

Control Cinemático de Vehículos Autoguiados Utilizando un Sistema por Visión

Luis Gracia Calandín

Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera CP46022, luigraca@doctor.upv.es

Josep Tornero i Monserrat

Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera CP46022, jtornero@isa.upv.es

Resumen

El presente artículo aborda el control cinemático de un vehículo autoguiado tipo coche para el seguimiento de una referencia. Además, analiza el posicionamiento del vehículo a través de un sistema de visión. Finalmente se concreta dicho control, con el posicionamiento por visión obtenido, para el seguimiento de una línea.

Palabras Clave: Control Cinemático, Vehículos Autoguiados, Sistema de Visión.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el interés por aumentar el grado de automatización (con los beneficios que ello reporta) de todo tipo de procesos. Uno de los niveles superiores en la automatización es la conducción de vehículos. Con lo cual quedan justificados todos los esfuerzos realizados en la línea de automatizar el guiado de vehículos.

Para realizar dicho autoguiado hay que implementar una realimentación y un control.

En nuestro caso el control será cinemático, puesto que para velocidades bajas (suposición razonable en vehículos autoguiados) la influencia de la dinámica es pequeña.

En la sección 1 del apartado 2 se analizan las distintas posibilidades que tenemos para implementar el control cinemático, decantándonos por una de ellas. En la sección 2 se desarrolla la técnica de control elegida.

Para obtener la “postura” (posición + orientación) del vehículo, y poder realimentarla, hay que utilizar algún sistema de posicionamiento.

En la sección 1 del apartado 3 se analizan distintas posibilidades para el posicionamiento del vehículo, decantándonos por una. En la sección 2 se desarrolla la técnica de posicionamiento elegida.

Finalmente, en el apartado 4, conectamos el control cinemático y la realimentación diseñados para el caso concreto de seguimiento de una línea.

2 CONTROL CINEMÁTICO

2.1 POSIBILIDADES PARA EL CONTROL CINEMÁTICO

2.1.1 Basado en curvas paramétricas

Podemos utilizar curvas paramétricas suaves, que cumplan las restricciones del vehículo, que conecten asintóticamente la posición actual del vehículo con la referencia a seguir. Para alcanzar la referencia basta con seguir la curva paramétrica.

Este sistema de control tiene como principal inconveniente que es un control en bucle abierto, con lo que los pequeños errores de modelado, actuación y sensorización hacen que se vaya acumulando un error en el seguimiento de la curva paramétrica. Para evitar esto lo que se puede hacer es recalcular cada cierto tiempo la curva paramétrica a seguir.

2.1.2 Basado en aproximación lineal

Otra posibilidad es trabajar con el modelo cinemático aproximado lineal entorno a un punto de funcionamiento. Esta es la forma clásica de proceder en el control monovariable. Incluso se puede discretizar el sistema aproximado lineal, de forma que hagamos un control discreto. Esta última es la forma clásica de proceder en el control multivariable.

El inconveniente de realizar la aproximación lineal del modelo original es que, del control diseñado a medida que nos alejamos del punto de funcionamiento no es bueno, pudiendo incluso ser inestable. De hecho en el control cinemático de vehículos no se suele utilizar la aproximación lineal porque es válida en un rango muy pequeño entorno al punto de funcionamiento.

2.1.3 Basado en estabilidad de control no lineal

En el caso de que utilicemos el modelo cinemático original no lineal del vehículo (bien sea en su forma continua o discreta) lo difícil es encontrar la acción de control no lineal (función de las magnitudes de error) que garantice la estabilidad del sistema.

Por ejemplo en [4] se hace un control discreto adaptativo ajustando unos parámetros del algoritmo de control experimentalmente para que sea estable.

Una forma de garantizar la estabilidad es encontrar una función de Lyapunov que, para el algoritmo de control diseñado, cumpla el teorema de estabilidad de Lyapunov. Por ejemplo en [5] se realiza un control continuo para el que existe una función de Lyapunov que garantiza dicha estabilidad.

2.1.4 Basado en linealización por realimentación del estado

Otra posibilidad consiste en hacer una linealización (exacta) por realimentación del estado del modelo cinemático no lineal del vehículo (bien sea en su forma continua o discreta), de forma que podamos aplicar posteriormente un control lineal basado en las técnicas clásicas de control.

El inconveniente de este método radica en que existan condiciones singulares que invaliden la linealización. No obstante, en el caso de que dicha singularidad no exista, o no la alcancemos nunca, este método de control es muy adecuado. Por lo tanto nosotros intentaremos realizar este tipo de control.

2.2 CONTROL CINEMÁTICO BASADO EN LINEALIZACIÓN POR REALIMENTACIÓN DEL ESTADO

2.2.1 Modelo cinemático del vehículo tipo coche

En la Figura 1 se muestra un vehículo tipo coche* genérico:

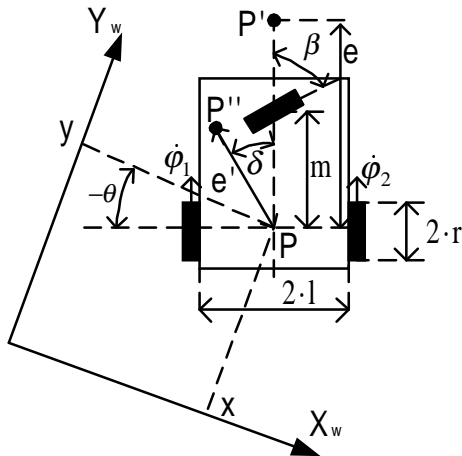


Figura 1: Vehículo tipo coche*

*Nota: En el esquema del vehículo se ha puesto la rueda orientable equivalente a las dos orientables, puesto que ambas están ligadas por el mecanismo de dirección de Ackerman.

El significado de las variables y parámetros de la Figura 1 es el siguiente:

(X_w, Y_w) : Sistema de coordenadas del suelo. P : Punto medio del eje de las ruedas fijas del vehículo. (x, y) : Posición del punto P respecto al sistema de coordenadas del suelo. (\dot{x}, \dot{y}) : Velocidad del punto P respecto al sistema de coordenadas del suelo. P' : Punto sobre el que queremos que haga el seguimiento, a una distancia e de P . P'' : Punto genérico del vehículo caracterizado por δ y e' . r : Radio de las ruedas fijas. $2 \cdot l$: Separación entre las ruedas fijas. m : Separación entre el punto P y el centro de la rueda orientable equivalente. θ : Ángulo de giro entre el vehículo y el sistema de coordenadas. $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3$: Velocidades de rotación de las ruedas fijas y orientable. β : Ángulo de la rueda orientable.

El modelo cinemático del vehículo tipo coche de la Figura 1 depende de que ruedas accionemos.

2.2.1.1 Modelo cinemático con tracción en las ruedas fijas (modelo diferencial)

En este caso, teniendo en cuenta [3], el modelo cinemático es:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \frac{r}{2 \cdot l} \cdot \begin{pmatrix} l \cdot \sin(\theta) & l \cdot \sin(\theta) \\ l \cdot \cos(\theta) & l \cdot \cos(\theta) \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\dot{X} = B(X) \cdot u$$

con

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left(\frac{(m/l) \cdot (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}\right) \\ \dot{\phi}_3 = \frac{m}{2 \cdot l} \cdot \frac{(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{\sin(\beta)} \end{cases} \quad (2)$$

para que no deslice la rueda orientable equivalente.

El valor de $\dot{\phi}_3$ puede auto ajustarse sin deslizamiento (siguiendo el movimiento) sin necesidad de accionar la rueda orientable, si el rozamiento para ello es suficiente.

La orientación β no puede auto ajustarse sin deslizamiento, por lo que hay que accionarla a través de su dinámica (velocidad en el caso cinemático).

Por lo tanto, en este caso accionamos $\dot{\phi}_1$ y $\dot{\phi}_2$, y $\dot{\beta}$ para no deslizamiento.

2.2.1.2 Modelo cinemático con tracción en la rueda orientable (modelo triciclo)

En este caso, teniendo en cuenta [3], el modelo cinemático es:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \frac{r}{m} \cdot \begin{pmatrix} m \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\beta) \\ m \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\beta) \\ \sin(\beta) \end{pmatrix} \cdot (\dot{\phi}_3) \quad (3)$$

$$\dot{X} = B \cdot \left(X, \int u' \right) \cdot u'$$

con

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \left(\cos(\beta) + \frac{l}{m} \cdot \sin(\beta) \right) \cdot \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_2 = \left(\cos(\beta) - \frac{l}{m} \cdot \sin(\beta) \right) \cdot \dot{\phi}_3 \end{cases} \quad (4)$$

para que no deslicen las ruedas fijas.

Los valores de $\dot{\phi}_1$ y $\dot{\phi}_2$ pueden auto ajustarse sin deslizamiento (siguiendo el movimiento) sin necesidad de accionar las ruedas fijas, si el rozamiento es suficiente para ello.

Por lo tanto, en este caso accionamos $\dot{\phi}_3$ y $\dot{\beta}$.

2.2.1.3 Modelo cinemático a efectos prácticos

De las dos subsecciones anteriores llegamos a la conclusión de que hemos de accionar $\dot{\beta}$ y, o bien $\dot{\phi}_1$ y $\dot{\phi}_2$, o bien $\dot{\phi}_3$. Dado que $\dot{\phi}_1$ y $\dot{\phi}_2$ están relacionados con $\dot{\phi}_3$ a través de (2) (ó (4)), a efectos prácticos da igual trabajar con (1) o con (3) y luego obtener la velocidad de rotación de las ruedas que realmente accionemos.

En nuestro caso trabajaremos con la expresión (1) puesto que las dos entradas al modelo están separadas de la matriz B (obsérvese (1b) y (3b)), lo cual simplifica la linealización por realimentación del estado.

No obstante, al implementar el control, debemos actuar sobre $\dot{\beta}$ de forma adecuada (utilizando (2a)) para que no haya deslizamiento. Además, en el caso de que la tracción sea con la rueda orientable utilizamos (2b) para obtener la velocidad de rotación de dicha rueda.

2.2.2 Linealización para un vehículo tipo coche

Tal y como se demuestra en [1], el máximo número de estados que podemos linealizar con realimentación estática del estado es el número de entradas u . Mientras que con una realimentación dinámica podemos linealizar completamente el estado.

Al tener en (1) dos entradas, el número de estados que podemos linealizar con realimentación estática es de dos. Con lo que en el posterior control podríamos asignar la dinámica a dos variables de estado.

Si consideramos que la referencia a seguir es una posición, entonces es suficiente con actuar sobre dos variables de estado, que serían la posición del punto (P'') que queremos que haga el seguimiento de la referencia. No obstante la orientación no queda totalmente descuidada, porque, si por ejemplo la referencia es una línea, el vehículo acaba siguiendo la línea con la orientación de la misma.

Por lo tanto, en nuestro caso es suficiente aplicar una realimentación estática para linealizar parte del estado (P'') y aplicar luego una dinámica para seguir la referencia tipo posición.

A continuación desarrollamos la linealización por realimentación estática del estado en un sistema el modelo de la forma (1).

Realizamos la transformación " $z_1 = h(X)$ " donde z_1 es de la misma dimensión que y y son los estados que vamos a linealizar. Para completar la transformación se hace " $z_2 = k(X)$ " eligiendo k para que toda la transformación sea un difeomorfismo (todos los estados independientes).

Una transformación $h(X)$, que pasa de la postura (estado) del vehículo a un punto genérico P'' que se mueve con el vehículo, es:

$$z_1 = \begin{pmatrix} P''_x \\ P''_y \end{pmatrix} = h(x) = \begin{pmatrix} x + e^l \cdot \sin(\theta - \delta) \\ y + e^l \cdot \cos(\theta - \delta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Mientras que " $z_2 = \theta$ " completa la transformación de forma que el nuevo espacio de estados (Z) es un difeomorfismo.

La dinámica del nuevo espacio de estados es:

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{h}(X) \cdot B(X) \\ \dot{k}(X) \cdot B(X) \end{pmatrix} \cdot u \\ \dot{Z} &= \begin{pmatrix} \dot{\tilde{h}}(X) \\ \dot{\tilde{k}}(X) \end{pmatrix} \cdot u = \begin{pmatrix} \dot{\tilde{h}}(Z) \\ \dot{\tilde{k}}(Z) \end{pmatrix} \cdot u \end{aligned} \quad (6)$$

Asignando una acción de control de la forma:

$$u = \dot{\tilde{h}}(X)^{-1} \cdot w \quad (7)$$

conseguimos linealizar z_1 .

Para asignar la dinámica utilizamos w . Así pues de forma genérica:

$$w = \dot{z}_{1ref} - A \cdot (z_1 - z_{1ref}) \quad (8)$$

Sustituyendo (7) y (8) en (6) resulta:

$$\left(\dot{z}_1 - \dot{z}_{1ref}\right) + A \cdot (z_1 - z_{1ref}) = \dot{z}_1 + A \cdot \tilde{z}_1 = 0 \quad (9)$$

siendo \tilde{z}_1 el error entre la referencia y la posición actual de P'' , que como se aprecia tiende a cero con la dinámica marcada por A .

Para que el sistema sea estable, además de lo anterior, se ha de cumplir que el resto de estados no linealizados (z_2) estén acotados. Esto se cumple, tal y como se demuestra en [1], siempre que la referencia a seguir y su primera derivada sean suaves y acotadas.

Las condiciones de singularidad en la linealización vienen dadas por la matriz $\tilde{h}(X)$. En el caso de la transformación genérica $h(X)$ indicada en (5), la matriz $\tilde{h}(X)$ y su determinante resultan:

$$\tilde{h}(X) = \frac{r}{2 \cdot l} \cdot \begin{pmatrix} e' \cdot \cos(\theta - \delta) + l \cdot \sin(\theta) \\ -e' \cdot \sin(\theta - \delta) + l \cdot \cos(\theta) \\ -e' \cdot \cos(\theta - \delta) + l \cdot \sin(\theta) \\ e' \cdot \sin(\theta - \delta) + l \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\left| \tilde{h}(X) \right| = r \cdot e' \cdot \cos(\delta)$$

Por lo que $\tilde{h}(X)$ es singular para “ $e' = 0$ ” ó “ $\delta = \pm\pi/2$ ”. Lo que quiere decir que no podemos realizar la linealización y posterior control cinemático de seguimiento para puntos que se encuentren sobre el eje de las ruedas fijas.

En nuestro caso el punto de interés P' , que queremos que haga el seguimiento, va delante de la rueda orientable ($\delta = 0$, $e' = e \neq 0$). Esta ubicación es habitual, por ejemplo, en vehículos autoguiados agrícolas.

Por lo tanto, podemos hacer el control cinemático por linealización parcial del estado P' a través de una realimentación estática. Resultando el control cinemático:

$$u = \tilde{h}^{-1}(X) \cdot w$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{r \cdot e} \cdot \begin{pmatrix} e' \cdot \sin(\theta) + l \cdot \cos(\theta) \\ e' \cdot \sin(\theta) - l \cdot \cos(\theta) \\ -l \cdot \sin(\theta) + e \cdot \cos(\theta) \\ l \cdot \sin(\theta) + e \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{P}'_x - \dot{P}'_{x-ref} \\ \dot{P}'_y - \dot{P}'_{y-ref} \end{pmatrix} - \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (x + e \cdot \sin(\theta)) - P'_{x-ref} \\ (y + e \cdot \cos(\theta)) - P'_{y-ref} \end{pmatrix}$$

donde a_1 y a_2 son los polos que asignamos como dinámica al error de P'_x y P'_y respectivamente.

2.2.3 Resultados del control cinemático diseñado

A continuación presentamos dos ejemplos, del control cinemático expuesto, en un entorno de simulación. Para los dos se ha tomado $r = 0.2$ metros, $e = 2$ metros, $l = 0.8$ metros, $a_1 = a_2 = 2$ segundos⁻¹. Además, en el primer ejemplo se ha tomado $m = 4$ metros, $x_0 = 0$, $y_0 = 4$ metros, $\theta_0 = 180^\circ$, y en el segundo $m = 2$ metros, $x_0 = y_0 = \theta_0 = 0$.

En el primer ejemplo la referencia consiste en un giro inicial de 180° y una línea posterior. Se observa (ver Figura 2) que en este caso el control cinemático diseñado funciona (P' sigue la referencia), siguiendo el error (ver Figura 3) la dinámica asignada: exponencial de constante de tiempo 2 segundos.

También se observa (ver Figura 3) que la evolución de la orientación β de la rueda orientable, para que ésta no deslice, es continua. Por lo que existe un valor para el accionamiento de β (aunque cambia de forma instantánea en los puntos (Ej. $t \cong 6.5$ s) de β no diferenciables) y por lo tanto la rueda orientable no supone ningún problema. No obstante, inicialmente hay que dotarla del ángulo que corresponda.

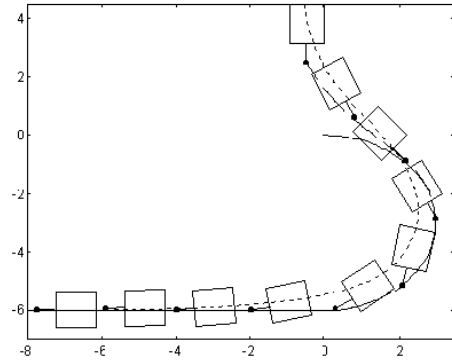


Figura 2: Recorrido de $P'_{ref}(-)$, $P(-)$ y $P'(--)$ en el ejemplo 1 de control cinemático

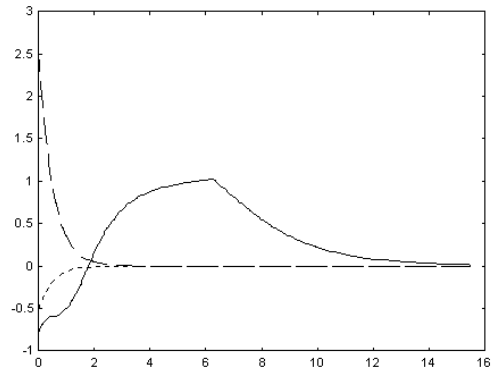


Figura 3: Evolución de $\beta(-)$, $P'_x-error(-)$ y $P'_y-error(--)$ en el ejemplo 1 de control cinemático

En el segundo ejemplo la referencia posee un punto abrupto (referencia no suave). Se observa (ver Figura 4) que en este caso el control cinemático diseñado también funciona (P' sigue la referencia) con la dinámica asignada. No obstante, al pasar por el punto abrupto surge (ver Figura 5) un pequeño error en el seguimiento.

También se observa (ver Figura 5) que la orientación de la rueda orientable sufre discontinuidades en el punto abrupto de la referencia y en el punto en que se produce una *maniobra* (cambio del sentido de la marcha). Para que esto no suponga deslizamiento habría que detener la marcha y reorientarla.

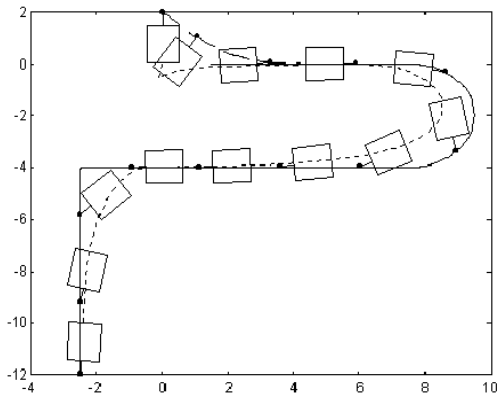


Figura 4: Recorrido de $P'_{ref}(-)$, $P(-)$ y $P'(-)$ en el ejemplo 2 de control cinemático

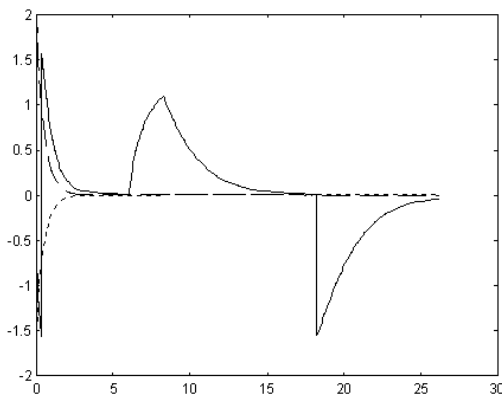


Figura 5: Evolución de $\beta(-)$, $P'_x\text{-error}(-)$ y $P'_y\text{-error}(-)$ en el ejemplo 2 de control cinemático

Del hecho de que puedan producirse maniobras, se desprende que el control diseñado no distingue entre seguir la referencia con el vehículo de cara o de espaldas. Para evitar ir de espaldas el vehículo debe estar ligeramente orientado hacia la referencia, o simplemente tener un trayecto de referencia previo que encare el vehículo con la referencia original.

3 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DEL VEHÍCULO

3.1 POSIBILIDADES PARA EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

3.1.1 Basado en distancias a puntos de referencia

En este caso utilizaríamos las distancias a puntos de referencia conocidos para obtener la posición (local o global) del vehículo. Además el vehículo debe incorporar un “sistema brújula” que le permita conocer su orientación (local o global) respecto a una referencia, tipo dirección, fija.

Un sistema muy utilizado para obtener la posición (global) del vehículo es el GPS ([6], [7]), aunque existen otras alternativas para posicionar (localmente) el vehículo utilizando, por ejemplo, sensores de ultrasonidos, marcas en el suelo, sensores magnéticos, etc.

Este sistema de posicionamiento tiene como inconvenientes: a) hay que tener almacenada previamente las características del espacio de movimientos del vehículo, b) para tener un buen conocimiento de éste, hay que obtener y almacenar mucha información, con los problemas que ello conlleva, c) es poco robusto ante cambios sensibles en las características de dicho espacio.

3.1.2 Basado en análisis de imagen

Consiste en utilizar sistemas, incorporados al vehículo, de visión por cámara (CCD por ejemplo) para caracterizar, a través de técnicas de tratamiento de imágenes, el entorno visualizado (líneas, curvas, etc.) que se utilizará como referencia. Posteriormente hay que realizar un análisis a través del modelo de cámara para posicionar el vehículo respecto a su entorno.

Este sistema de posicionamiento tiene como inconvenientes: a) el tratamiento de imágenes puede ser un proceso lento, b) el posicionamiento que se obtiene es respecto al entorno visualizado (local).

No obstante, presenta la ventaja, respecto a la técnica anterior, de no depender (hasta cierto punto) de las características del espacio de movimientos del vehículo. En nuestro caso esta ventaja es definitiva para decantarnos por esta opción, puesto que nos permite trabajar en un abanico más amplio de entornos utilizando el mismo sistema de posicionamiento.

3.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO POR VISIÓN

3.2.1 Tratamiento de la imagen

En primer lugar realizamos un tratamiento de la imagen, extraída por el sistema de visión, para obtener las líneas, curvas, objetos, etc. del entorno que utilizamos como referencias.

Utilizamos las siguientes técnicas tradicionales del análisis de imagen:

- 1º Filtrado de la imagen, función del color buscado.
- 2º Hacemos contraste máximo, 'blanco' o 'negro', en la imagen.
- 3º Hacemos un clustering (agrupación) de los pixels con valor 'negro'. En función de lo que estemos identificando utilizaremos puntos, rectas, curvas, etc. para el clustering. Esta fase es la más lenta del sistema de posicionamiento, por lo que interesa conseguir un buen sistema de clustering.

Cuanto mayor conocimiento tengamos de las referencias que buscamos más sencilla es la identificación.

Por ejemplo, en el caso conducir el vehículo por una vía tipo carretera, las referencias a identificar son las marcas longitudinales de ambos lados del carril. Por lo que en la identificación hay que buscar curvas (en el caso general) con el color característico de las marcas longitudinales de la calzada.

En el caso de conducir un vehículo agrícola por un campo de cultivo, las referencias a identificar son las líneas de cultivo. Por lo cual en la identificación hay que buscar rectas con el color característico del cultivo.

3.2.2 Cálculo de la posición por modelo de cámara

A continuación presentamos el modelo de cámara, descrito en [2].

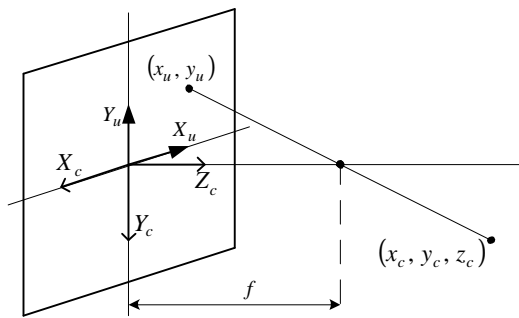


Figura 6: Modelo básico de formación de imagen en cámara

El significado de variables de la Figura 6 es:

(X_c, Y_c, Z_c) : Sistema de coordenadas de la cámara. (x_c, y_c, z_c) : Posición de un punto respecto al sistema de coordenadas de la cámara. (X_u, Y_u) : Sistema de coordenadas del plano imagen. (x_u, y_u) posición en el plano imagen correspondiente al punto (x_c, y_c, z_c) . f : distancia focal efectiva de la cámara.

Teniendo en cuenta el modelo básico de formación de imágenes de la Figura 6, se obtiene:

$$x_u = \frac{f}{z} \cdot x_c \quad y_u = \frac{f}{z} \cdot y_c \quad (12)$$

Relacionando la posición anterior en el plano imagen con sus correspondientes coordenadas en *pixels* (x_p, y_p) obtenemos:

$$x_u = (x_p - C_x) \cdot d_x \quad y_u = (y_p - C_y) \cdot d_y \quad (13)$$

donde (C_x, C_y) son la las coordenadas en *pixels* del centro del plano imagen y (d_x, d_y) es el tamaño (en cada dirección) de los elementos sensores.

Por otra parte, teniendo en cuenta la Figura 7, la relación entre los sistemas de coordenadas del suelo y de la cámara es:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 & t_x \\ \sin(\psi) \cdot \cos(\phi) - \cos(\psi) \cdot \cos(\phi) & \sin(\phi) & t_y \\ \sin(\psi) \cdot \sin(\phi) - \cos(\psi) \cdot \sin(\phi) - \cos(\phi) & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

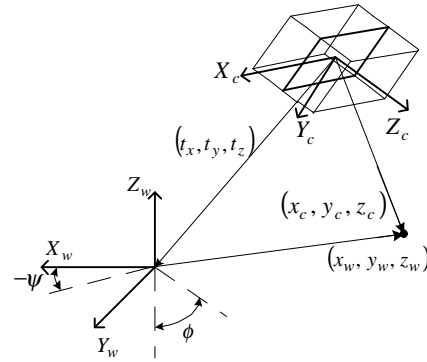


Figura 7: Relación entre los sistemas de coordenadas de la cámara y del suelo

El significado de nuevas variables de la Figura 7 es:

(X_w, Y_w, Z_w) : Sistema de coordenadas del suelo. (x_w, y_w, z_w) : Posición de un punto respecto al sistema de coordenadas del suelo. (t_x, t_y, t_z) : Vector de desplazamiento entre el sistema de coordenadas de la cámara y el del suelo. ϕ : ángulo (respecto a la vertical) que está inclinada la cámara (ángulo de cabeceo). ψ : Ángulo de giro entre el sistema de coordenadas de la cámara y el del suelo. *Nota: Obsérvese que hemos supuesto que la cámara no tiene ángulo de basculación respecto al suelo, cosa bastante habitual en la práctica.

Utilizando las ecuaciones (12), (13) y (14) calculamos la posición (t_x, t_y, t_z) y orientación (ϕ, ψ) de la cámara. Concretamente sustituyendo (x_c, y_c, z_c) de (14) en (12) obtenemos:

$$x_u = \frac{f \cdot (\cos(\psi) \cdot x_w + \sin(\psi) \cdot y_w + t_x)}{\sin(\phi) \cdot (\sin(\psi) \cdot x_w - \cos(\psi) \cdot y_w) - \cos(\phi) \cdot z_w + t_z} \quad (15)$$

$$y_u = \frac{f \cdot (\cos(\phi) \cdot (\sin(\psi) \cdot x_w - \cos(\psi) \cdot y_w) + \sin(\phi) \cdot z_w + t_y)}{\sin(\phi) \cdot (\sin(\psi) \cdot x_w - \cos(\psi) \cdot y_w) - \cos(\phi) \cdot z_w + t_z}$$

En general, en (15) tenemos 5 incógnitas ($t_x, t_y, t_z, \phi, \psi$), mientras que cada punto (x_{ui}, y_{ui}) de referencia de la imagen, cuyas coordenadas (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) conocemos, nos aporta 2 ecuaciones. Por lo tanto, necesitamos por lo menos 3 puntos de referencia conocidos para obtener el posicionamiento de la cámara (y en consecuencia el del vehículo).

En el caso de conocer alguna de las incógnitas ($t_x, t_y, t_z, \phi, \psi$) necesitaríamos dos puntos de referencia conocidos.

4 CASO DE SEGUIMIENTO DE UNA LÍNEA

4.1 Sistema de posicionamiento por visión para el seguimiento de una línea

Las Figuras 8 y 9 muestran las vistas de planta y perfil de la situación de la cámara y la línea a seguir.

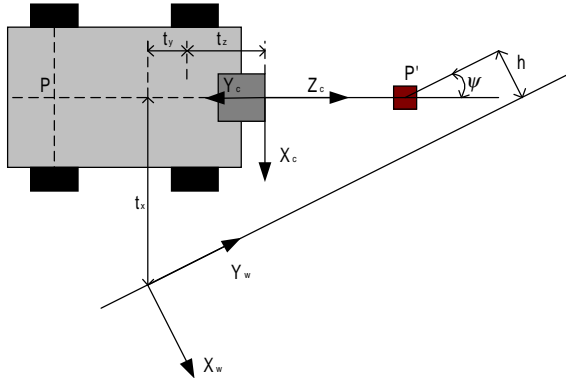


Figura 8: Vista de planta de la situación de la cámara respecto al sistema de coordenadas del suelo

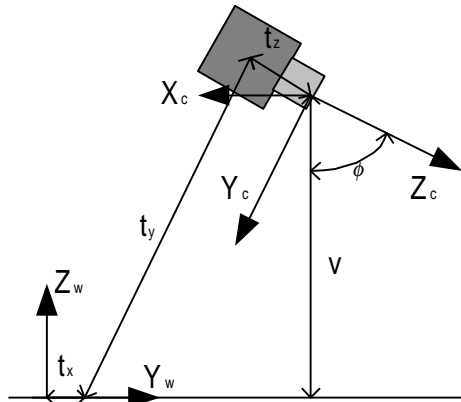


Figura 9: Vista de perfil de la situación de la cámara respecto al sistema de coordenadas del suelo

Las nuevas variables y parámetros que hemos introducido, respecto a la Figura 7, son:

v : altura (constante) a la que está situada el objetivo de la cámara respecto a la línea a seguir. P' : Punto sobre el que queremos que haga el seguimiento. h : separación entre el punto P' y la línea que deseamos que siga el vehículo. ϕ : ángulo de cabeceo constante.

Puesto que tenemos libertad para elegir el sistema de coordenadas del suelo lo hemos fijado con y_w sobre la línea a seguir. De lo anterior se desprende que todos los puntos de la línea (y otras que estuvieran a la misma altura del suelo) tienen:

$$z_w = 0 \quad (16)$$

De todos los orígenes posibles, sobre la línea de seguimiento, elegimos aquel que hace:

$$t_y = 0 \quad (17)$$

Concretamente éste origen se encuentra en el punto de corte de la línea a seguir con una línea paralela a X que pase por el punto de corte del eje Z con el plano $z_w = 0$. No obstante no va a ser necesario calcular dicho origen.

Puesto que v y ϕ son constantes, y supuestas conocidas, podemos calcular:

$$t_z = \frac{v}{\cos(\phi)} \quad (18)$$

Consideramos que los puntos de referencia que utilizamos están sobre la línea de seguimiento o paralela a ésta a una distancia $\pm d$. Esto se traduce en:

$$x_w = n \cdot d \quad \text{con } n = -1, 0, 1 \quad (19)$$

Por otro lado, no hay forma de conocer, a través de la imagen, la coordenada en y_w (globalmente) de los puntos de referencia de la imagen. Por lo tanto, despejándola de (15) y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se llega a:

$$\cos(\psi) \cdot (t_x \cdot (y_u \cdot \sin(\phi) - f \cdot \cos(\phi)) + v \cdot x_u) + \sin(\psi) \cdot y_u \cdot \frac{v}{\cos(\phi)} + n \cdot d \cdot (y_u \cdot \sin(\phi) - f \cdot \cos(\phi)) = 0 \quad (20)$$

En la ecuación (20) obtenemos los valores de (t_x, ψ) para dos puntos de referencia, de los que hay que conocer si están sobre la línea a seguir, a su derecha ó a su izquierda. En el caso de utilizar dos puntos de la misma línea ($n_1 = n_2 = n$) llegamos a la solución analítica:

$$\psi = -\arctan \left(\frac{1}{(y_{u1} - y_{u2})} \cdot \left(\frac{1}{(y_{u1} - y_{u2})} \cdot \cos(\phi) \cdot (x_{u1} - x_{u2}) + \frac{\sin(\phi)}{f} \cdot (y_{u1} \cdot x_{u2} - y_{u2} \cdot x_{u1}) \right) \right) \quad (21)$$

$$t_x = \frac{1}{f} \cdot \frac{v}{\cos(\phi)} \cdot \frac{(y_{u1} \cdot x_{u2} - y_{u2} \cdot x_{u1})}{(y_{u1} - y_{u2})} - \frac{n \cdot d}{\cos(\psi)}$$

Siendo h , a partir de (ψ, t_x):

$$h = \tan(\phi) \cdot (v - z_{p'} \cdot \cos(\phi)) \cdot \sin(\psi) + t_x \cdot \cos(\psi)$$

Con lo cual obtenemos el posicionamiento (ψ, h) a partir de las constantes $(r, v, \phi, z_{p'})$ y de dos puntos de la imagen para los que conocemos la línea en la que están.

En el posicionamiento anterior no conseguimos situar el vehículo respecto a la dirección longitudinal de la línea a seguir. Esta limitación viene por el hecho de que el sistema de visión no detecta a qué altura de una "línea" se encuentran un punto de referencia. No obstante, veremos en la sección siguiente una forma de resolver esta limitación.

4.2 Ejemplo de posicionamiento por visión para el seguimiento de una línea

Se ha aplicado la técnica de posicionamiento desarrollada en la sección anterior a una parcela de alcachofas, siendo la línea a seguir la intermedia entre dos líneas de cultivo.

Las características de la parcela de alcachofas son: separación entre líneas es de 1.1 m; distribución de cultivo separada (no detectable por análisis de la imagen) a lo largo de líneas. Los parámetros del sistema de visión utilizado son: $f = 4$ cm, $v = 1.6$ m, $d = 1.1/2$ m, $\phi = 81^\circ$, $z_{p'} = 0$.

En la Figura 10 se muestra la imagen obtenida por el sistema de visión, siendo la imagen original de (12.5x9.8) mm.



Figura 10: Dos líneas de cultivo de una parcela de alcachofas

En la Figura 11 se muestra el resultado obtenido al aplicar el tratamiento a la imagen de la Figura 10, para obtener las líneas de cultivo.

En la Figura 12 se observan los valores de posicionamiento obtenidos para cada una de las líneas de cultivo. Los puntos de referencia utilizados para cada una de las líneas son: a) $n_a = 1$, $P_{u1a} = (0.625, 4.9)$ mm, $P_{u2a} = (4.6, -4.9)$ mm, b) $n_b = -1$, $P_{u1b} = (-0.375, 4.9)$ mm, $P_{u2b} = (-3, -4.9)$ mm.



Figura 11: Imagen filtrada y contrastada

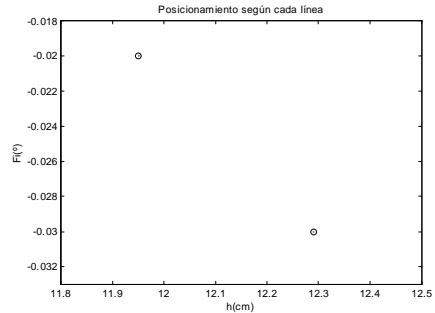


Figura 12: Posicionamiento obtenido para cada una de las líneas

Se puede apreciar que los dos posicionamientos obtenidos son muy semejantes, destacando la buena alineación de la imagen.

El posicionamiento que utilizaríamos como realimentación en el control podría ser una media de los dos posicionamientos obtenidos, pudiéndose incluso aplicar técnicas de filtrado, etc.

4.3 Control cinemático para el seguimiento de una línea utilizando posicionamiento por visión

El posicionamiento (ψ, h) obtenido en las secciones anteriores, tiene la siguiente relación directa con la postura (estado) del vehículo:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(e \cdot \sin(\psi) + h) \\ \text{Indeterminado} \\ \psi \end{pmatrix} \quad (22)$$

Por lo tanto x y θ son directamente observables con (ψ, h) , mientras que y no lo es. Además, (1) se puede escribir como:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = g(\theta) \cdot u \quad (23)$$

Por lo que, indirectamente tampoco podemos observar y , ya que no influye sobre x ó θ .

En realidad, según (23), la única variable que podríamos observar indirectamente es θ , aunque en nuestro caso no es necesario.

Por otro lado, la acción de control de (11) se puede expresar como:

$$u = \tilde{h}^{-1}(X) \cdot w = \tilde{h}^{-1}(\theta) \cdot \left(\dot{P}'_{ref} - A \cdot \begin{pmatrix} P'_x(\theta, x) - P'_{x-ref} \\ P'_x(\theta, y) - P'_{y-ref} \end{pmatrix} \right) \quad (24)$$

En (24) se puede apreciar que la linealización por realimentación sólo depende de θ , mientras que la asignación de dinámica w utiliza (en general) x, y, θ . Por lo tanto, atendiendo a (22) y (23) podemos realizar la linealización por realimentación del estado, pero no asignar una dinámica en su forma general.

Puesto que no disponemos información de la posición en el eje Y_w (por la propia limitación de la homogeneidad de la línea en esa dirección) prescindimos de hacer un control de posición en esa dirección para hacer un control de velocidad.

Por lo tanto, particularizamos la acción de control de (24) en:

$$u = \tilde{h}^{-1}(\theta) \cdot \left(\dot{P}'_{ref} - \begin{pmatrix} a_x \cdot (P'_x(\theta, x) - P'_{x-ref}) \\ 0 \end{pmatrix} \right) \quad (25)$$

Con lo que la acción de control queda:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{r \cdot e} \cdot \begin{pmatrix} e \cdot \sin(\theta) + l \cdot \cos(\theta) \\ e \cdot \sin(\theta) - l \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{P}'_{x-ref} \\ \dot{P}'_{y-ref} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_x \cdot ((x + e \cdot \sin(\theta)) - P'_{x-ref}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

El control cinemático que realizamos equivale a hacer el seguimiento de una línea (respecto a la que nos posicionamos con el sistema de visión) con una velocidad dada.

4.4 Ejemplo de control cinemático para el seguimiento de una línea con posicionamiento por visión

A continuación mostramos un ejemplo, del control cinemático de la sección anterior, en un entorno de simulación.

Se ha tomado $r = 0.2$ metros, $e = 2$ metros, $l = 0.8$ metros, $a_x = 2$ segundos⁻¹, $m = 2$ metros, $x_0 = y_0 = \theta_0 = 0$.

Se observa (ver Figura 13) que el control cinemático diseñado funciona (P' sigue la referencia), siguiendo el error de la coordenada x (ver Figura 14) la dinámica asignada: exponencial de constante de tiempo 2 segundos.

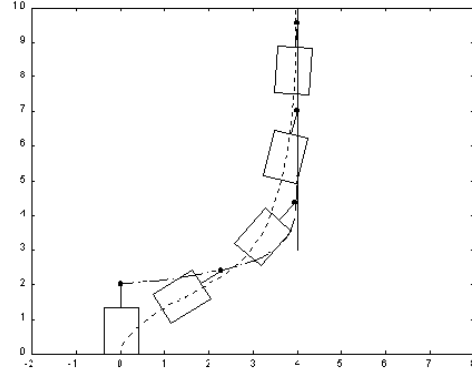


Figura 13: Recorrido de $P'_{ref}(-)$, $P(-)$ y $P'(--)$ en el ejemplo de control cinemático para seguir una línea

También se observa (ver Figura 14) que la evolución de la orientación β de la rueda orientable, para que ésta no deslice, es continua. Por lo que existe un valor para el accionamiento de $\dot{\beta}$ (que además cambia de forma continua) y por lo tanto la rueda orientable no supone ningún problema. No obstante, inicialmente hay que dotarla del ángulo que corresponda.

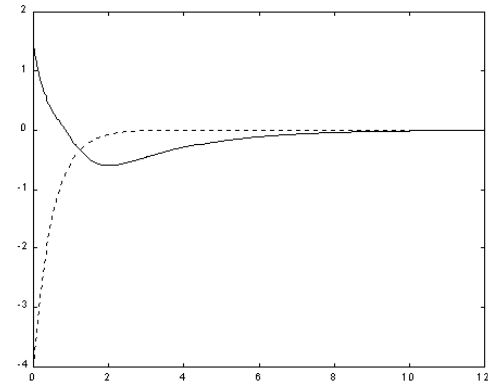


Figura 14: Evolución de $\beta(-)$ y $P'_{x-error}(-)$ en el ejemplo de control cinemático para seguir una línea

Por lo tanto, el hecho de realizar un control de velocidad, y no de posición, sobre la coordenada y y no supone limitación para seguir la línea con una velocidad dada.

5 CONCLUSIONES

A continuación describimos las aportaciones más significativas del trabajo expuesto.

El análisis del modelo cinemático a utilizar a nivel práctico tiene gran relevancia, puesto que permite emplear conceptualmente el modelo diferencial, lo que deriva en un control cinemático más sencillo. Además, a través de dos ejemplos, se detallan consideraciones especiales de la orientación de la rueda orientable para que el modelo anterior tenga validez.

Por otra parte, la expresión (21) (del posicionamiento por visión respecto a una línea) es original y analítica, no utilizando aproximaciones ni cálculo numérico como hacen otros autores [8].

Además, la problemática de la homogeneidad en las líneas (utilizadas como referencia) obtenidas por el sistema de visión, se resuelve utilizando un control longitudinal por velocidad, lo deja entrever una realidad práctica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el gobierno español (Secretaría de Estado de Universidades, Investigación y Desarrollo) TAP1999-1080-C04-04 y (Plan Nacional de I+D) 1FD97-1136.

Referencias

- [1] d'Andréa-Novel B., et al., "Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization", *The Int. Jour. of Robotics Research*, Vol. 14 No. 6 December 1995, pp543-559.
- [2] Fu K. S., et al, "Robótica: Control, Detección, Visión e Inteligencia", Editorial Mc Graw Hill, pp324-335.
- [3] Gracia L., Tornero J., "Application of Kinematic Modeling Methods to Wheeled Mobile Robot", *Acts of 5° WSES Conference on Mathematics and Computers in Physics*, Crete (Athens) July 2001.
- [4] Inoue K., et al., "Estimation of Place Tractor and Adaptive Control Method of Autonomous Tractor using INS and GPS", *Acts of BioRobotics 97, Valencia (Spain)*, pp27-32.

- [5] Lyshevski S., Nazarov A. "Lateral Maneuvering of Ground Vehicles: Modeling and Control", *Proceedings of the American Control Conference*, June 2000.
- [6] Nagasaka Y., Taniwaki K., et al., "A study about an Automated Rice Transplanter with GPS and FOG", *ASAE paper 001066*, July 2000.
- [7] Rekow A., et al., "CDGPS based Identification of Farm Tractor steering effectiveness", *Standford U. 0-7803-4330-1/98 IEEE*.
- [8] Sanchez A., Marchant J., "Fast and Robust Method for Tracking Crop Rows using a Two Point Hough Transform", *Acts of BioRobotics 97, Valencia (Spain)*, pp33-38.