guiado, se pueden realizar dos divisiones en función del modo en que se corrigen las desviaciones del vehículo de la trayectoria establecida:

- *Sistemas de asistencia al guiado*: Se basan en informar al conductor del vehículo de la magnitud y el sentido de la desviación, y este se debe encargar de actuar sobre los controles del vehículo para volver a la trayectoria ideal.
- *Sistemas de guiado autónomo*: Suponen el diseño de un sistema de control en lazo cerrado que se encarga de actuar sobre los mandos del vehículo manteniéndolo de forma automática en el camino correcto.

5.2. Sistemas de asistencia al guiado

Aunque muchas marcas han desarrollado sistemas de ayuda al guiado, el principio de funcionamiento es muy similar en todos ellos. Los más conocidos son la *Barra de luces* (AgGPS 50 Lightbar de Trimble [19], Agrosat de GMV Sistemas [20],...) y el sistema *Parallel Tracking* de John Deere [21]. La mayoría de estos sistemas tienen en común la flexibilidad de comunicarse con otros instrumentos de medidas como son monitores de rendimientos, controladores.



(a) Marcador agrícola Agrosat de GMV Sistemas



(b) Marcador agrícola de Trimble

Figura 11: Marcadores agrícolas GPS

La *barra de luces* consiste en una barra horizontal con pequeños indicadores luminosos. En el centro de la barra existe una luz de color o forma diferente, la cual indica la dirección correcta de la pasada. Si la dirección no es la correcta las luces se iluminan a izquierda y derecha, en mayor o menor número según

la magnitud del error cometido. El sistema *Parallel Tracking* una pantalla integrada en una consola que permite visualizar la pasada ideal que debemos seguir.

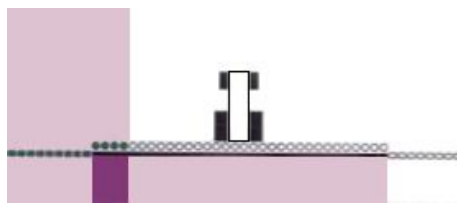


Figura 12: Funcionamiento de la *barra de luces*

Para trabajar con un sistema de ayuda al guiado, el conductor de la máquina agrícola realiza en primer lugar una pasada que servirá de referencia para todas las demás. En esta primera pasada de referencia hay que marcar el inicio y el final de la línea mediante dos puntos. Después de esto el equipo determina la posición de las siguientes pasadas paralelas en todo el campo que vamos a tratar. Cuando se llega al final de la pasada el conductor debe girar para iniciar la siguiente pasada, indicándose en la barra de luces la distancia de aproximación a la nueva línea que se debe seguir.

5.3. Sistemas de guiado autónomo

Estos equipos constan de un procesador que recibe la información de los sensores, realiza los cálculos y establece las correcciones actuando sobre la dirección del vehículo.

Los sistemas de guiado autónomo obtienen la posición del vehículo mediante una antena receptora GPS colocada en el techo del tractor. Este hecho da origen a errores en el posicionamiento real en caso de que exista una inclinación lateral o longitudinal del vehículo. Algunos sistemas como *AutoFarm* [22] solucionan este error utilizando tres antenas GPS con sus respectivos receptores, lo que permite al procesador calcular no sólo la posición sino también la orientación del tractor. Otros sistemas emplean sistemas inerciales (giróscopos y acelerómetros) colocados en cajas metálicas en el exterior de la cabina. Además disponen de sensores que informan al sistema del ángulo al que se encuentran orientadas las ruedas delanteras o actuadores sobre el mecanismo hidráulico de la dirección.

La forma de establecer la trayectoria que se debe seguir es mediante lo que se conoce como línea A-B. Consiste en situarse al comienzo de la primera pasada y marcar el punto como punto A. La primera pasada se hace de forma manual y cuando se llega al final se marca el punto como B. Una vez hecho esto, se ingresa el ancho de trabajo y el sistema traza líneas paralelas a la original A-B separadas un ancho de trabajo del apero usado. Para empezar el trabajo una vez programado el equipo se debe guiar manualmente el tractor hasta una posición próxima al inicio de la pasada y entregar el control al sistema pulsando la tecla correspondiente. Al llegar al final, el tractorista debe volver a tomar de nuevo el volante para efectuar la maniobra de aproximación a la pasada siguiente.

Recientemente se han desarrollado otro tipo de sistemas que añaden la posibilidad de seguir trayectorias que no seas simples rectas (ver figura 13(b)).

5.4. Valor añadido del proyecto

Los métodos de asistencia al guiado y guiado autónomo comercializados en la actualidad y que se describen en los apartados anteriores resultan de gran utilidad para reducir la cantidad de semilla, abono o herbicida desperdiciada por solape de pasadas así como para evitar los espacios o zonas no tratadas en el interior de la zona de cultivo.

Sin embargo, como ya se comentó en el capítulo 1 los sistemas no se pueden considerar completamente autónomos debido a que el conductor debe tomar manualmente el control del tractor para realizar el giro de cabecera al llegar al final de cada pasada. Este guiado completamente autónomo, es el que desarrolla el proyecto actual cuyos resultados se pueden observar en el capítulo 6

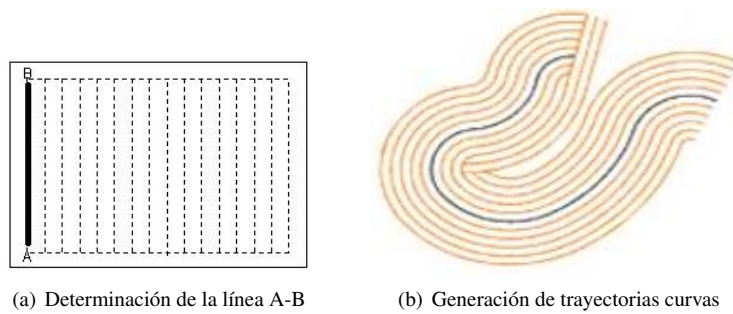


Figura 13: Sistemas de generación de trayectorias

6. Resultados

6.1. Sistema completo realizado

Si a partir del esquema de la figura 1, se extraen los módulos que intervienen en el sistema de guiado autónomo por GPS el diseño del sistema es el mostrado en la figura 14.

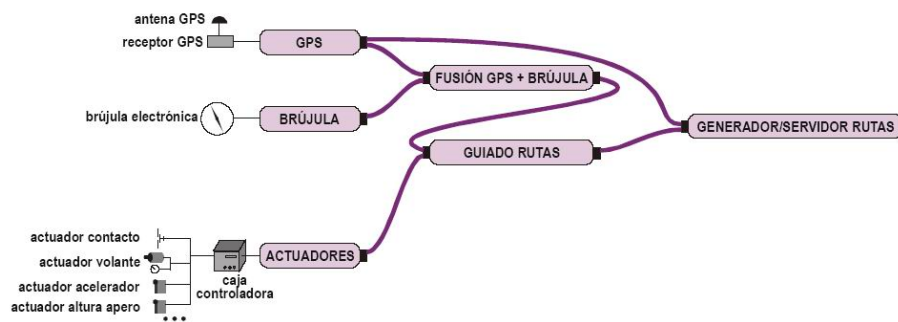


Figura 14: Esquema del sistema de guiado autónomo por GPS

En dicho diseño se mantiene la uniformidad con los bloques del diseño global. Se pueden distinguir, por lo tanto tres grandes bloques:

- *Capa inferior*: Está formada por los módulos de entrada y salida que se encargan de enviar información a los actuadores del tractor (módulo actuador) o recibir información de las fuentes de datos (módulo de posicionamiento).
- *Capa intermedia*: Formada por el módulo de guiado, tiene como misión calcular el ángulo de dirección de las ruedas del tractor y el estado de los servomotores.
- *Capa superior*: Se encarga de testear el sistema, monitorizar el guiado y enviar datos a la capa intermedia. Además esta capa debe crear una ruta (secuencia de pares de coordenadas) segura que debe seguir el tractor.

6.1.1. Módulo actuador

El módulo actuador se encarga de controlar que la dirección de las ruedas del tractor sea la requerida por el módulo de guiado de rutas y actuar sobre los servo motores que mueven el pedal del acelerador y la altura del apero. El esquema se observa en la figura 15.

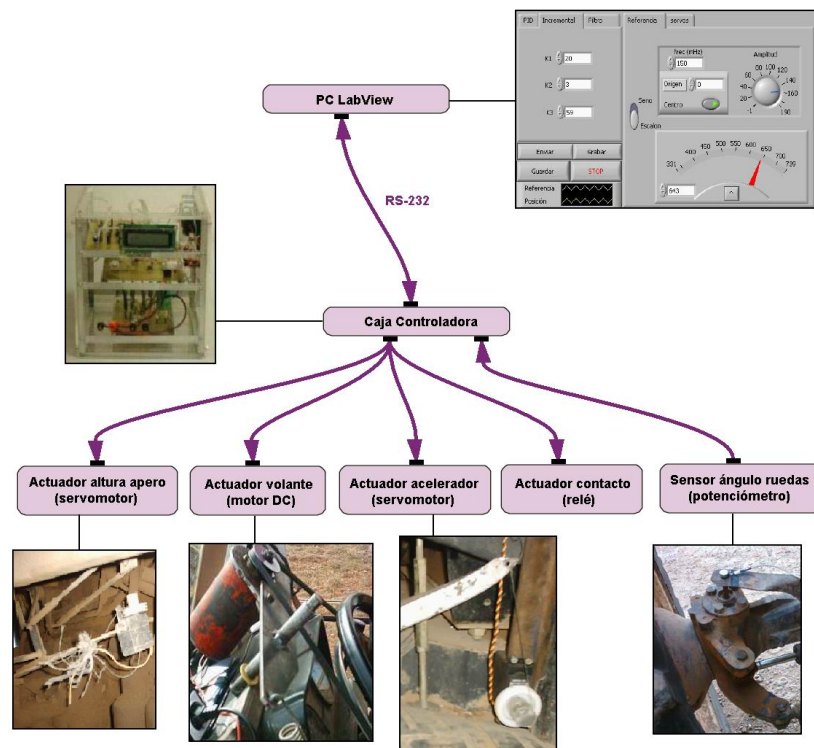


Figura 15: Módulo actuador sobre los mandos del tractor

6.2. Módulo de posicionamiento

El módulo de posicionamiento está formado por dispositivos de entrada que informan del estado del tractor en cada instante. Para realizar el guiado con éxito, el módulo de posicionamiento debe informar con la mayor exactitud posible de las siguientes magnitudes:

- Posición geográfica del tractor.
- Orientación o rumbo.
- Velocidad lineal.

6.3. Modulo de guiado

El módulo de guiado está compuesto por el *software* que realiza el guiado del vehículo a lo largo de la trayectoria establecidas por el generador de caminos. Su misión consiste en comparar el estado del tractor en un determinado momento con el que debería de tener y si son distintos decidir cuánto debe variar la dirección del vehículo para que ambos valores se aproximen.

6.4. Modulo de generación de rutas y servidor

El módulo de generación de rutas está formado por dos aplicaciones que funcionan de forma independiente (figura 16). Por una parte, mediante una aplicación que se ejecuta en una PDA conectada a un receptor GPS, se recorre la parcela tomando información acerca de la posición y geometría de la zona de cultivo. Los datos recogidos se vuelcan a un ordenador en el que una aplicación computa las rutas

óptimas para realizar el laboreo de la parcela.

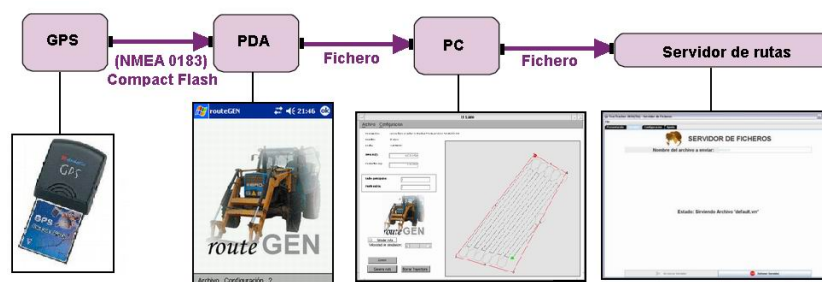


Figura 16: Sistema generador de rutas

Posteriormente la ruta generada almacenada en un fichero se envía al módulo de guiado mediante el servidor de rutas. De forma adicional se puede incluir en esta información el estado deseado para los actuadores del tractor (acelerador y bomba del apero) en cada punto de la parcela.

6.5. Pruebas realizadas

Para comprobar el funcionamiento correcto del sistema se realizaron una serie de pruebas de campo con el objetivo de probar las aplicaciones en un entorno lo más real posible.

El vehículo usado es un tractor modelo Ebro Kubota 8110 DT equipado con los sistemas actuadores explicados en el capítulo 6.1.

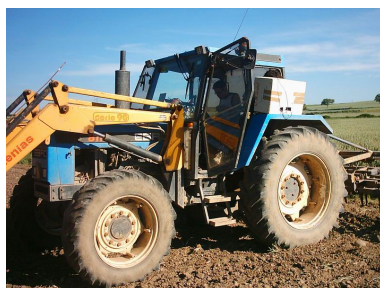


Figura 17: Tractor de las pruebas



Figura 18: Motor de guiado

Una de las pruebas realizada consiste en el rastrillado de una parcela en Aguilar de Bureba (Burgos).

El tractor se equipa con un rastra con cinco metros de ancho.

Una imagen de la ruta generada se puede ver en la figura 20 donde las zonas en las que se debe levantar el apero el apero de labranza se han dibujado en un tono más claro.

Las figuras siguientes 21 muestran diversas imágenes de la ruta seguida por el tractor guiado autónomamente.

La figura 22 muestra la evolución de la ruta y los errores de precisión del sistema de guiado en tiempo real. Se pueden apreciar ciertos errores de desviación de la ruta en momentos concretos pero en general se contempla la validez y el buen funcionamiento del sistema creado.



Figura 19: Toma de puntos del perímetro



Figura 20: Ruta generada para el rastrillado de la parcela



(a)

(b)

Figura 21: Prueba de rastrillado

A. Publicaciones y ponencias

El presente proyecto ha resultado premiado en la VII Edición de los Premios Fundación 3M en reconocimiento a su calidad científica y su carácter innovador. Los Premios Fundación 3M a la Innovación son convocados anualmente por la Fundación 3M en colaboración con las Universidades de Alcalá, Valencia, Valladolid y Zaragoza. El artículo entregado a dicho concurso se adjunta con la documentación.

Además, los resultados del trabajo han sido presentados con gran acogida en el *Simposio Internacional de Ingeniería Rural* celebrado en la Universidad de Valladolid con motivo del sesquicentenario de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. El artículo enviado (que se adjunta en la documentación aportada) fue el siguiente:

- J. Gómez, M. del Río, J. Uña, J. Vega, A. Carlón y J.F. Díez, “Adaptaciones realizadas a un tractor agrícola para permitir un guiado autónomo que trabaje toda la parcela”, en Simposio Internacional de Ingeniería Rural. ETS de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. 21-23 de junio de 2005.

B. Documentación entregada

Junto con este resumen, se entregan además:

- Memoria completa del proyecto fin de carrera en formato electrónico (*memoriaPFC.pdf*).
- Artículo presentado en Simposio Internacional de Ingeniería Rural celebrado en Palencia entre los días 21 y 23 de junio de 2005 (*articuloPalencia.pdf*).

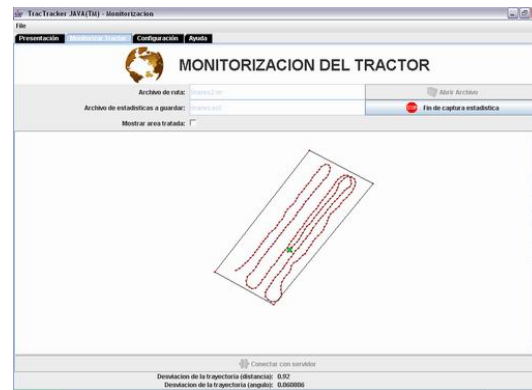


Figura 22: Módulo de monitorización del guiado

- Resumen entregado para participar en la VII Edición de los premios Fundación 3M a la Innovación (*premios3M.pdf*).
- Vídeo de las pruebas realizadas (*video.avi*). El vídeo se encuentra codificado en formato *Divx*. Para poder visualizarlo correctamente, en caso de que no se tengan instalados los *codecs* necesarios, se proporcionan¹:
 - *Sistemas Operativos Windows*:
 - *DivXPlay.exe*: Instala el *codec* necesario para visualizar correctamente el vídeo en sistemas operativos Windows. Contiene además un reproductor multimedia propio.
 - *mplayer*: Reproductor multimedia distribuido bajo licencia GPL. No es necesario instalarlo y para visualizar el vídeo basta con ejecutar el fichero *video.bat*.
 - *Sistemas Operativos Unix/Linux*: Se proporcionan las fuentes del reproductor *mplayer*.
- Software de visualización para archivos PDF de *Adobe Acrobat Reader 7* para sistemas operativos *Windows* (*AdbeRdr70_esp_full.exe*) o *Linux* (*AdbeRdr701_linux_enu.tar.gz*).

Referencias

- [1] *Lightbar Guidance and Automated Steering Systems*, Trimble.
- [2] *AutoFarm GPS Precision Farming. GPS Auto Steer*, AutoFarm.
- [3] D. H. Shin and S. Singh, "Path generation for robot vehicles using composite clothoid segments," Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-90-31, December 1990.
- [4] N. Nilsson, "A mobile automaton: An application of artificial intelligence techniques," AI Center, SRI International, 333 Ravenswood Ave, Menlo Park, CA 94025, Tech. Rep. 40, Mar 1969, sRI Project 7494 IJCAI 1969.
- [5] M. Rombaut, A. Segovia, D. Meziel, and A. Preciado, "Displacements of a mobile robot in a known environment," *IMACS Symposium MCTS*, 1991.
- [6] R. A. Brooks, "Solving the find-path problem by good representation of free space," pp. 290–297, 1990.

¹Todo el *software* aportado se puede obtener de forma gratuita en internet en las páginas del fabricante o bajo licencia GPL

- [7] C. E. Thorpe, "Fido: vision and navigation for a robot rover," Ph.D. dissertation, 1984.
- [8] J. C. Latombe, *Robot Motion Planning*, ser. International Series in Engineering and Computer Science; Robotics: Vision, Manipulation and Sensors. Boston, MA, U.S.A.: Kluwer Academic Publishers, 1991, 651 pages.
- [9] J. Borenstein and Y. Koren, "Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 4, pp. 535–539, 1991.
- [10] H. Choset and P. Pignon, "Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition," in *International Conference on Field and Service Robotics*, 1997.
- [11] W. H. Huang, "Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, 2001, pp. 27–32.
- [12] G. S. ant C. Hofner, "An advanced planning and navigation approach for autonomous cleaning robot operation," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, vol. 2, pp. 1230–1235, 1998.
- [13] D. Kurabayashi, J. Ota, T. Arai, and E. Yoshida, "Cooperative sweeping by mobile robots," *IEEE International Conference on Robotics ans Automotion*, pp. 1744–1749, 1996.
- [14] Y. Guo and Z. Qu, "Coverage control for a mobile robot patrolling a dynamic and uncertain environment," *University of Central Florida*, 1996.
- [15] B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet, and M. Berducat, "Automatic guidance of a farm tractor relying on a single cp-dgps." *Auton. Robots*, vol. 13, no. 1, pp. 53–71, 2002.
- [16] A. Bicchi, G. Casalino, and C. Santilli, "Planning shortest bounded-curvature paths for a class of nonholonomic vehicles among obstacles," 1995. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/article/bicchi95planning.html
- [17] J. Bloomenthal, "Calculation of reference frames along a space curve," pp. 567–571, 1990.
- [18] P. Kreimer, *Las TICs en la agricultura de precisión*, Centro de difusión de tecnologías ETSIT-UPM, CEDITEC, Junio 2003. [Online]. Available: <http://www.ceditec.etsit.upm.es>
- [19] *Trimble Home*, Trimble, última visita, Mayo del 2005. [Online]. Available: <http://www.trimble.com>
- [20] *GMV Sistemas*, GMV Sistemas S.A., última visita, Mayo del 2005. [Online]. Available: <http://www.gmvistemas.es>
- [21] *The John Deere Home Page*, John Deere, última visita, Mayo del 2005. [Online]. Available: <http://www.deere.com>
- [22] *Novariant: Agriculture: Agriculture*, Novariant: Agriculture, última visita, Mayo del 2005. [Online]. Available: <http://www.novariant.com/agriculture/index.cfm>