

Navegación de un Robot Móvil por Medio de Control Visual en Ambiente Estructurado

Ricardo Swain, Michel Devy y Stéphanie Jonquières

Laboratorio de Análisis y Arquitectura de Sistemas

LAAS-CNRS

7, Avenue du Colonel Roche

31077 Toulouse Cedex 4, FRANCIA

e-mail: {swain, michel, jonqui}@laas.fr

Artículo recibido en octubre de 1997; aceptado el 30 de enero de 1998.

RESUMEN

Este artículo presenta una aplicación de la técnica de Control Visual para un robot móvil, el cual debe ejecutar movimientos coordinados en un medio conocido y estructurado. Nuestra contribución se encuentra en la manera de expresar y ejecutar esa secuencia de movimientos básicos (tales como Ir a objeto A, Seguir objeto B, Girar alrededor de un objeto, ...): donde cada uno es un movimiento visualmente guiado [Swain y Devy, 1997]. El robot es controlado según cada una de las primitivas en la imagen. Dada la naturaleza de nuestro robot, el cual es no holonómico, éste sólo tiene dos grados de libertad (dos ruedas motrices) y tres parámetros de configuración ($XY\theta$); una cámara es colocada en el robot por medio de una plataforma, con lo cual agregamos un nuevo grado de libertad (θ_{pl}). El controlar los movimientos de la cámara en lugar del movimiento del robot permite eliminar las restricciones no holonómicas del robot y poder utilizar sus ruedas motrices y la plataforma sin problema, alguno [Rives y Pissard-Gibollet, 1992]. En este artículo el problema es tratado en simulación; los resultados experimentales y su validación están en desarrollo y en vías de instalarlo en nuestro robot móvil HILARE¹ II.

1 Introducción

Este artículo concierne a la navegación de un robot móvil en un mundo conocido y estructurado usando información visual; en esta ocasión, nosotros sólo estamos interesados en la ejecución de una tarea (una trayectoria hacia el objetivo) definida como secuencia de operaciones visualmente guiadas. Trabajos en el área del diseño de planificadores basados en sensores [Bouilly y Siméon, 1995] serán adheridos a nuestro desarrollo en las etapas experimentales.

La técnica de control visual [Espiau *et al.*, 1992; Hutchinson *et al.*, 1996] necesita de manera explícita la relación entre las variaciones de la información visual en la imagen, los movimientos de la cámara (matriz de interacción) y la matriz Jacobiana del robot. La expresión formal de estas relaciones permite escoger las informaciones visuales para una tarea específica del robot y el poder elaborar estrategias de control para el robot móvil.

Algunos métodos han sido propuestos para el control basado en la visión, especialmente para un vehículo que sigue una línea en la carretera [Dickmanns, 1994], o para un robot móvil que sigue un muro [Rives and Pissard-Gibollet, 1992; Pissard-Gibollet *et al.*, 1995]. En uno de sus trabajos, Pissard-Gibollet y Rives muestran una secuencia de tareas guiadas por la visión, como seguir un muro y girar alrededor de un segmento vertical [Rives y Pissard-Gibollet, 1992], pero sin considerar la transición entre esas tareas. Por ejemplo, en [Pissard-Gibollet *et al.*, 1995], la tarea de *seguir un muro e ir enfrente de un objeto* no están fusionadas; cuando la primera acción ya fue ejecutada,

¹Heuristiques Intégrées au Logiciel et Automatismes dans un Robot Evolutif

una sub-tarea llamada *posicionamiento* hace la identificación del objeto requerido por la segunda tarea. En el sistema de navegación propuesto por J. Kosecka [Kosecka, 1996], el espacio es representado como un modelo topológico en términos de región de grafos. Diferentes marcas en el espacio y sus asociaciones geométricas de esas primitivas en la imagen (requeridas para la tarea de control visual) son seleccionadas; el espacio es dividido en un conjunto de regiones de visibilidad, y la región del grafo es construida por la vecindad entre las regiones. El plan de navegación es definido como un recorrido de ese grafo y corresponde a la secuencia de las posiciones relativas de las tareas a efectuar, donde la posición relativa es completada por la estrategia del lazo cerrado del sensor respecto al espacio. La trayectoria es realizada durante el recorrido de los grafos que tienen que ser visitados desde la posición inicial hasta la meta. Nosotros también hemos propuesto un método para la construcción de un grafo topológico con restricciones de visibilidad [Bulata y Devy, 1996], pero en esta ocasión, sólo una rotación LRF (Laser Range Finder) ha sido tomada en cuenta.

Nuestro interés no es sólo controlar el robot respecto a una configuración específica dentro de la imagen; la eficacia y robustez de nuestro control ha sido considerada usando el método de función de tarea [Samson *et al.*, 1991]. Nuestra contribución también concierne a la transición entre diferentes tareas visuales: un formalismo de campo de potencial [Khatib, 1986; Khatib and Chatila, 1995] es usado para la elección de los diferentes coeficientes (ganancias, expresiones, ...); con el uso de éste método intentamos restarle sensibilidad a la ley de control para la elección de los diferentes coeficientes.

En la sección 2 recordaremos algunas generalidades del modelo cinemático de nuestro robot, para poder establecer una expresión que haga la unión entre los movimientos de la cámara y del robot. La sección 3 presenta nuestro método de control visual: la función tarea ha sido simplificada, así una relación directa entre los movimientos de una primitiva en la imagen y los movimientos del robot pueden ser utilizados para una ley de control en tareas guiadas visualmente. Finalmente, en la sección 4, los resultados de la simulación serán presentados como una validación del método propuesto para ejecutar tareas visualmente guiadas: seguir un muro que se encuentra a la izquierda, rodear la esquina de dicho muro (convexo), seguir el muro que conecta esa esquina hasta que un objeto sea visto y reconocido en la imagen, y finalmente ir hacia dicho objeto.

2 Cinemática de un Robot Móvil

Recordemos que el problema principal de nuestro robot móvil es su carácter no holonómico, ya que sólo tiene dos

ruedas motrices para controlarlo y tres parámetros de configuración (XY θ). En la práctica, la presencia de las restricciones no holonómicas en el sistema mecánico impiden que el robot pueda realizar algunas trayectorias [Laumond, 1986].

El modelo del robot móvil y su configuración están representados en la figura (1). La utilización del método de control visual [Espiau *et al.*, 1992; Hutchinson *et al.*, 1996] en un robot de tipo no holonómico no es directa. Una manera de sobrepasar el problema consiste en agregar otro grado de libertad, como por ejemplo colocando una cámara montada en una plataforma. De esta manera, si consideramos el sistema mecánico (robot + plataforma) como una sola cadena cinemática, es posible controlar completamente los movimientos de la cámara sin estar limitados por las restricciones no holonómicas de la base móvil [Pissard-Gibollet *et al.*, 1995]. Una primera adaptación de este sistema en nuestro robot puede ser consultada en [Swain, 1995].

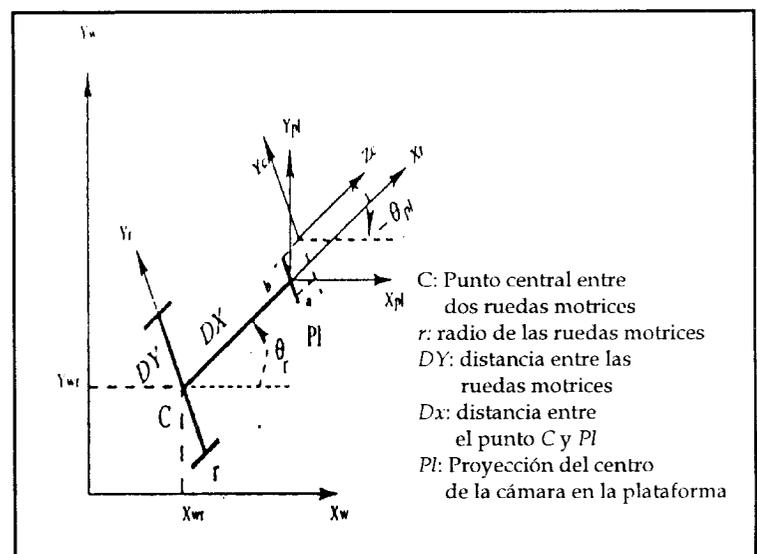


Figura 1: La configuración del robot

En los métodos clásicos de visión en robótica se separa la visión del control: en primera instancia la información 3D es extraída del sensor, y después el movimiento del robot es controlado para alcanzar la meta. Una manera alternativa consiste en especificar los movimientos del robot en términos del control, directamente dentro del marco de referencia del captor. Para esto debe encontrarse la relación entre el movimiento de la cámara y los diferentes grados de libertad del sistema.

En un principio, el modelo cinemático de la base móvil es expresado mediante el formalismo propuesto por Samson [Samson y Ait-Abderrahim, 1990]. Este formalismo nos da la relación entre las velocidades de cada una de las ruedas del robot y de la plataforma para un punto medio de las ruedas del robot (C) y la cámara (montada sobre una plataforma):

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_{pl} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta_r & \frac{r}{2} \cos \theta_r & 0 \\ \frac{r}{2} \sin \theta_r & \frac{r}{2} \sin \theta_r & 0 \\ \frac{r}{2DY} & -\frac{r}{2DY} & 0 \\ \frac{r}{2DY} & -\frac{r}{2DY} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{ri} \\ q_{ie} \\ q_{pi} \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde X_r y Y_r son las velocidades (rads/) de C , $\dot{\theta}_r$ y $\dot{\theta}_{pl}$ son las velocidades de rotación de el robot y la plataforma alrededor de Z_w .

De esta manera, si consideramos las dos transformaciones entre el marco de referencia de la cámara respecto a los marcos de referencia del robot y la plataforma, la relación directa entre los movimientos de la cámara y las velocidades articulares está dada por [Pissard-Gibollet *et al.*, 1995]:

$$T_c^{(Fc)} = J\dot{q} \quad (2)$$

donde:

- $T_c^{(Fc)}$ representa las velocidades de translación (V_x, V_y, V_z)^T y rotación ($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$)^T en el marco de referencia de la cámara (F_c),
- J representa la matriz jacobiana del sistema mecánico (base + plataforma). Ésta depende de diversos parámetros, unos de los cuales tienen que ser adquiridos por el robot ($X_r, Y_r, \theta_r, \theta_{pl}$), o estimados durante el proceso de calibración (r, DX, DY, a, b),
- y finalmente, $q = (q_{ri}, q_{ie}, q_{pi})^T$.

Damos un ejemplo de la expresión de J en una configuración simplificada (3): la cámara se encuentra de manera horizontal, y el marco de referencia de la plataforma es colocado en el eje X_r del robot.

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r}{2}(\sin(\theta_{pl}) + \frac{DX}{DY} \cos(\theta_{pl}) + \frac{a}{DY}) & -\frac{r}{2}(\sin(\theta_{pl}) - \frac{DX}{DY} \cos(\theta_{pl}) - \frac{a}{DY}) & a \\ \frac{r}{2}(\cos(\theta_{pl}) + \frac{DX}{DY} \sin(\theta_{pl}) - \frac{b}{DY}) & \frac{r}{2}(\cos(\theta_{pl}) - \frac{DX}{DY} \sin(\theta_{pl}) + \frac{b}{DY}) & -b \\ -\frac{r}{2DY} & \frac{r}{2DY} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

3 Control Visual

Nuestro modelo de control visual está basado en el formalismo descrito en [Espiau *et al.*, 1992; Hutchinson *et al.*, 1996]. Primeramente, la meta a alcanzar (s^*) es definida utilizando el modelo 3D como una posición particular a ser alcanzada para un conjunto de primitivas en la imagen; por ejemplo, en la tarea 'Sigue una pared usando la base del muro', la posición deseada del robot y la cámara durante el movimiento son representadas en el sistema como dos líneas rectas en la imagen.

Así, la relación entre los movimientos de la cámara y las primitivas de la imagen está establecida, por lo tanto, los movimientos de la cámara deben ser controlados para asegurar una convergencia en la imagen entre la posición actual (s) y la posición deseada (s^*). La utilización de este método permite eliminar la interpretación 3D a cada ciclo, así como el uso de la odometría para el robot.

3.1 Relación entre los Movimientos de la Cámara y el Flujo Óptico

El modelo de nuestra cámara está basado en el modelo clásico *pin-hole*. La velocidad s de los movimientos de la primitiva s dados por la proyección en la imagen por un elemento p (punto, recta, círculo, etc.) en 3D, debe ser ligada al movimiento de la cámara representado por el tesor cinemático T_c .

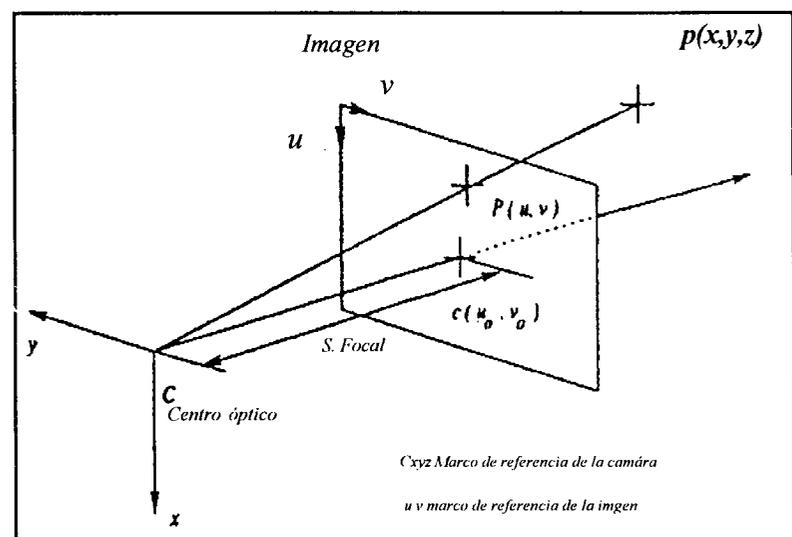


Figura 2: Modelo de la cámara

Una cámara es montada en el robot (ver figura (1)). La posición de la cámara (transformaciones entre F_c y F_w) en el ambiente es \bar{r} ; la cual depende de las configuraciones del robot y de la plataforma. Nosotros asumimos que el ambiente es estático; en este caso, la imagen adquirida por la cámara es totalmente caracterizada por \bar{r} y por la estructura 3D de la escena [Espiau *et al.*, 1992]. La información extraída de

la imagen $s(\bar{r})$ es un conjunto de primitivas que resultan de una proyección del plano imagen de los elementos 3D de p . De esta manera, podemos definir la ecuación del flujo óptico como:

$$\dot{s} = \frac{\delta s}{\delta \bar{r}} \cdot \frac{\delta \bar{r}}{\delta \dot{t}} = L_{sp}^T T_c^{(Fc)} \quad (4)$$

donde \dot{s} representa el movimiento aparente de una primitiva en la imagen, y $T_c^{(Fc)}$ es el tursor cinemático de la cámara en el ambiente, expresado en el marco de referencia de la cámara. L_{sp}^T , es llamada la matriz de interacción, la cual dependerá de la naturaleza de la primitiva s (punto, segmento, rectas, etc) de la posición 3D correspondiente a un elemento p y al modelo de la cámara (parámetros intrínsecos). Esta matriz ha sido utilizada por F. Chaumette para varias primitivas tales como puntos, líneas, círculos, esferas, etc. [Espiau et al., 1992].

3.2 Control

Haciendo referencia, a las ecuaciones (2) y (4) podemos escribir:

$$\dot{s} = L_{sp}^T J \dot{q} \quad (5)$$

De esta manera sabemos cómo diseñar un control de lazo cerrado para nuestro robot utilizando las primitivas de la imagen, lo único que falta es encontrar la matriz de interacción (L_{sp}^T) que asocia estas primitivas. Una ley de control puede generarse para que cada velocidad en las ruedas del robot y la plataforma $(q_{ri}, q_{le}, q_{pl})^T$ sean calculadas a fin de minimizar el movimiento aparente en la imagen. Una tarea visual es generalmente definida como un vector de error e :

$$e = (s(\bar{r}) - s^*) \quad (6)$$

donde:

- s^* es considerado como el vector de la posición a alcanzar por las primitivas en la imagen,
- $s(\bar{r})$ es el valor actual del vector de primitivas observadas por la cámara.

La cantidad e representa el error entre la posición actual de la primitiva en la imagen y su posición deseada. La tarea a realizar no es descrita en las coordenadas cartesianas del robot, sino en términos de las características en la imagen. Una simple ley de control puede ser obtenida con una disminución exponencial de este error con las siguiente relación:

$$\dot{e} = -\lambda e \quad (7)$$

y de las ecuaciones (5) (6) obtenemos:

$$L_{sp}^T J \dot{q} = -\lambda (s(\bar{r}) - s^*) \quad (8)$$

Algunos trabajos [Espiau et al., 1992; Pissard-Gibollet et al., 1995] muestran que la aplicación de esta ley de control es fácil y robusta. El tamaño del vector de error e , dependerá del número de primitivas adquiridas por cada una de las posiciones deseadas en la imagen; de esta manera el producto ($L_{sp}^T J$) no es una matriz cuadrada. Una vez que se haya verificado que la posición actual no corresponde a una singularidad en la imagen (líneas paralelas) para el robot, la pseudo inversa del producto ($L_{sp}^T J$)⁺ es calculada; de esta manera el vector de control es generado por la ecuación (9). Una manera más robusta de resolver el sistema q , dada la ecuación (8), es mediante el uso del método de SVD, dado que en varias ocasiones pueden presentarse singularidades.

$$\dot{q} = -\lambda (L_{sp}^T J)^+ (s(\bar{r}) - s^*) \quad (9)$$

La ley de control utilizada es extremadamente simple a implementar ya que sólo requiere el ajuste de λ . Este factor depende de la frecuencia del sistema y de las velocidades y aceleraciones que podrán ser aplicadas a los motores, normalmente no debe ser muy elevado para garantizar una buena estabilidad.

3.3 Tareas Híbridas

Algunas tareas visualmente guiadas como *Seguir un muro usando su base*, *Girar alrededor de una esquina*, son tareas híbridas: una restricción visual tiene que ser mantenida mientras que el robot efectúa una trayectoria definida según la misión a realizar. El vector de función de la tarea es derivado de una primera tarea llamada tarea primaria del error e_1 y de una función secundaria h_s a ser minimizada bajo la restricción de $e_1 = 0$, con gradiente $g_s^T = \frac{\partial h_s^T}{\partial \bar{r}}$.

La función primaria permite mantener la restricción visual durante el movimiento, mientras que la tarea secundaria permite imponer un movimiento extra al robot. Este tipo de tarea puede causar problemas si no se verifica la compatibilidad de las acciones a realizar (por ejemplo acercarse hacia un muro y seguirlo, pero con una tarea secundaria que aleje al robot del muro,...). Tres métodos diferentes pueden ser propuestos para definir este movimiento.

En el primero como en [Espiau et al., 1992; Pissard-Gibollet et al., 1995], podemos agregar un movimiento en el tursor cinemático de la cámara dentro de la siguiente ecuación:

$$T_c = -\lambda (L_{sp}^T)^+ (s(\bar{r}) - s^*) - \lambda \alpha g_s^T \quad (10)$$

donde $g_s^T = (V_{x_c}, V_{y_c}, V_{z_c}, \Omega_{x_c}, \Omega_{y_c}, \Omega_{z_c})^T$. Este formalismo, g_s^T describe un movimiento en el marco de referencia de la cámara. Dada la configuración de nuestro sistema, nosotros sólo tenemos: $g_s^T = (V_{y_c}, V_{z_c}, V_{x_c})^T$. Este método es usado para ejecutar la tarea de *Girar alrededor de una esquina*: usamos una rotación en Ω_{x_c} para girar alrededor del segmento que representa la esquina. La solución de nuestro sistema está dada por la ecuación (usando (2) y (9)):

$$\dot{q} = -\lambda(L_{sp}^T J)^+ (s(\bar{r}) - s^*) - \lambda \alpha J^+ g_s^T \quad (11)$$

El mismo método puede ser propuesto para ejecutar la tarea de *Seguir un muro* denotado ahora "tarea₁" (T_1): un movimiento a lo largo del eje óptico de la cámara puede ser sumado en el marco de referencia de la misma para la tarea secundaria. Nosotros proponemos otras dos soluciones para encontrar el valor de la expresión $J^+ g_s^T$. Podemos usar un formalismo basado en potenciales para imponer un movimiento en el robot y que éste se conduzca a su posición final (hay que recordar que el robot debe seguir el muro hasta que encuentre la esquina del mismo) o introduciendo una nueva restricción visual en el sistema con lo que la tarea secundaria quedará incluida en la tarea primaria.

Para la utilización del segundo método, nosotros encontramos el valor de $J^+ g_s^T$ gracias a un potencial atractivo (ver [Khatib, 1986; Khatib y Chatila, 1995]) producido por la meta a ser alcanzada (en la tarea T_1 la esquina convexa):

$$F_g = -K_g \begin{pmatrix} \frac{X_r - X_g}{\sqrt{d_g^2 + R^2}} \\ \frac{Y_r - Y_g}{\sqrt{d_g^2 + R^2}} \end{pmatrix} \quad (12)$$

donde K_g es una ganancia positiva, R es una función de la distancia mínima hacia la meta $(X_g, Y_g)^T$, $(X_r, Y_r)^T$ es la posición actual del robot en el marco de referencia global, y d_g es la distancia entre la meta y la posición del robot. Con el potencial atractivo, el robot sigue el gradiente de este potencial hacia su mínimo (figura (3)), y si combinamos este potencial con el control visual, el robot seguirá el muro a una distancia constante. La gran ventaja de este método es la simplicidad del algoritmo.

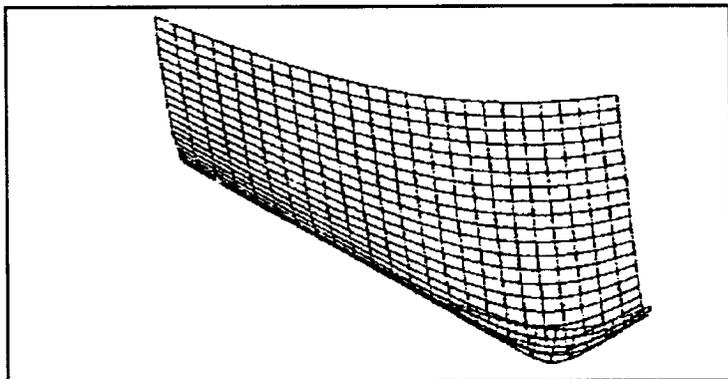


Figura 3: Potencial Atractivo

Finalmente, para el tercer método, en la tarea de *Seguir un muro* introducimos de manera implícita la tarea final ("hasta que vea la esquina convexa") como una nueva restricción visual: la posición final de esta primitiva al final del movimiento s^* . Dentro de la matriz de interacción L_{sp}^T esta nueva primitiva será tomada en cuenta: el vector s de las posiciones actuales tenemos las dos primitivas que representan el muro (dos rectas) y la esquina convexa (en este caso sólo es necesaria una recta). Mientras que la cámara situada sobre el robot no perciba la esquina nosotros introducimos una representación virtual de ésta al filo de la imagen (lado derecho) con lo que el sistema intentará corregir el error entre esa imagen virtual y la imagen deseada, como consecuencia el robot *seguirá el muro* y al mismo tiempo intentará minimizar el error de la recta que representa la esquina sin tener que agregar una tarea secundaria.

Para la etapa de transición entre dos tareas, siempre y cuando éstas se encuentren en el mismo campo visual, nosotros hemos utilizado la siguiente ecuación:

$$T_F = \gamma T_1 + (1 - \gamma) T_2 \quad (13)$$

donde γ es una función escalar decreciente (positiva) con valores entre $0 \leq \gamma \leq 1$.

4 Resultados Experimentales

La simulación y las validaciones experimentales de nuestro sistema han sido realizadas en paralelo. Primeramente, un simulador ha sido realizado para validar nuestro sistema de navegación con imágenes virtuales y con un robot virtual [Swain y Devy, 1997]. Para una misión, el simulador necesitará los siguientes conocimientos:

- el modo 3D del ambiente en el cual el robot debe navegar,
- la misión definida como una secuencia de operaciones básicas visualmente guiadas, y en caso de que sea necesario, un operador que busque la primitiva en el espacio libre para poder continuar con la misión en el caso de que dos tareas no se encuentren en el mismo campo visual,
- la configuración inicial del robot (posición, orientación del robot y plataforma).

Los operadores de visión no han sido considerados en este artículo; nosotros hacemos la suposición de que todas las primitivas pueden ser extraídas y seguidas de una imagen a otra. Para cada primitiva el simulador calcula $L_{s=s^*, p=p^*}^T$ de la primitiva s en la imagen para cada elemento p en 3D con respecto al ambiente. No es necesario actualizar la matriz de interacción L_{sp}^T en cada ciclo para la posición actual de la primitiva s ; simplemente podemos

utilizar dentro de la matriz de interacción los valores deseados las primitivas actuales, de esta manera en la ecuación (8), $L_{s=s^*, p=p^*}^T$ remplazará L_{sp}^T . Las trayectorias realizadas por el robot durante las dos aproximaciones son prácticamente las mismas, y una gran ventaja es la eliminación del cálculo de L_{sp}^T a cada ciclo. Finalmente, el movimiento del robot es periódicamente calculado por la solución de la ecuación (11), de esta manera en cada ciclo:

- la posición actual de la cámara \bar{r} es calculada (por la integración de movimiento sucesivos en simulación y gracias a la odometría en la experimentación) y la matriz jacobiana J es actualizada,
- $s(\bar{r})$ es extraído (por el uso de la 3D en simulación y en la experimentación por un método de seguimiento de primitivas 2D en la imagen),
- el vector de error ($s - s^*$) es calculado,
- la ganancia λ es adaptada en cada ciclo según el error, de esta manera las restricciones cinemáticas del sistema han sido respetadas. El orden de \dot{q} es calculado por la solución de la ecuación (8).

Para la etapa de transición de dos tareas visualmente guiadas, dos casos han sido considerados:

- Si las primitivas requeridas para la realización de la tarea pueden ser extraídas de la misma imagen (por ejemplo, dos rectas para el muro y una recta horizontal que representa la esquina del muro), éstas pueden ser calculadas y combinadas por la ecuación (13),
- si las primitivas no pueden ser extraídas de la misma imagen, entonces se tendrá que realizar un movimiento en el espacio libre para encontrar la siguiente primitiva y poder posicionarse para realizar la siguiente tarea.

Presentamos la misión a realizar por nuestro robot en la figura (4), en un principio el robot debe seguir un muro hasta que llegue a la esquina del mismo, en ese momento tendrá que girar alrededor de la esquina hasta que el otro muro sea visible, una vez que esto suceda, el robot seguirá el muro hasta que identifique 4 puntos, una vez que éstos sean identificados, el robot tendrá que acercarse y colocarse a un metro de distancia de ellos. En la figura (5), mostramos el camino realizado por el robot para ejecutar la misión.

En la figura (6), mostramos el inicio de "Seguir un muro"; la base del muro actualmente observada es s y la posición deseada es s^* .

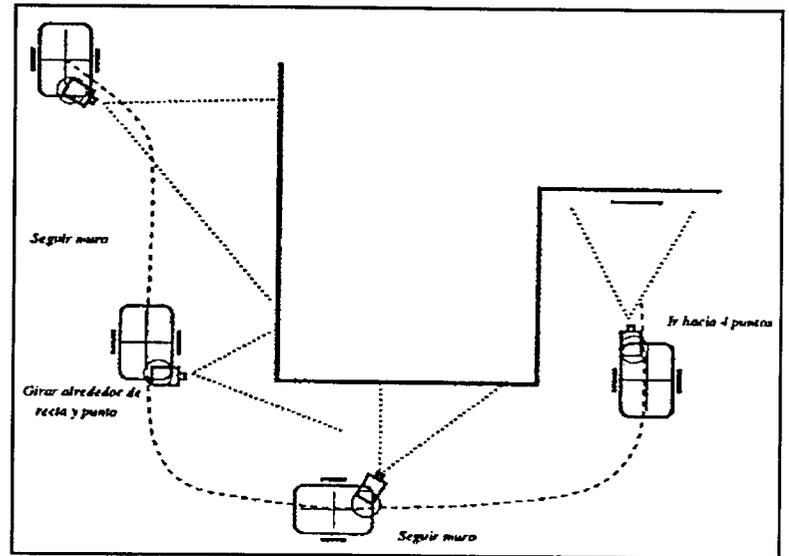


Figura 4: La misión a efectuar

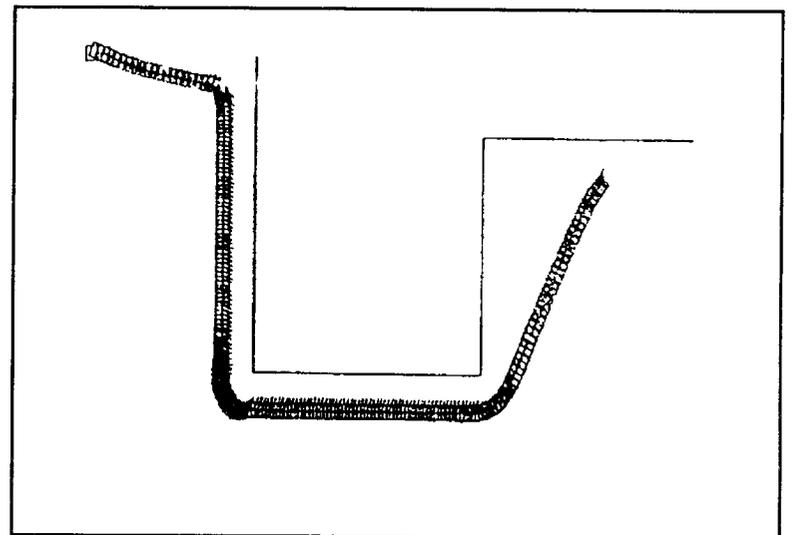


Figura 5: La misión efectuada por el simulador

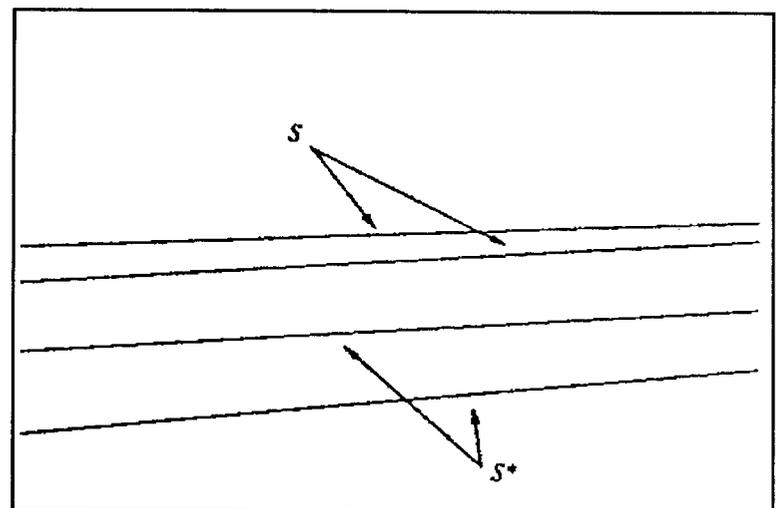


Figura 6: Recorriendo un muro (2 líneas rectas)

La figura (7) muestra las posiciones sucesivas de la proyección de la línea durante la acción de "Girar alrededor de un segmento"; dos primitivas son necesarias para la realización de esta operación (una recta y un punto). Una sola primitiva como la recta no aseguraría el movimiento del robot, pues simplemente bastaría con mover la cámara para posicionar la recta en la posición deseada.

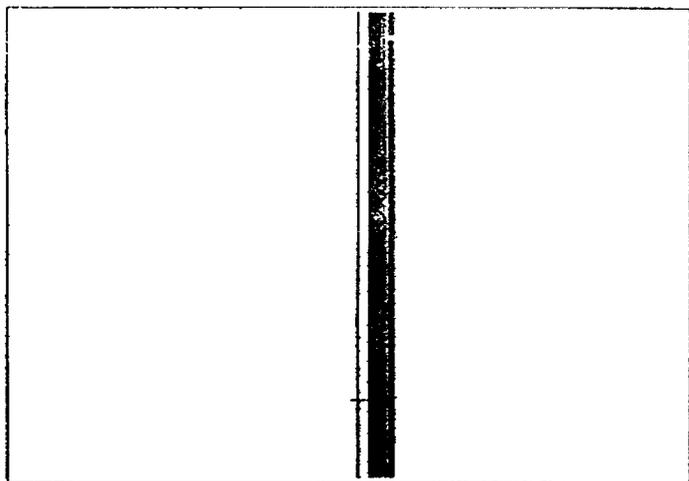


Figura 7: Girando alrededor de una esquina (1 línea recta y 1 punto)

En las últimas figuras podemos observar un típico control visual para posicionar cuatro puntos en la imagen. En la primera imagen (8) vemos la posición inicial de los cuatro puntos en la imagen y la posición a alcanzar. Finalmente vemos como fue reduciéndose el error entre la posición actual y la posición a alcanzar por los cuatro puntos en la imagen (9).

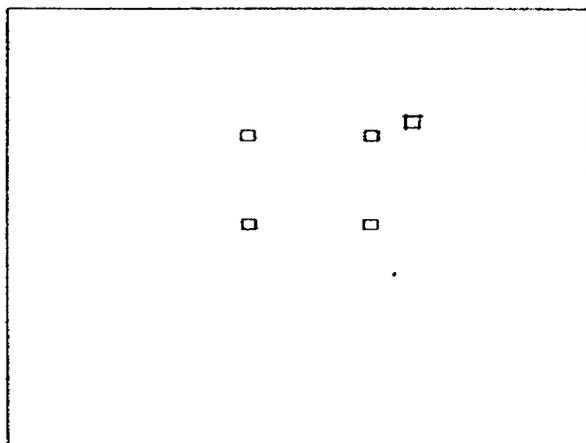


Figura 8: Posición inicial de la tarea ir a un objeto (4 puntos)

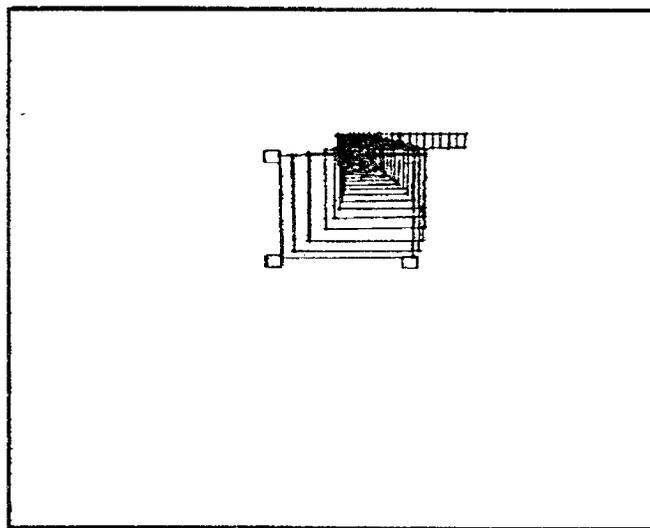


Figura 9: Posición final de la tarea ir a un objeto (4 puntos)

Para los experimentos actuales, nosotros estamos sumando las primitivas de *control visual* en el nivel funcional de nuestro robot *HILARE II* (figura 10). En este momento, estamos trabajando en el procesamiento de la imagen (seguimiento de las primitivas en tiempo real) y la implantación de nuestro programa dentro del sistema de explotación en real VxWorks. El formalismo que hemos escogido para combinar diferentes primitivas de control visual, harán más fácil en combinarlas con otras tareas híbridas más complejas, como por ejemplo la cooperación con otros módulos reactivos basados en otros captores (evitamiento de obstáculos).

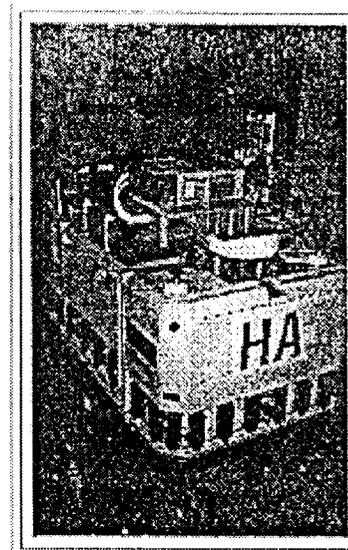


Figura 10: HILARE II

5 Conclusión

El trabajo presentado en este artículo se centra en las técnicas de control visual aplicadas a la navegación de un robot móvil en ambiente estructurado, típicamente dentro de un edificio.

Resultados de simulación han sido presentados para validar nuestro método, y especialmente, para evaluar las transiciones entre operaciones visualmente guiadas como *seguir un muro*, *girar alrededor de una esquina*, etc. Un formalismo de potencias ha sido seleccionado para la utilización de tareas híbridas.

Sin embargo, otras evoluciones a corto plazo de nuestra investigación son:

- el seguimiento de objetos que puedan ser ocultados momentáneamente por un objeto móvil; ésto sera realizado gracias al uso de una cámara virtual,
- otras operaciones visualmente guiadas basadas en otro tipo de primitivas extraídas de la imagen, o de la cooperación con otros captores (Ultrason, LRF),
- en cuanto al nivel de control, ya que podrían encontrarse inconsistencias durante la ejecución con otros captores,
- otro sistema mecánico dentro de nuestro robot, tal que un brazo mecánico con 6 grados de libertad o una plataforma con 2 grados de libertad.

6 Agradecimientos

El trabajo de Ricardo Swain ha sido realizado gracias al apoyo económico del CONACyT-SFERE y del ITESM CEM. Los autores agradecen a Maher Khatib por su contribución en el uso del formalismo de potencial, Matthieu Herrb y Sara Fleury por la asistencia técnica durante las experimentaciones.

Referencias

Bouilly, B. y T. Siméon. "A Sensor-Based Motion Planner for a Mobile Robot Navigation with Uncertainty." In L. Dorst, M.V. Lambalgen, and F. Voorbraak, editors, *Reasoning with Uncertainty in Robotics*, pp. 235-247. Springer, 1995.

Bulata, H. y M. Devy. Incremental Construction of a Landmark-Based and Topological Model of Indoor Environments by a Mobile Robot." In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA96)*, Minneapolis, USA, 1996.

Dickmanns, E. "Bifocal Dynamic Vision for Vehicle Control." In *The Sixth International Symposium of Robotics Research (ISRR '94)*, pages 125-133, 1994.

Espiau, B., F. Chaumette y P. Rives. A New Approach to Visual Servoing in Robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8(Num. 3), June 1992.

Hutchinson, S., G.D. Hager y P.I. Corke. "A Tutorial en Visual Servo Control." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12 (Num. 5):651-670, October 1996.

Khatib, M. y R. Chatila. "An Extended Potencial Field Approach for Mobile Robot Sensor-Based Motions." In *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS' 95)*, Karlsruhe, Germany, March 1995.

Khatib, O. "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots." *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5 (Num. 1), January 1986.

Kosecka, J. Visually Guided Navigation. In *Proceedings of the 4th Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS' 96)*, Lisbon, Portugal, July 1996.

Laumond, J.P. "Feasible Trajectories for Mobile Robots with Kinematic and Environment Constraints." In *Intelligent Autonomous Systems*, pp. 346-354, 1986.

Pissard-Gibollet, R., K. Kapellos, P. Rives y J.J. Borrelly. "Real-Time Programming of Mobile Robot Actions Using Advanced Control Tecchniques." In *Proceedings of the 4th International Symposium on Experimental Robotics (ISER' 95)*, Stanford, California, USA, June-July 1995.

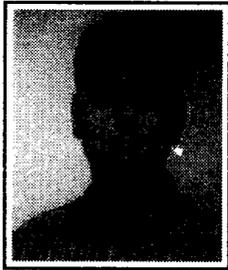
Rives, P. y Pissard-Gibollet. "Reactive Mobile Robots Based on a Visual Servoing Approach." In *Proceedings of the 13rd Annual Conference on Artificial Intelligence (AIS' 92)*, Intelligence Platnning and Simulation, Perth, Western Australia, July 1992.

Samson C. y K. Ait-Abderrahim. *Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space*. Technical Report 1288, INRIA, France, October 1990.

Samson, C., M.L. Borgne y B. Espiau. *Robot Control : The Task Function Approach*. Clarendon Press, Oxford, England, 1991.

Swain, R. y M. Devy. "Visually-Guided Navegation of a Mobile Robot in a Structured Environment". In *Proceedings of the Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS' 97)*, Stockholm, Swede, Juin 1997.

Swain, R. *Asservissement Visuel d'un Robot Mobile*. DEA report, LAAS CNRS, Toulouse, France, Juin 1995.



Ricardo Swain Oropeza obtuvo su diploma de Ingeniero en Sistemas Electrónicos en el ITESM CEM (México) en 1993. En 1995 obtuvo su diploma de DEA en el área de Control e Informática industrial en el INP-ENSEEIH. Desde 1995 se encuentra preparando su Doctorado en el grupo de Robótica e Inteligencia Artificial (RIA) del LAAS-CNRS (Francia) en el área de la visión aplicada a la robótica móvil.



Michel Devy obtuvo su Maestría en Ciencias en 1976 en el ENSIMAG (Grenoble), y su Doctorado en 1980 en la Universidad Paul Sabatier (Toulouse). Desde 1980 ha estado trabajando en el grupo de Robótica e Inteligencia Artificial (RIA) del LAAS-CNRS (Toulouse-France). Sus trabajos conciernen a la percepción 3D de máquinas inteligentes. Ha estado involucrado en numeros proyectos internacionales en las áreas de manufactura y robótica móvil. Dirige el equipo de percepción del grupo RIA del LAAS-CNRS. Sus principales temas de interés conciernen a la modelización 3D de ambientes naturales o de interior, aplicada a la robótica móvil.



Stéphanie Jonquière se encuentra realizando su Doctorado (desde 1996) en el grupo de Robótica e Inteligencia Artificial (RIA) del LAAS-CNRS (Francia) sobre la interpretación de ambientes estructurados. En 1996 obtuvo sus diplomas de Ingeniero en el INP-ENSEEIH en el área de Electrónica y Control y de DEA en el área de Control e Informática Industrial en el mismo instituto.

