

Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control

Ramón González^{a,*}, Francisco Rodríguez^a, José Luis Guzmán^a

^a*Departamento de Informática. Universidad de Almería,
Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, España.*

Resumen

Uno de los campos de aplicación más significativos de la robótica móvil consiste en robots capaces de operar en condiciones exteriores sobre terrenos no preparados (robots planetarios, robots en agricultura, robot en operaciones de búsqueda y rescate, robots militares, etc.). Sin embargo, conseguir que los robots se muevan de forma eficiente y precisa en este tipo de entornos no es una tarea sencilla. Un primer aspecto crítico es el sistema de locomoción. En este caso, las orugas constituyen una alternativa sólida a otro tipo de sistemas y desde principios del siglo XX han demostrado sus bondades en vehículos tripulados. En este artículo se motiva y se demuestra mediante pruebas reales la idoneidad de este tipo de locomoción para robots móviles en terrenos no preparados. Es importante remarcar que este artículo pretende ser un resumen extendido del libro recientemente publicado por los autores “*Autonomous Tracked Robots in Planar Off-Road Conditions*” (González et al., 2014), y, por lo tanto, no pretende ser una contribución original. Inicialmente se presenta una perspectiva histórica de los vehículos y los robots con orugas. Posteriormente se discuten los aspectos de modelado con especial mención al fenómeno del deslizamiento. A continuación, se analizan varias estrategias de localización, en particular, la odometría visual. También se analiza el aspecto del control de navegación, para ello se analizan varias estrategias con compensación del deslizamiento. Finalmente se expresan las conclusiones del trabajo en base a la experiencia de los autores en este campo. Copyright © 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave: Deslizamiento, Odometría Visual, Control Adaptativo, Control Predictivo

1. Introducción

Es evidente que el comportamiento de un vehículo diseñado para operar en condiciones exteriores y sobre terrenos no pavimentados es bastante diferente del que cabe esperar cuando se mueve en entornos estructurados y pavimentados. Las principales razones que influyen en la movilidad y la controlabilidad de dicho vehículo están fuertemente relacionadas con la interacción entre el vehículo y el terreno sobre el que se desplaza. En este contexto, uno de los primeros puntos a considerar a la hora de diseñar la plataforma móvil es la estructura mecánica, en particular, el sistema de locomoción. Las alternativas más ampliamente consideradas son: ruedas, patas, u orugas. Las ruedas constituyen la solución más popular y la más ampliamente utilizada tanto en robots móviles como en vehículos autónomos (Siegwart and Nourbakhsh, 2004). El éxito de las ruedas se de-

be principalmente a su simplicidad mecánica y a su alta eficiencia (energía consumida frente a distancia recorrida). Además, usando más de tres ruedas el vehículo se encuentra completamente equilibrado. Sin embargo, la buena eficiencia de las ruedas se ve disminuida a medida que el terreno es menos consistente. Este punto puede llegar a ser tal que la plataforma móvil se puede quedar estancada y, por lo tanto, la misión del robot móvil podría verse abortada. Por ejemplo, el rover *Spirit* permanece inmóvil en una duna en Marte desde el año 2009 y gran parte de la misión científica se ha abortado. En estos casos de terreno poco compacto, las ruedas sufren una mayor fricción mientras que las patas se ven mucho menos afectadas debido a que sólo hay un punto de contacto con el suelo (Siegwart and Nourbakhsh, 2004). Por contra, la locomoción mediante patas requiere más grados de libertad y, por lo tanto, mayor complejidad mecánica que la locomoción mediante ruedas u orugas.

Una alternativa interesante a las ruedas y las patas para terrenos poco compactos son las orugas. Este sistema de locomoción hace uso de pistas de deslizamiento, lo que implica una mayor área de contacto con el terreno, y por tanto supone una mejor maniobrabilidad y tracción que las ruedas y una movi-

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: rgonzalez@ual.es, ramong@mit.edu (Ramón González), frrodrig@ual.es (Francisco Rodríguez), jose Luis.guzman@ual.es (José Luis Guzmán)

lidad superior a la que ofrecen las patas. Además, supone un diseño mecánico menos complejo que el de las patas (se requieren sólo dos actuadores para tracción) o ruedas (no se requiere sistema de suspensión). En (Wong and Huang, 2006), los autores demuestran que el empuje desarrollado por un vehículo con ruedas es generalmente más bajo que el empuje desarrollado por un vehículo con orugas comparable, especialmente en suelos cohesivos. Esto es debido a que la presión normal media bajo los neumáticos es más grande que sobre una oruga. En este sentido, en el artículo (Hornback, 1998) se acuerda que la decisión entre ruedas u orugas se debe basar en: el tipo de misión del vehículo, el perfil del terreno, y las propias características del vehículo (peso, dimensiones, etc.).

Las principales ventajas de una locomoción basada en pistas de deslizamiento u orugas son:

- Es una solución muy adecuada para una plataforma versátil que opere sobre diversos tipos de terrenos e incluso en diferentes condiciones meteorológicas (barro, nieve, etc.). Las aplicaciones de búsqueda y rescate son un buen ejemplo para sistemas basados en orugas (véase la Figura 2b).
- Las orugas generan una baja presión en el suelo, incluso ante una elevada carga, lo que lleva a conservar mejor el terreno y el entorno en el que opera el vehículo. Esto motiva la elevada aplicación en agricultura y en actividades mineras (véase las Figuras 1b, 1d, 2a, 2f).
- Se previene la posibilidad de que el vehículo quede estancado en arena o nieve; por ello, los vehículos con orugas son muy utilizados en terrenos arenosos como en operaciones militares (transporte de artillería o personal). (véase las Figuras 1a, 1c, 2f, 2g, 2h).
- El centro de gravedad del vehículo se mantiene bajo, luego se consigue una buena estabilidad y movilidad (véase las Figuras 2c, 2g).

Es cierto que las orugas tienen algunos puntos críticos que conviene tener en cuenta. Uno de los más destacables es que el sistema consume mucha potencia de rodadura por rozamiento durante los giros, esto es, el suelo tiende a fracturarse durante los giros excesivamente cerrados o con radio de giro cero. También es importante remarcar la elevada vibración de la plataforma cuando el terreno no es liso. Como se ha comentado anteriormente se debe analizar bien el tipo de aplicación y a partir de ahí seleccionar el sistema de locomoción más adecuado.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se realiza una perspectiva histórica del sistema de locomoción mediante orugas tanto desde el punto de vista de los vehículos como de los robots móviles. En la Sección 3 se presenta un modelo con compensación del deslizamiento y su validación experimental. Una discusión de estrategias de localización utilizadas en robots en entornos exteriores se presenta en la Sección 4. Además, se valida una técnica basada en odometría visual a través de un robot móvil con orugas. En la Sección 5 se analizan varias estrategias con compensación del

deslizamiento y se muestran pruebas reales. Finalmente se detallan las lecciones aprendidas por lo autores en el uso de un robot móvil y las futuras líneas de investigación.

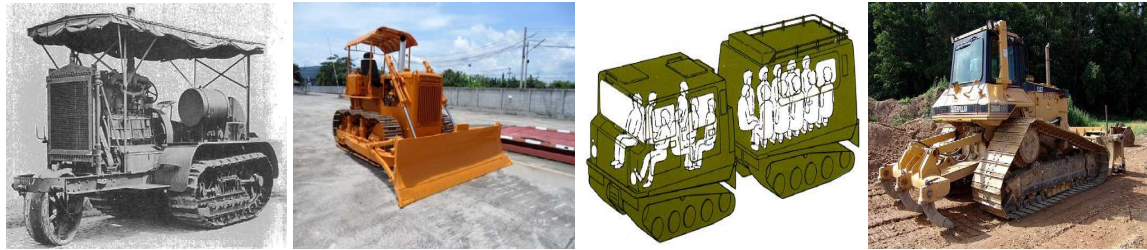
2. Perspectiva histórica

2.1. Vehículos con orugas

Los orígenes de los vehículos con orugas se fundamentan en la idea de desarrollar vehículos capaces de moverse en cualquier tipo de condiciones de un terreno no pavimentado (*off-road*), en escenarios tales como: nieve, terrenos arcillosos, terrenos con arena suelta, etc. En 1770, se publica una patente por Richard L. Edgeworth donde aparece por primera vez el concepto de lo que a la postre será el sistema de locomoción basado en orugas (Bekker, 1956). Durante esos años, ninguna de las invenciones basadas en esa idea llegaron a ser productos exitosos. Fue a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con la aparición de los motores de combustión interna cuando se produjo un salto remarcable en los sistemas de locomoción mediante orugas. Por ejemplo, en el año 1911, se fabrica el tractor Holt (Figura 1a). Este vehículo se utilizó por los ejércitos británico, francés y estadounidense durante la Primera Guerra Mundial para transporte de equipamiento militar. Esta plataforma fue el origen de los tanques de guerra. Después de la Guerra, los desarrollos exitosamente utilizados para fines militares se aplicaron a la agricultura. Durante los años 1920-1940, muchas de las cuestiones formales derivadas del uso de la locomoción mediante orugas fueron estudiadas en detalle: relación entre oruga y suelo, fenómenos de resistencia, hundimiento, dimensiones de las orugas, presión sobre el suelo, etc. Fue durante la Segunda Guerra Mundial cuando se comenzaron a desarrollar vehículos con orugas fundamentados en una sólida investigación (Figuras 1b, c, d). Desde entonces, numerosos estudios se centran en la comparación entre los sistemas de locomoción mediante ruedas y orugas (Korlath, 2007; Hornback, 1998; Wong and Huang, 2006). También han aparecido trabajos relacionados con el efecto de las orugas sobre diferentes tipos de terrenos y las fuerzas que aparecen (Benoit et al., 2003; Shoval, 2004), así como trabajos relacionados con el modelado de la interacción oruga-suelo (Rubinstein and Coppock, 2007). Para más detalles sobre vehículos con orugas se recomienda consultar la página web de la sociedad *International Society of Terrain Vehicle Systems*, <http://istvs.org>.

2.2. Robots móviles con orugas

Como se ha comentado hasta ahora, el sistema de locomoción mediante orugas constituye una alternativa muy razonable a la hora de diseñar robots móviles para operaciones en exteriores y superficies no pavimentadas. En este apartado se presentan algunos ejemplos de robots móviles con orugas publicados recientemente. En concreto, la Figura 2a muestra al robot Fito-robot desarrollado para trabajar en el interior de invernaderos para aplicaciones de pulverización (Sánchez-Hermosilla et al., 2010). En este caso, se optó por una oruga de goma a fin de dañar lo menos posible el suelo del invernadero en los giros. La Figura 2b presenta el robot Auriga- para labores de extinción

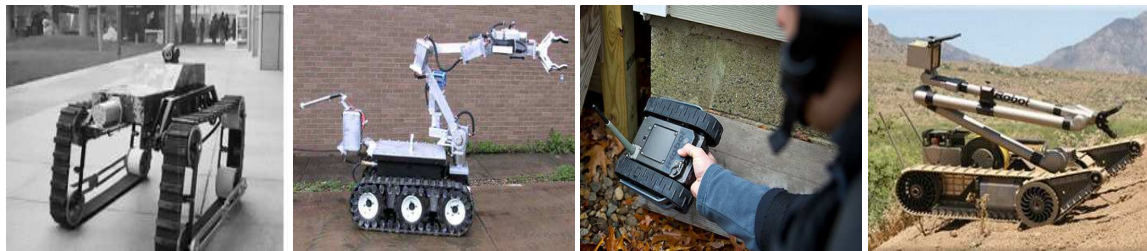


(a) Tractor Holt, transporte de artillería pesada durante la Primera Guerra Mundial (año 1911) (Bekker, 1956) (b) Bulldozer Komatsu D50, construcción y tareas mineras (año 1947) (McNae, 2000) (c) Vehículo Hagglunds Bv 206, transporte de personal militar (año 1974) (Hohl, 2007) (d) Caterpillar D6M, agricultura (año 1986) (Fuente: www.cat.com)

Figura 1: Ejemplo de algunos de los vehículos más significativos basados en locomoción con orugas



(a) Fitorobot (Universidad de Almería, España), agricultura (Sánchez-Hermosilla et al., 2010) (b) Auriga-β (Universidad de Málaga, España), tareas de extinción de incendios (Morales et al., 2009) (c) Plataforma de investigación (Universidad de Minnesota, EEUU) (Mourikis et al., 2007) (d) Plataforma de investigación (Universidad Ryerson, Canadá) (Liu and Liu, 2009)



(e) Plataforma de investigación (Universidad Nacional de Defensa, China), (Zi-rong et al., 2013) (f) Remotec ANDROS Wol, verine (Remotec Inc., EEUU), bot, EEUU, actividades militares (www.northropgrumman.com) (g) iRobot 110 FirstLook (iRobot, EEUU), actividades militares (www.irobot.com) (h) Packbot (iRobot, EEUU), actividades militares

Figura 2: Robots móviles basados en locomoción con orugas

de fuego (Morales et al., 2009). La principal novedad de este robot es que tiene una plataforma para el aterrizaje/despegue de mini-helicópteros teleoperados. La Figura 2c está relacionada con una plataforma de investigación de la Universidad de Minnesota en la que la configuración mecánica de las orugas se ha adaptado para subir escaleras (Mourikis et al., 2007). En la Figura 2d se muestra un robot móvil auto-reconfigurable capaz de usar las orugas tanto para manipulación como para locomoción. La novedad de este sistema es que el robot puede transportar objetos sin necesidad de un brazo manipulador, el control de la velocidad de las orugas resulta crítico. En la Figura 2e se muestra una plataforma móvil caracterizada por la posibilidad

de cambiar la configuración de las orugas (Zi-rong et al., 2013). Este hecho permite moverse al robot sobre rampas de 45° y superar escalones de 20 cm. El robot Andros desarrollado por Remotec (Figura 2f) se utiliza por la *Mine Safety and Health Administration* para su uso en minas donde las condiciones no son apropiadas para los trabajadores humanos. Finalmente, las Figuras 2g, 2h muestran dos robots con orugas desarrollados por la compañía iRobot para el ejército estadounidense. Entre las tareas que pueden llevar a cabo se encuentran la detección de explosivos y la vigilancia.

3. Modelado de robots móviles con orugas

El asunto del modelado de vehículos operando en terrenos exteriores no pavimentados constituye un campo de investigación por sí mismo dentro de la mecánica, es la llamada *terramecánica* (Wong, 1984). Este hecho enfatiza la dificultad a la hora de modelar todos los fenómenos que afectan al movimiento de un vehículo en esas condiciones. Generalmente, se trabaja con modelos matemáticos complejos que dependen de muchos parámetros. Algunos de esos parámetros están relacionados con características del propio suelo (cohesión, densidad, modulo de deformación, etc.) y otros con fenómenos como el deslizamiento (*slip*) y el hundimiento (*sinkage*) (Wong, 2001). Por ello, en el campo de la robótica se tiende a simplificar dichos modelos a fin de estimar ciertas variables en función de otras variables medibles (Iagnemma et al., 2004; Ray, 2009). En el caso concreto de los robots móviles con orugas una buena discusión sobre aspectos de modelado aparece en los trabajos (Martínez et al., 2005; Morales et al., 2009). En estos trabajos se detalla cómo la diferencia entre un vehículo con mecanismo diferencial basado en ruedas y uno con orugas viene dada por los Centros de Rotación Instantáneos (CRI). En el primer tipo de vehículos es constante y coincide con los puntos de contacto de las ruedas con el suelo. En cambio en los vehículos con orugas dichos CRI son variables y caen fuera de los centros de las orugas, este hecho se debe fundamentalmente al deslizamiento lateral. Además, en el trabajo (Le, 1999) se propone un modelo dinámico-cinemático completo para robots con orugas cuya finalidad es estimar los parámetros propios del terreno. En este modelo se tienen en cuenta el deslizamiento longitudinal, lateral y las fuerzas de tracción, entre otras variables.

En el trabajo realizado por los autores de este artículo se ha utilizado un robot móvil con orugas desplazándose a bajas velocidades, hecho que permite asumir que el deslizamiento lateral es insignificante (Cariou et al., 2009; Low and Wang, 2008). Por este motivo se ha utilizado un modelo basado en el modelo cinemático de un vehículo con mecanismo diferencial pero añadiendo el efecto del deslizamiento longitudinal (Endo et al., 2007; Wan et al., 2009; Yi et al., 2007, 2009). Matemáticamente

$$\begin{aligned} x^{sl}(t) &= \frac{v_r(t)(1 - i_r(t)) + v_l(t)(1 - i_l(t))}{2} \cos^{sl}(t) \\ y^{sl}(t) &= \frac{v_r(t)(1 - i_r(t)) + v_l(t)(1 - i_l(t))}{2} \sin^{sl}(t) \\ i^{sl}(t) &= \frac{v_r(t)(1 - i_r(t)) - v_l(t)(1 - i_l(t))}{b} \end{aligned} \quad (1)$$

donde $[x^{sl} \ y^{sl} \ i^{sl}]^T \in \mathbb{R}^3$ es la posición del robot móvil, $v_r \ v_l \in \mathbb{R}$ son las velocidades lineales de las orugas derecha e izquierda, respectivamente, $b \in \mathbb{R}$ es el ancho del robot e $i_r \ i_l \in \mathbb{R}$ es el deslizamiento de las orugas derecha e izquierda, respectivamente (en la siguiente sección se detalla cómo se ha estimado en este trabajo).

Posteriormente, se han realizado varias formulaciones del modelo de seguimiento de trayectorias utilizando el modelo cinemático simplificado (1). Recordar que este problema consiste en que el robot real debe seguir un robot virtual o de referencia representando las posiciones y velocidades deseadas a lo largo

del tiempo (Oriolo et al., 2002). En particular, se puede formular como

$$\begin{bmatrix} e_x(t) \\ e_y(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^{sl}(t) & \sin^{sl}(t) & 0 \\ \sin^{sl}(t) & \cos^{sl}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{rf}(t) & x^{sl}(t) \\ y^{rf}(t) & y^{sl}(t) \\ r^{rf}(t) & i^{sl}(t) \end{bmatrix}$$

donde $e_x \ e_y \ e \in \mathbb{R}$ son los errores longitudinal, lateral y en orientación, respectivamente, y $[x^{rf} \ y^{rf} \ r^{rf}]^T \in \mathbb{R}^3$ es la posición del robot referencia. Tras derivar con respecto al tiempo y operar, se consigue un modelo en espacio de estados dado por

$$\dot{e}(t) = A(t)e(t) + Bu(t)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & r^{rf}(t) & 0 \\ r^{rf}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $e = [e_x \ e_y \ e]^T \in \mathbb{R}^3$ es el vector de estado y $u = [u_1 \ u_2]^T \in \mathbb{R}^2$ es el vector con las entradas de control. Hay que destacar que la matriz de estado, A , varía dinámicamente dependiendo de la referencia, r^{rf} , y del parámetro que depende del deslizamiento. Para más detalles sobre el desarrollo matemático seguido se recomienda consultar (González et al., 2014).

Es importante notar que los modelos desarrollados por los autores tienen como objetivo fundamental el diseño de estrategias de control con compensación del deslizamiento (Sección 5). Esto explica el porqué se ha considerado el modelo cinemático (1) y el porqué las pruebas presentadas son principalmente en terrenos planos. Existen modelos más avanzados para tratar aspectos en condiciones con terrenos inclinados (*sloped terrains*), terrenos con baches (*bumpy terrains*), etc. Sin embargo, esos modelos requieren numerosos parámetros que no son fáciles de estimar o medir. Un buen ejemplo de dichos modelos se encuentran en (Iagnemma and Dubowsky, 2004; Wong, 2001).

3.1. Importancia del deslizamiento

El deslizamiento se define como la relación entre la velocidad real de avance de un vehículo y la velocidad angular de sus ruedas/orugas (Wong, 2001). Matemáticamente

$$i_j(t) = \left(1 - \frac{v(t)}{r_j(t)}\right) 100$$

donde i_j es el deslizamiento normalizado de la oruga j , v es la velocidad lineal de avance del vehículo, r es el radio de la oruga y j es la velocidad angular de giro de la oruga j .

El fenómeno del deslizamiento juega un papel fundamental cuando los robots se mueven en entornos exteriores no pavimentados debido a que la velocidad real de avance de la plataforma móvil va a ser menor a la velocidad a la que se mueven las orugas o las ruedas. Esto se puede entender como una perturbación persistente y dinámica en el movimiento del robot y que, por lo tanto, el sistema de control y el de localización deberán tenerla en cuenta a la hora de establecer las señales de control y de determinar la posición del robot.

El concepto del deslizamiento en vehículos basados en ruedas ha sido ampliamente estudiado en la literatura, véase por

ejemplo (Gracia and Tornero, 2007; Wang and Low, 2008; Wong, 2001). Generalmente, se ha considerado en la misma forma para vehículos con orugas. Sin embargo, aunque el deslizamiento en ambos casos se puede estimar de forma similar, el origen es diferente (Crolla and Schwanghart, 1992; Hornback, 1998; Wong and Huang, 2006).

En el caso de los vehículos con ruedas, el deslizamiento lateral es causado por la deformación del neumático, principalmente debido a un incorrecto inflado y/o a una alta fuerza centrífuga (Wang and Low, 2008). El deslizamiento longitudinal se debe a la compresión del neumático por la carga del vehículo. En el caso de los vehículos con orugas (o con ruedas rígidas), el deslizamiento se debe a otras razones bien distintas a estas. El deslizamiento lateral se debe principalmente a la fuerza centrífuga. Por ello, cuando el robot realiza giros con radio cero o se mueve a baja velocidad dicho deslizamiento se puede considerar insignificante. El deslizamiento longitudinal se debe principalmente a factores relacionados con el suelo y a la interacción oruga-suelo (hundimiento, cohesión, densidad, etc.) (Wong, 2001). Por ello, es un fenómeno que no se puede evitar por completo.

En la literatura existen diferentes formas para determinar el deslizamiento, véase (Iagnemma and Ward, 2009) para una revisión. En este trabajo se utiliza una aproximación similar a la aparecida en (Angelova et al., 2007). La velocidad real de avance del vehículo se obtiene con la técnica de odometría visual (véase la Sección 4), y la velocidad angular de giro se mide con dos codificadores acoplados a las orugas.

3.2. Experiencias reales

A fin de validar el modelo cinemático considerando el efecto del deslizamiento (1), se ha utilizado el robot móvil *Fitorobot* disponible en la Universidad de Almería (ver Figura 3). Este robot tiene una masa de 500 [Kg] y unas dimensiones de 1.5 [m] largo x 0.7 [m] ancho. La propulsión la genera un motor de gasolina de 20 [CV]. La principal aplicación del robot es para trabajos en el interior de invernadero. Por tanto, teniendo en cuenta el tipo de terreno de estos recintos (arena suelta) y a fin de compactar lo menos posible dicho suelo, se optó por un sistema de locomoción diferencial basado en orugas de goma. Para más información sobre la estructura mecánica del robot, los sensores y el hardware de control, así como el resto de subsistemas se recomienda consultar (Sánchez-Hermosilla et al., 2010).

En la Figura 4 se muestran tres experimentos comparando el modelo con deslizamiento y el modelo cinemático clásico de un vehículo con mecanismo diferencial (Siegwart and Nourbakhsh, 2004). Nótese como el modelo con deslizamiento se ajusta más al *ground-truth* (DGPS) en los diferentes terrenos. En el caso de tierra el deslizamiento medio estimado fue del 12 %, en césped fue del 8 % y en grava del 4.5 %.

4. Localización de robots móviles con orugas: odometría visual

Con el objetivo de seleccionar una estrategia de localización adecuada para un robot móvil con orugas, y en general para los



Figura 3: Robot móvil Fitorobot. Notar el sistema de locomoción basado en orugas de goma. También se pueden apreciar algunos sensores como: la antena del DGPS, codificador (eje trasero de la oruga), cámaras de visión, brújula magnética (debajo de la cámara frontal), sonares (parte frontal y lateral). El robot está controlado por un PC industrial colocado en la parte trasera del robot (junto al marco antivuelco y a los joysticks para el manejo manual).

robots móviles que operan en entornos exteriores, se debe llevar a cabo un estudio pormenorizado de las condiciones particulares del terreno (deslizamiento, “hundimiento del vehículo”, etc.) (Angelova et al., 2007; Wong, 2001) y de otras perturbaciones debidas al propio entorno (condiciones de luz, ruidos, etc.). Estos problemas llevan a que soluciones típicas como la odometría (basada en ruedas) resultan inapropiadas (Borenstein, 1994). Incluso, a veces, soluciones basadas en GPS pueden no ser aplicables, por ejemplo, en exploración espacial o en entornos parcialmente cubiertos (proximidad a árboles, edificios, invernaderos, etc.) (Hofmann-Wellenhof et al., 2001).

Una de las soluciones más exitosas en el campo de la localización en entornos exteriores es la llamada odometría visual (*visual odometry*) (Matthies et al., 2007; Montiel and Davison, 2006; Olson et al., 2003). Esta técnica se basa en la estimación incremental de la localización de un robot móvil comparando elementos de una secuencia de imágenes tomadas por una (o más) cámara(s) a bordo. Notar que la información visual obtenida minimiza el problema del deslizamiento, puesto que permite estimar la velocidad real de avance del robot (Angelova et al., 2007). Además, es importante remarcar que la odometría visual constituye una técnica de localización relativamente económica puesto que una cámara puede reemplazar a un conjunto de sensores como codificadores, IMU, GPS, etc.

Generalmente, existen dos formas de implementar odometría visual. La técnica más extendida es llamada flujo óptico (*optical flow*) (Johnson et al., 2008; Olson et al., 2003). Ésta se basa en seguir características distintivas (puntos con elevados

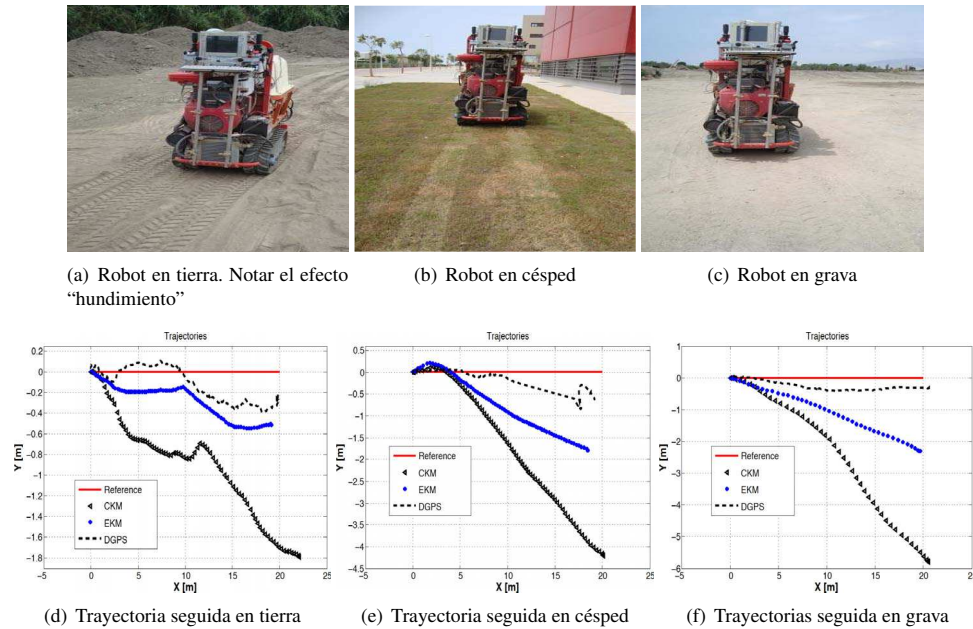


Figura 4: Comparación del modelo cinemático teniendo en cuenta el deslizamiento y sin tenerlo en cuenta (la línea roja representa la trayectoria a seguir, la línea de puntos es el *ground-truth*, la línea azul la trayectoria obtenida con el modelo cinemático con compensación del deslizamiento y la línea roja negra con el modelo cinemático clásico)

gradientes como esquinas, bordes, etc.) entre imágenes adquiridas sucesivamente, y determinar varios vectores velocidad entre la imagen actual y la anterior. Otra aproximación es a través de la técnica de correspondencia de plantilla (*template matching*) (Brunelli, 2009; Labrosse, 2006; Nourani-Vatani et al., 2009). Ésta se basa en realizar un proceso de correlación de una región (*template*) definida en la imagen actual con una imagen previa.

Los autores de este trabajo han utilizado la técnica de correspondencia de plantilla de forma exitosa en el robot móvil con orugas *Fitorobot* presentado anteriormente (González et al., 2012). La estrategia planteada se basa en tomar dos secuencias de imágenes utilizando dos cámaras. Una cámara que enfoca al suelo justo delante del robot móvil, y la segunda es una cámara panorámica. La primera secuencia se utiliza para estimar el desplazamiento longitudinal del robot. La segunda secuencia de imágenes se utiliza para estimar la orientación (*visual compass*) (Labrosse, 2006). En la Figura 5 se muestra el proceso de correspondencia de plantilla en una imagen panorámica. Este proceso obtiene como resultado el incremento en la rotación del robot entre una imagen y otra (notar la línea verde).

En la Figura 6 se muestra el resultado de una prueba real con el robot móvil *Fitorobot* para una trayectoria cuadrada de 160 metros. Este experimento demuestra la inexactitud de la técnica de odometría basada en ruedas para terrenos con deslizamiento. Además, se puede apreciar como la técnica de odometría visual con brújula visual se ajustó de forma aceptable al *ground-truth*. La trayectoria obtenida sólo con la cámara apuntando al suelo también sobrepasa el rendimiento de la odometría basada en ruedas.

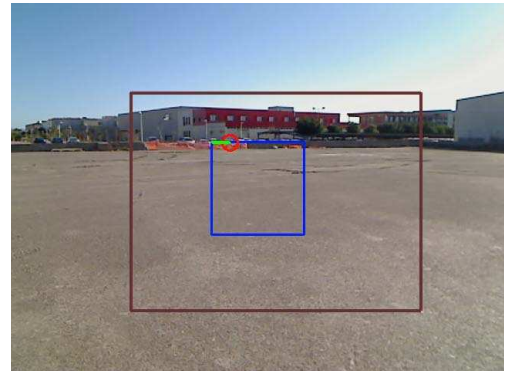


Figura 5: Estrategia de localización basada en brújula visual (*visual compass*). Notar que se utiliza una vista panorámica y se correlaciona una plantilla entre dos imágenes consecutivas (cuadro azul y línea verde). Además, para ahorrar tiempo de computación esta búsqueda se realiza sobre una región de la imagen original (recuadro negro).

5. Control de robots móviles con orugas: compensación del deslizamiento

En relación al control de movimiento de un robot móvil bien sea con orugas o bien sea con ruedas, un factor fundamental relacionado con la controlabilidad del mismo es el deslizamiento, como se ha comentado anteriormente. Desde el punto de vista del control, tradicionalmente este problema se ha abordado de dos formas diferentes.

Por un lado, algunas aproximaciones tratan de evitar el efec-

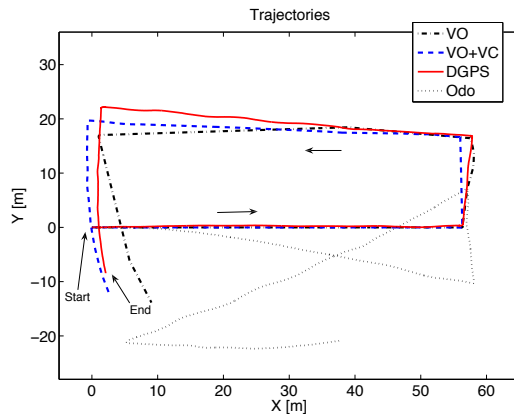


Figura 6: Odometría visual frente a odometría basada en ruedas en terreno con deslizamiento. Notar que se han probado dos estrategias basadas en odometría visual, una de ellas utilizando sólo la cámara que apunta al suelo (VO) y la segunda utilizando además la cámara panorámica (VO+VC).

to del deslizamiento generando acciones de control tales que el suelo nunca se fracture. En (Krebs et al., 2008), se presenta un controlador basado en el par que se debe aplicar a las ruedas del robot. La idea consiste en establecer un conjunto de pares que maximicen la tracción del robot y no se produzca deslizamiento. En el trabajo (Iagnemma and Dubowsky, 2000) se establece un criterio de optimización de forma que se maximice la tracción y se minimice el consumo, de tal forma que el suelo nunca llegue a fracturarse. En (Klancar and Skrjanc, 2007), se presenta un controlador predictivo en el cual se establecen unas restricciones en velocidad y aceleración de forma que el robot nunca deslice. En el trabajo (Angelova et al., 2007), se propone un método para detectar el grado de deslizamiento de un terreno a distancia, usando un algoritmo basado en visión artificial. De esta forma se calculan las rutas que el robot debe seguir para evitar entrar en áreas deslizantes.

Por otro lado, otras estrategias de control adaptan las señales de control dependiendo del deslizamiento estimado y hacen uso de esta medida para compensar su efecto. Éste es el caso más general, dado que el deslizamiento nunca se puede evitar por completo. En (Cariou et al., 2009; Lenain et al., 2007), se muestra un controlador para el seguimiento de trayectorias que utiliza un modelo cinemático extendido el cual permite tener en cuenta el deslizamiento en línea. El trabajo (Helmick et al., 2006) presenta un controlador para el seguimiento de trayectorias que compensa el deslizamiento modificando las velocidades a las que deben girar las ruedas. En este caso, el deslizamiento se calcula como la diferencia entre la posición estimada usando un filtro de Kalman y un sistema de localización basado en un sensor IMU y en odometría visual. En el trabajo (Ishigami et al., 2009) se detallan dos aproximaciones para compensar el deslizamiento lateral y longitudinal de un robot móvil operando en terrenos con pendientes. Un controlador se basa en una acción de control por adelantado y otro en la realimentación sensorial.

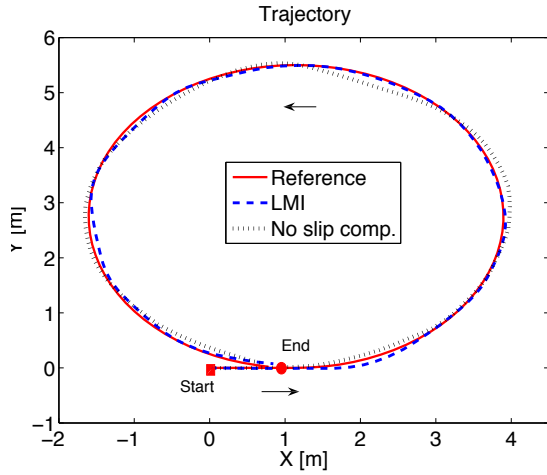
De acuerdo a la experiencia de los autores y en el contexto de un robot móvil con orugas, se han probado varias estrategias de control compensando el deslizamiento longitudinal. En el robot utilizado se asume un deslizamiento lateral de cero pues se mueve a velocidades bajas ($< 2\text{m/s}$) (Le, 1999; Lenain et al., 2007; Wang and Low, 2008). Las técnicas de control diseñadas se basan en aproximaciones conocidas en el campo del control automático, tales como control adaptativo, control robusto y control predictivo (Aström and Murray, 2008; Camacho and Bordons, 2004; Mayne et al., 2000). Sin embargo, dichas estrategias de control avanzadas son raramente aplicadas a robots móviles operando en entornos exteriores, especialmente las técnicas de control predictivo robusto. Una posible justificación es que estos algoritmos de control requieren elevados recursos computacionales debido principalmente a que se necesita resolver un problema de optimización en cada instante de muestreo. Este hecho, junto con la limitada capacidad de computación con la que se encuentran equipados muchos robots móviles y los reducidos periodos de muestreo que se suelen utilizar, justifican la reducida aplicación. En (González et al., 2014) se presentan en detalle tres estrategias de control con compensación del deslizamiento garantizando su ejecución en tiempo real. Inicialmente se propone una estrategia adaptativa donde la ganancia de control cambia en cada periodo de muestreo de acuerdo al deslizamiento estimado y a los valores de la referencia. Este controlador se ha implementado a través de la solución de un problema de optimización donde las restricciones se introducen en forma de inecuaciones (*Linear Matrix Inequalities, LMI*). Por otro lado, se propone una estrategia basada en control predictivo robusto. En este caso, en tiempo de ejecución se resuelve un problema de optimización donde la incertidumbre aparece en las restricciones relacionadas con los estados y las entradas (*tube-based MPC*). Dicha incertidumbre engloba la estimación del deslizamiento y la posición del robot.

5.1. Experiencias reales

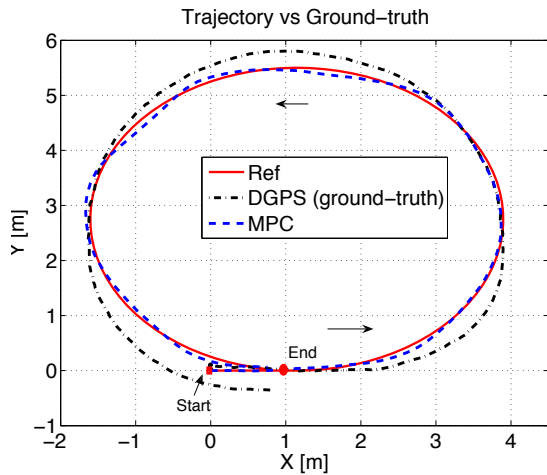
En este apartado se muestran algunas pruebas reales llevadas a cabo con el robot móvil con orugas *Fitorobot*, utilizando los algoritmos de control con compensación del deslizamiento. A modo de comparación, se añade un controlador lineal bien conocido en la literatura donde no se compensa el deslizamiento (Canudas et al., 1997; Kanayama et al., 1990).

En este caso se presentan dos tipos de trayectorias. En la Figura 7 se muestra un experimento relacionado con una trayectoria circular. Las velocidades de referencia de las orugas están entre 0.6 [m/s] para la oruga derecha y 0.5 [m/s] para la izquierda. La distancia total recorrida es próxima a 18 [m] . El robot se movió sobre una superficie tipo grava donde el deslizamiento medio fue de 5% . La Figura 7a muestra la trayectoria de referencia y las trayectorias seguidas por dos estrategias basadas en control adaptativo. Por una lado, la estrategia propuesta basada en LMI y con compensación del deslizamiento (González et al., 2010), y, por otro lado, la estrategia propuesta por (Canudas et al., 1997; Kanayama et al., 1990) sin compensación de deslizamiento. En la Figura 7b se incluye la trayectoria seguida por el control predictivo. Además se incluye el *ground-truth*, esto es, la trayectoria registrada por un DGPS. Se puede observar

cómo el error obtenido por los controladores con compensación del deslizamiento es casi nulo. Por ejemplo, el error lateral medio es: MPC 0.05 [m], LMI 0.03 [m], y sin compensación del deslizamiento 0.08 [m].



(a) Controladores adaptativos (con y sin compensación del deslizamiento)

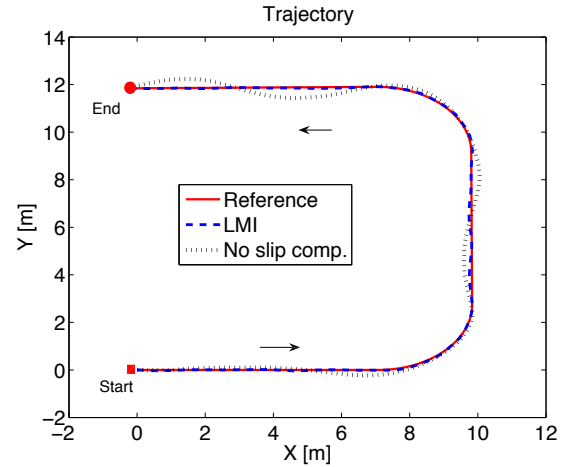


(b) Controlador predictivo robusto (con compensación del deslizamiento)

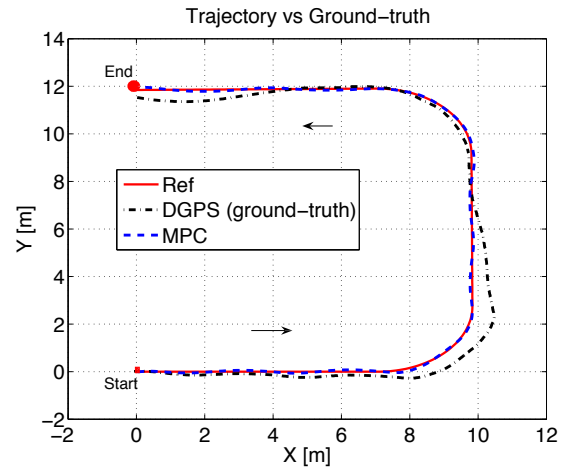
Figura 7: Experimento 1. Trayectoria circular (velocidades orugas 0.6 [m/s] y 0.5 [m/s], deslizamiento 5 %, distancia total 18 [m])

En la Figura 8 se comparan los resultados siguiendo una trayectoria con forma de “U”. En este caso, el robot sigue tres trayectorias en línea recta y dos giros a la izquierda. Las velocidades de referencia de las orugas es entre 0.3 y 0.25 [m/s]. En esta prueba, la distancia total es próxima a 30 [m], el deslizamiento también es del 5 %. En este nuevo experimento se vuelve a poner de manifiesto el mejor rendimiento de los controladores con compensación del deslizamiento frente al controlador sin compensación del deslizamiento. Por ejemplo, el error lateral medio es: MPC 0.04 [m], LMI 0.03 [m], y sin compensación del deslizamiento 0.17 [m].

Nótese que las pruebas realizadas han sido sobre un terreno



(a) Controladores adaptativos (con y sin compensación del deslizamiento)



(b) Controlador predictivo robusto (con compensación del deslizamiento)

Figura 8: Experimento 2. Trayectoria con forma de “U” (velocidades orugas 0.3 [m/s] y 0.25 [m/s], deslizamiento 5 %, distancia total 30 [m])

tipo grava donde el deslizamiento medio es 5 %. Se espera que en superficies con mayor deslizamiento, como por ejemplo el terreno de arena mostrado en la Figura 4a, el rendimiento de los controladores con compensación del deslizamiento mejore más significativamente al controlador sin compensación del deslizamiento. Este hecho sí se ha comprobado en simulación, donde para una prueba con un deslizamiento del 10 % se obtuvieron los siguientes resultados en el error lateral: MPC y LMI 0 [m], y el controlador sin compensación del deslizamiento 0.34 [m]. Para más detalles se puede consultar (González et al., 2014).

6. Lecciones aprendidas y líneas de investigación futuras

Cuando un robot móvil se mueve en un entorno exterior son varias las perturbaciones e inconvenientes que pueden llevar a

un comportamiento indeseado. Muchas de esas perturbaciones están relacionadas con la interacción con el terreno. Por ello, para conseguir un correcto funcionamiento se recomienda realizar un estudio meticuloso del sistema de locomoción para el robot móvil. En este sentido, la locomoción basada en orugas ofrece una solución muy adecuada para reducir el efecto del deslizamiento y la compactación del terreno. Es especialmente adecuado en terrenos poco compactos como puede ser arena o nieve. En este trabajo se ha demostrado que además de las bondades de la locomoción basada en orugas, este rendimiento se puede mejorar utilizando controladores con compensación del deslizamiento y técnicas de localización como la odometría visual.

Desde el punto de vista del modelado, sería interesante extender el modelo sencillo presentado en este artículo teniendo en cuenta otros fenómenos tales como la fuerza de tracción, la masa del robot, el coeficiente de fricción del terreno o la cohesión. Este hecho supondrá añadir nuevos sensores al robot móvil y nuevos algoritmos para identificar/clasificar el terreno sobre el que se mueve el robot. Notar que este paso no es sencillo si el robot se mueve en terrenos heterogéneos. En este caso, se está trabajando en el uso de descriptores del terreno basados en textones (*textons*) (Leung and Malik, 2001) y en algoritmos de aprendizaje (e.g. *Support Vector Machine*).

Desde el punto de vista de la localización del robot, se ha observado el adecuado rendimiento de la odometría visual en robots para entornos exteriores pero se han detectado algunas características como las sombras que pueden llegar a influir de forma significativa la posición estimada. A fin de solucionar este asunto se están analizando estrategias basadas en el filtro de Kalman para combinar los datos de varias fuentes de información, por ejemplo, láseres y cámaras multispectrales.

Las estrategias de control propuestas se basan en compensar el efecto del deslizamiento longitudinal puesto que el vehículo considerado se mueve a bajas velocidades. Este control se puede adaptar a vehículos que se muevan a mayores velocidades incluyendo también los efectos del deslizamiento lateral. Además, se recomienda no sólo tener en cuenta el deslizamiento para el cálculo de la acción de control sino otros factores propios del terreno como son la cohesión, densidad o la fricción. Estos parámetros se podrían calcular online (Iagnemma et al., 2004) o bien se puede sintonizar un algoritmo de aprendizaje para que determine dichas características dependiendo del terreno identificado a través de imágenes (Angelova et al., 2007; Helmick et al., 2009).

Finalmente, se recomienda añadir un cierto grado de reactividad a la arquitectura de control de navegación. En este sentido, se debería añadir una capa de seguridad que permitiera al robot esquivar obstáculos no incluidos en el mapa previo del entorno o una capa de teleoperación que permitiera recuperar el robot en caso de una situación peligrosa no planificada.

English Summary

Autonomous Tracked Robots. History, Modelling, Localization, and Motion Control

Abstract

One of the most significant research field in mobile robotics deals with robots operating in off-road conditions (planetary rovers, agriculture robots, search and rescue operations, military robots, etc.). However, obtaining a successful result is not an easy task. One primary point is the locomotion system. In this case, tracks constitute a well-known approach and since the beginning of the 20th century this locomotion system has demonstrated remarkable results in manned vehicles. This article motivates and shows through physical experiments the goodness of tracked mobile robots in off-road conditions. Firstly, a historical perspective of tracked vehicles and tracked robots is addressed. Then, the main modelling aspects are introduced, in particular, the slip phenomenon. After that, several localization techniques are discussed with especial mention to visual odometry. The motion control aspect is also of primal importance. In this regard, several slip-compensation control strategies are analysed. Finally, the authors' background obtained in this field is expounded.

Keywords:

Slip, Visual Odometry, Adaptive Control, Predictive Control.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto Controlcrop PIO-TEP-6174, financiado por la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía (España).

Referencias

- Angelova, A., Matthies, L., Helmick, D., Perona, P., 2007. Learning and Prediction of Slip from Visual Information. *Journal of Field Robotics* 24 (3), 205–231.
- Aström, K., Murray, R., 2008. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, USA.
- Bekker, M., 1956. *Theory of Land Locomotion. The Mechanics of Vehicle Mobility*, First Edition. Ann Arbor. The University of Michigan Press, USA.
- Benoit, O., Gotteland, P., Quibel, A., 2003. Prediction of Trafficability for Tracked Vehicle on Broken Soil: Real Size Tests. *Journal of Terramechanics* 40 (2), 135–160.
- Borenstein, J., May 1994. The CLAPPER: A Dual-drive Mobile Robot with Internal Correction of Dead-reckoning Errors. *IEEE Conference on Robotics and Automation*, IEEE, pp. 3085–3090, San Diego, USA.
- Brunelli, R., 2009. *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, USA.
- Camacho, E., Bordons, C., 2004. *Model Predictive Control*, Second Edition. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. Springer, Germany.
- Canudas, C., Siciliano, B., Bastin, G., 1997. *Theory of Robot Control*, Second Edition. *Communications and Control Engineering*. Springer, Germany.
- Cariou, C., Lenain, R., Thuilot, B., Berducat, M., 2009. Automatic Guidance of a Four-Wheel-Steering Mobile Robot for Accurate Field Operations. *Journal of Field Robotics* 26 (6–7), 504–518.
- Crolla, D., Schwanghart, H., 1992. Vehicle Dynamics - Steering I. *Journal of Terramechanics* 29 (1), 7–17.
- Endo, D., Okada, Y., Nagatani, K., Yoshida, K., October 2007. Path Following Control for Tracked Vehicles Based on Slip-Compensating Odometry. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, pp. 2871–2876, San Diego, USA.
- González, R., Fiacchini, M., Álamo, T., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., 2010. Adaptive Control for a Mobile Robot under Slip Conditions using an LMI-based Approach. *European Journal of Control* 16 (2), 144–155.

- González, R., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., 2014. Autonomous Tracked Robots in Planar Off-Road Conditions. Modelling, Localization and Motion Control. Series: Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Germany.
- González, R., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., Pradalier, C., Siegwart, R., 2012. Combined Visual Odometry and Visual Compass for Off-Road Mobile Robots Localization. *Robotica* 30 (6), 865–878.
- Gracia, L., Tornero, J., 2007. Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots with Slip. *Advanced Robotics* 21 (11), 1253–1279.
- Helmick, D., Angelova, A., Matthies, L., 2009. Terrain Adaptive Navigation for Planetary Rovers. *Journal of Field Robotics* 26 (4), 391–410.
- Helmick, D., Roumeliotis, S., Cheng, Y., Clouse, D., Bajracharya, M., Matthies, L., 2006. Slip-compensated Path Following for Planetary Exploration Rovers. *Advanced Robotics* 20 (11), 1257–1280.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., 2001. Global Positioning System: Theory and Practice, Fifth Edition. Springer, Germany.
- Hohl, G. H., 2007. Military Terrain Vehicles. *Journal of Terramechanics* 44, 23–34.
- Hornback, P., 1998. The Wheel versus Track Dilemma. *Armor Magazine* 107 (2), 33–34.
- Iagnemma, K., Dubowsky, S., September 2000. Mobile Robot Rough-Terrain Control (RTC) for Planetary Exploration. ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference, ASME, pp. 10–13, Baltimore, USA.
- Iagnemma, K., Dubowsky, S., 2004. Mobile Robots in Rough Terrain. Estimation, Motion Planning, and Control with Application to Planetary Rovers. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer, Germany.
- Iagnemma, K., Kang, S., Shibly, H., Dubowsky, S., 2004. Online Terrain Parameter Estimation for Wheeled Mobile Robots with Application to Planetary Rovers. *IEEE Transactions on Robotics* 20 (5), 921–927.
- Iagnemma, K., Ward, C. C., 2009. Classification-based Wheel Slip Detection and Detector Fusion for Mobile Robots on Outdoor Terrain. *Autonomous Robots* 26 (1), 33–46.
- Ishigami, G., Nagatani, K., Yoshida, K., 2009. Slope Traversal Controls for Planetary Exploration Rover on Sandy Terrain. *Journal of Field Robotics* 26 (3), 264–286.
- Johnson, A. E., Goldberg, S. B., Yang, C., Matthies, L. H., May 2008. Robust and Efficient Stereo Feature Tracking for Visual Odometry. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 39–46, Pasadena, USA.
- Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F., Noguchi, T., 1990. A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 384–389, Cincinnati, USA.
- Klancar, G., Skrjanc, I., 2007. Tracking-error Model-based Predictive Control for Mobile Robots in Real Time. *Robotics and Autonomous Systems* 55 (1), 460–469.
- Korlath, G., 2007. Mobility Analysis of Off-Road Vehicles: Benefits for Development, Procurement and Operation. *Journal of Terramechanics* 44 (5), 383–393.
- Krebs, A., Thuerer, T., Carrasco, E., Siegwart, R., February 2008. Towards Torque Control of the CRAB Rover. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Los Angeles, USA.
- Labrosse, F., 2006. The Visual Compass: Performance and Limitations of an Appearance-Based Method. *Journal of Field Robotics* 23 (10), 913–941.
- Le, A., 1999. Modelling and Control of Tracked Vehicles. PhD Thesis, University of Sydney, Sydney, Australia.
- Lenain, R., Thuilot, B., Cariou, C., Martinet, P., 2007. Adaptive and Predictive Path Tracking Control for Off-road Mobile Robots. *European Journal of Control* 13 (4), 419–439.
- Leung, T., Malik, J., 2001. Representing and Recognizing the Visual Appearance of Materials using Three-Dimensional Textons. *Int. Journal of Computer Vision* 43 (1), 29–44.
- Liu, Y., Liu, G., 2009. Mobile Manipulation using Tracks of a Tracked Mobile Robot. In: IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 948–953.
- Low, C., Wang, D., 2008. GPS-based Path Following Control for a Car-like Wheeled Mobile Robot with Skidding and Slipping. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16 (2), 340–347.
- Martínez, J., Mandow, A., Morales, J., Pedraza, S., García-Cerezo, A., 2005. Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research* 24 (10), 867–878.
- Matthies, L., Maimone, M., Johnson, A., Cheng, Y., Willson, R., Villalpando, C., Goldberg, S., Huertas, A., March 2007. Computer Vision on Mars. *International Journal of Computer Vision* 75 (1), 67–92.
- Mayne, D., Rawlings, J., Rao, C., Scokaert, P., 2000. Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality. *Automatica* 36 (6), 789–814.
- McNae, A., 2000. A History of Komatsu: Construction and Mining Equipment. Beenleigh, Qld.
- Montiel, J., Davison, A., May 2006. A Visual Compass based on SLAM. IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 1917–1922, Orlando, USA.
- Morales, J., Martínez, J., Mandow, A., García-Cerezo, A., Pedraza, S., 2009. Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain. *IEEE Transactions on Robotics* 25 (5), 1098–1108.
- Mourikis, A., Trawny, N., Roumeliotis, S., Helmick, D., Matthies, L., 2007. Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles. *International Journal of Robotics Research* 26 (7), 737–758.
- Nourani-Vatani, N., Roberts, J., Srinivasan, M., May 2009. Practical Visual Odometry for Car-like Vehicles. IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 3551–3557, Kobe, Japan.
- Olson, C., Matthies, L., Schoppers, M., Maimone, M., 2003. Rover Navigation using Stereo Ego-motion. *Robotics and Autonomous Systems* 43 (4), 215–229.
- Oriolo, G., De Luca, A., Vendittelli, M., November 2002. WMR Control Via Dynamic Feedback Linearization: Design, Implementation, and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 10 (6), 835–852.
- Ray, L. E., 2009. Estimation of Terrain Forces and Parameters for Rigid-Wheeled Vehicles. *IEEE Transactions on Robotics* 25 (3), 717–726.
- Rubinstein, D., Coppock, J., 2007. A Detailed Single-link Track Model for Multi-Body Dynamic Simulation of Crawlers. *Journal of Terramechanics* 44 (5), 355–364.
- Sánchez-Hermosilla, J., Rodríguez, F., González, R., Guzmán, J., Berenguel, M., 2010. A Mechatronic Description of an Autonomous Mobile Robot for Agricultural Tasks in Greenhouses. In: Barrera, A. (Ed.), *Mobile Robots Navigation*. InTech, pp. 583–608.
- Shoval, S., 2004. Stability of a Multi Tracked Robot Traveling over Steep Slopes. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Vol. 5. IEEE, pp. 4701–4706.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I., 2004. Introduction to Autonomous Mobile Robots, First Edition. A Bradford book. The MIT Press, USA.
- Wan, J., Vehi, J., Luo, N., 2009. A Numerical Approach to Design Control Invariant Sets for Constrained Nonlinear Discrete-time Systems with Guaranteed Optimality. *Journal of Global Optimization* 44 (3), 395–407.
- Wang, D., Low, C., 2008. Modeling and Analysis of Skidding and Slipping in Wheeled Mobile Robots: Control Design Perspective. *IEEE Transactions on Robotics* 24 (3), 676–687.
- Wong, J., 1984. An Introduction to Terramechanics. *Journal of Terramechanics* 21 (1), 5–17.
- Wong, J., 2001. Theory of Ground Vehicles, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Wong, J., Huang, W., 2006. Wheels vs. Tracks – A Fundamental Evaluation From the Traction Perspective. *Journal of Terramechanics* 43 (1), 27–42.
- Yi, J., Song, D., Zhang, J., Goodwin, Z., April 2007. Adaptive Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robots. International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 2605–2610, Rome, Italy.
- Yi, J., Wang, H., Zhang, J., Song, D., Jayasuriya, S., Liu, J., 2009. Kinematic Modeling and Analysis of Skid-Steered Mobile Robots With Applications to Low-Cost Inertial-Measurement-Unit Based Motion Estimation. *IEEE Transactions on Robotics* 25 (5), 1087–1097.
- Zi-rong, L., Jian-zhong, S., Zhi-xiong, Z., 2013. A Reconfigurable Tracked Mobile Robot based on Four-linkage Mechanism. *Journal of Central South University* 20 (1), 62–70.