

CONTROL VISUAL BASADO EN FLUJO DE MOVIMIENTO

J. Pomares, F. Torres
Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.
Universidad de Alicante.
Crtra. San Vicente s/n A.P. de correos 99.
{jpomares, Fernando.Torres}@ua.es

Resumen

Este artículo describe una nueva técnica para el seguimiento de trayectorias empleando control basado en imagen denominada control visual basado en flujo de movimiento. Esta estrategia permite el seguimiento de trayectorias especificadas en el espacio de la imagen presentando asimismo un correcto desempeño en el espacio cartesiano 3-D. Una de las principales aportaciones conseguidas con la aplicación de control visual basado en flujo de movimiento es la posibilidad de realizar el seguimiento de forma no dependiente del tiempo, lo que permite asegurar un correcto seguimiento de la trayectoria en la imagen al no verse el sistema sometido a restricciones temporales.

Palabras Clave: Control visual basado en imagen, Tracking, Seguimiento de trayectorias, Flujo de movimiento.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control visual han sido hasta la actualidad utilizados en un amplio rango de aplicaciones [1]. La mayoría son aplicaciones punto a punto en las que se desea alcanzar una determinada configuración de las características deseadas en la imagen a partir de una configuración inicial. Como se ha mostrado en distintos trabajos [2] si las configuraciones inicial y final se encuentran muy alejadas es difícil asegurar la convergencia, más aún si existen errores de modelado. Asimismo, haciendo uso de un sistema de control visual clásico no se puede especificar una trayectoria entre las configuraciones inicial y deseada.

Típicamente los sistemas de control visual se clasifican en basados en posición y basados en imagen [2][3]. El primer caso está basado en el cálculo de un error en el espacio Cartesiano 3-D para lo que requieren un modelo CAD perfecto del entorno y un sistema de cámara calibrado. Este tipo de sistemas es muy sensible a errores de modelado y ruidos externos. En el caso de control visual basado en imagen el error se determina directamente en la

imagen. Esta aproximación es robusta frente a errores de modelado pero en general se obtiene un movimiento no adecuado de la cámara en el espacio cartesiano 3-D. Por otro lado, los sistemas de control visual basados en imagen son localmente estables lo que permite asegurar una correcta convergencia si la configuración deseada se encuentra suficientemente cercana a la inicial.

Este artículo presenta una solución para el seguimiento de trayectorias en la imagen haciendo uso de control basado en imagen. La aproximación descrita en este artículo hace uso de lo que se ha denominado como flujo de movimiento para determinar la configuración deseada a partir de la actual. De esta manera, la configuración deseada siempre permanece cercana a la actual y se puede asegurar la estabilidad local permitiendo de esta manera realizar el seguimiento de la trayectoria deseada en la imagen.

En [5] se muestra una aproximación consistente en un sistema de control visual basado en imagen para seguir trayectorias dependientes del tiempo. Sin embargo, la que se describirá en este artículo se emplea para seguir trayectorias independientemente del tiempo. Si el seguimiento se formula como una trayectoria dependiente del tiempo, la configuración actual y la deseada se encontrarán separadas por un intervalo de tiempo, Δt . Sin embargo, el mantener las restricciones temporales no es crítico comparado con la necesidad de mantener la trayectoria en la imagen. De esta manera, si un sistema de control visual basado en imagen es empleado para el seguimiento de trayectorias dependientes del tiempo, puede correr el riesgo de no seguir la trayectoria adecuada a costa de intentar mantener las restricciones temporales. Para resolver este problema se hace uso del denominado control visual basado en flujo de movimiento con el que la tarea a desarrollar por el robot se codifica en el espacio de configuraciones de la imagen.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se muestran los conceptos básicos acerca de planificación de trayectorias en la imagen. La Sección 3 describe como generar el flujo de movimiento a partir de la trayectoria en la imagen

obtenida en la Sección 2. En la sección 4 se muestran las consideraciones para la aplicación de control basado en imagen en una estrategia basada en flujo de movimiento. En la Sección 5 se muestran los resultados simulados y reales obtenidos empleando un sistema de cámara en el extremo de un robot.

2 PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN EL ESPACIO DE LA IMAGEN

La planificación de la trayectoria deseada en la imagen se lleva a cabo en diversas fases. En primer lugar se obtiene la trayectoria discreta de la cámara como una secuencia de N movimientos. Para llevar a cabo esta primera fase se hace uso de los algoritmos desarrollados en nuestros trabajos anteriores [6][7]. A partir de las configuraciones anteriores se obtiene la trayectoria discreta del objetivo en la imagen. Esta trayectoria discreta estará compuesta por M puntos de forma que cada uno de estos M puntos de S describirá una trayectoria discreta en la imagen en los instantes k . Seguidamente se analizará la trayectoria de una de estas características $^k \mathbf{f} / k \in 1 \dots N$ (por simplicidad se elimina el subíndice que indica cuál de las M características se está considerando).

La evolución de $^k \mathbf{f}$ se corresponde con la trayectoria discreta que se desea que siga la característica en la imagen a lo largo de la tarea. A menudo la trayectoria deseada de un robot se especifica haciendo uso de trayectorias deseadas variables con el tiempo, sin embargo, cuando se desea realizar el seguimiento de una trayectoria, el que se alcance un determinado punto en un momento determinado no ofrece información acerca de la exactitud del seguimiento. Bajo este principio se va a realizar una codificación de la trayectoria deseada en la imagen, $f_d(\tau)$, que prescindirá de la información temporal.

Con este objetivo se codifica la trayectoria deseada haciendo uso de un interpolador spline cardinal cúbico. Haciendo uso de este interpolador puede determinarse $f_d(\tau)$, trayectoria continua y derivable en la imagen deseada para cada característica.

3 FLUJO DE MOVIMIENTO

En este apartado se describirá el concepto de flujo de movimiento mostrando las consideraciones adecuadas para su implementación. Para realizar la descripción en la Sección 3.1 se describirá el concepto general de flujo de movimiento, para pasar a mostrar en las Secciones 3.2 y 3.3 detalles íntimamente relacionados con este concepto tales

como funciones de peso y de potencial utilizadas en la definición del flujo de movimiento.

3.1 DEFINICIÓN

El flujo de movimiento, Φ , se define como:

$$\Phi: \mathfrak{S} \rightarrow T\mathfrak{S} \quad (1)$$

donde \mathfrak{S} es el espacio de configuraciones de la imagen y $T\mathfrak{S}$ es el espacio tangente. El flujo de movimiento está compuesto por un conjunto de vectores que convergen hacia la trayectoria deseada de la imagen. Estos vectores cumplen que: sus valores en cada punto de la trayectoria deseada es tangente a la trayectoria, y fuera de la trayectoria tiende a disminuir los errores de seguimiento.

Para definir el flujo de movimiento se considera que se desea seguir una trayectoria parametrizada en la imagen $f_d: \Gamma \rightarrow \mathfrak{S}$ donde $\Gamma \subset \mathfrak{R}$, de forma que si Γ fuera el tiempo se tendría la trayectoria clásica en la imagen dependiente del tiempo. Considerando que las coordenadas de esta trayectoria en la imagen son $f_d(\tau)=[f_{xd}(\tau), f_{yd}(\tau)]$ y que $f(\tau)$ se trata de la configuración actual de las características en la imagen, se define el vector de error $\mathbf{E}(f, \tau)=(E_x, E_y)$ donde $E_x=(f_x(\tau)-f_{xd}(\tau))$ y $E_y=(f_y(\tau)-f_{yd}(\tau))$. A partir de este error se determina la función de potencial $U: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ según lo descrito en el Apartado 3.3.

A partir las funciones anteriores se define el flujo de movimiento Φ como una combinación lineal de dos términos:

$$\Phi = G_1(\mathbf{f}) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{xd}(\tau)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial f_{yd}(\tau)}{\partial \tau} \\ 1 \end{pmatrix} - G_2(\mathbf{f}) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial f_x} \\ \frac{\partial U}{\partial f_y} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

donde $G_1, G_2: \mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{R}^+$ son funciones de peso definidas según lo descrito en el Apartado 3.2. El primer término de la expresión (2), $\dot{f}_d(\tau)$, se obtiene calculando los coeficientes de Taylor de la trayectoria deseada.

Una consideración aparte debe realizarse con la velocidad de progresión. Hasta ahora se ha considerado un conjunto de M características, cada una de las cuales debe seguir una trayectoria deseada en la imagen. Sin embargo, es necesario que cada una de las M trayectorias progresen coordinadamente de manera que las trayectorias más cortas disminuyan su velocidad y se adapten a las más largas, de forma que

para un instante de tiempo k , el conjunto ${}^k\mathbf{s} = \{f_i/i \in 1 \dots M\}$ se corresponda con una configuración deseada de la cámara en el espacio cartesiano 3-D. Consecuentemente, la velocidad de progresión para cada característica dependerá de la longitud de la trayectoria en la imagen de forma que el tiempo descrito por cada característica en pasar por los N puntos en la imagen sea el mismo.

3.2 FUNCIONES DE PESO $G_1 - G_2$

Como se puede observar en la ecuación (2), el primer componente del flujo de movimiento reproduce el comportamiento de la trayectoria deseada, y, por lo tanto, G_1 controla la velocidad de progresión de la trayectoria deseada en la imagen. El propósito del segundo término es disminuir el error de tracking. De esta manera, ajustando los valores de G_1 y G_2 se puede determinar como será la progresión de la trayectoria en la imagen así como controlar el acercamiento de la misma hacia la trayectoria deseada.

Cuando el error de tracking sea alto se hará que el valor de G_1 sea bajo comparado con el de G_2 de forma que se disminuya la velocidad de progresión de la trayectoria y se aumente el valor del segundo término de (2) con el propósito de disminuir rápidamente el error. Por el contrario, si el error es bajo se disminuirá el valor de G_2 y se aumentará el de G_1 con el propósito de aumentar la velocidad de progresión de la trayectoria. En concreto, para determinar los valores de estas funciones de peso se considera una familia de curvas, la forma de las cuales es variable dependiendo de los valores de los parámetros a y b como se muestra en la Figura 1. El parámetro δ es una variable que representa un valor de error tal que si $U(E(f, \tau)) > \delta \rightarrow G_1 = 0$.

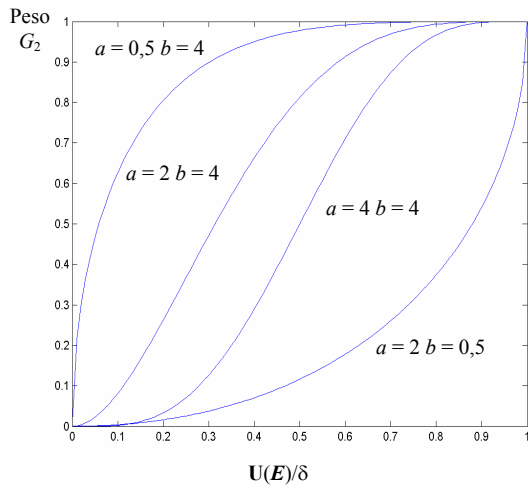


Figura 1: Evolución G_2 ante distintos valores de a y b

La definición de los pesos G_1 y G_2 según la curva exponencial mostrada en la Figura 1 viene motivada ante la posibilidad de definir la forma de las mismas haciendo uso de los parámetros a y b . De esta manera, si se desea realizar un seguimiento estricto de la trayectoria asegurando un valor mínimo del error puede utilizarse los parámetros $a=0,5$ y $b=4$ (véase Figura 1). Con esto se consigue que el sistema rápidamente aumente el peso correspondiente para eliminar el error de seguimiento. Por el contrario, si se desea flexibilizar el seguimiento de forma que la velocidad de progresión sea alta y sólo se disminuya cuando el error sea suficientemente alto, pueden utilizarse los parámetros $a=2$ y $b=0,5$ (véase Figura 1). Cabe resaltar que los parámetros que se han utilizado para las pruebas y resultados que se mostrarán a lo largo de este artículo han sido $a=2$ y $b=4$.

3.3 FUNCIÓN DE POTENCIAL

Para definir la función de potencial se va a considerar como \mathbf{I} la imagen deseada o imagen que se obtendría tras representar la trayectoria $f_d(\tau)$ obtenida en la sección 2.

El primer paso para determinar la función de potencial es calcular el gradiente de \mathbf{I} . Para ello se utiliza la siguiente combinación de operaciones de morfología matemática [8][9]:

$$\mathbf{I}_g = \psi(\mathbf{I}) = \delta(\mathbf{I}) - \varepsilon(\mathbf{I}) \quad (3)$$

donde ε es la erosión de la imagen, δ es su dilatación y \mathbf{I}_g es la imagen gradiente obtenida.

Una vez obtenida la imagen \mathbf{I}_g , el siguiente paso para determinar la función de potencial consiste en generar un mapa de distancias \mathbf{I}_d . El valor de \mathbf{I}_d en el píxel x es la distancia Euclídea de x al complemento de \mathbf{I}_g [4]:

$$\mathbf{I}_d = \Psi_{B_C}(\mathbf{I}_g) = \sum_i \varepsilon_{i, B_C}(\mathbf{I}_g) \quad (4)$$

El mapa de distancias \mathbf{I}_d es una imagen que almacena en cada píxel información relativa a su menor distancia hasta $f_d(\tau)$. En la Figura 2.b se muestra el mapa de distancias para la trayectoria de la Figura 2.a. A partir de esta última figura es posible generar una representación tridimensional del mapa de distancias (Figura 2.c) donde el valor de la coordenada z representa la distancia de cada píxel hasta el píxel más cercano dentro de la trayectoria deseada.

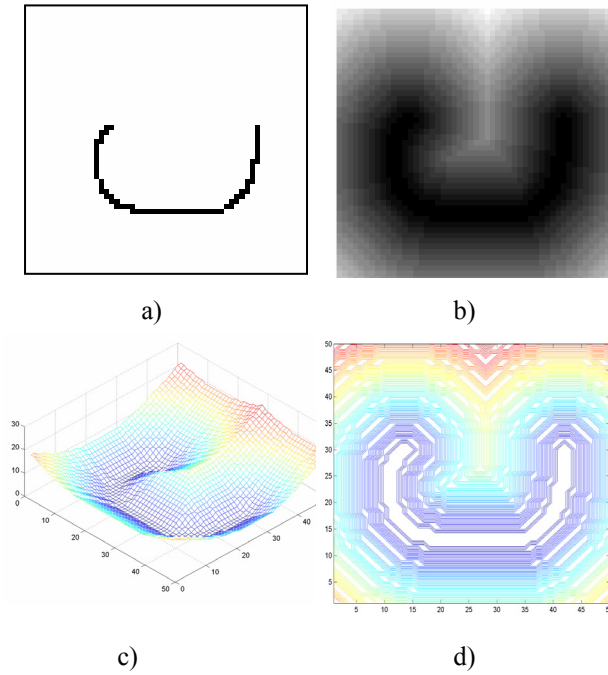


Figura 2: a) Trayectoria deseada en la imagen $f_d(\tau)$ para una característica. b) Mapa de distancias. c) Representación tridimensional del mapa de distancias. d) Líneas equipotenciales

A partir de U se obtiene los componentes x e y el gradiente bidimensional consistente en una matriz de vectores que apuntan en la dirección en la que se aumentan los valores de U :

$$\nabla U = \frac{\partial U}{\partial f_x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial f_y} \vec{j} \quad (5)$$

4 CONTROL BASADO EN IMAGEN

En tareas en las que se desea posicionar un robot respecto a un elemento del entorno, la utilización de sistemas de control visual permite hacer uso de visión artificial para guiar el robot respecto a dicho elemento. El empleo de un sistema de control visual basado en imagen frente a uno basado en posición ofrece distintas ventajas para este tipo de aplicaciones dentro de las cuales cabe mencionar su robustez frente a errores de modelado y perturbaciones externas. Sin embargo, en este tipo de sistemas de control visual la convergencia generalmente únicamente está garantizada localmente [10][11].

Si se considera la tarea de seguir una trayectoria deseada en la imagen dependiente del tiempo, esta trayectoria se especifica como:

$$f_d: \mathcal{R}^+ \rightarrow \mathcal{S} \quad t \mapsto f_d(t) \quad (6)$$

donde \mathcal{S} es el espacio de configuraciones en la imagen. Si se considera que la trayectoria real en la imagen de una característica es $f: \mathcal{R}^+ \rightarrow \mathcal{S}$, y $d: \mathcal{S} \times \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{R}^+$ es la distancia entre dos puntos, un sistema de control basado en imagen típico dependiente del tiempo provoca que $d(f_d(t), f(t)) \rightarrow 0$, según $t \rightarrow \infty$.

Sin embargo, esto no refleja lo bien que se está realizando el seguimiento de la trayectoria en la imagen, ya que el requisito de que las características en la imagen se encuentren en una posición dada por una trayectoria predeterminada en cada momento puede ser una imposición muy restrictiva lo que provoque que no se siga la trayectoria a costa de mantener las restricciones temporales. Por esta razón se define la trayectoria deseada como $f_d(\tau) = [f_{xd}(\tau), f_{yd}(\tau)]$ según lo descrito en la Sección 2 y se ha desarrollado una aproximación utilizando los denominados flujos de movimiento. Durante el desarrollo de la tarea de control visual las características deseadas se verán modificadas según la evolución codificada con el flujo de movimiento. De esta manera puede explotarse el buen comportamiento de los sistemas de control basados en imagen cuando las características actuales y las deseadas se encuentran cercanas, garantizando la estabilidad local del sistema.

5 RESULTADOS

En este apartado se van a describir las distintas pruebas realizadas que muestran el correcto funcionamiento del sistema. Para ello en primer lugar se va a detallar la arquitectura del sistema sobre el que se han desarrollado las pruebas.

5.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En la Figura 3, se muestra la arquitectura del sistema:

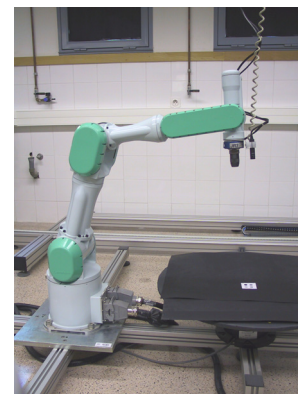


Figura 3: Arquitectura del sistema

Las características de cada uno de los componentes son:

- Sistema “Eye-in-hand”: La captura de imágenes desde el extremo del robot se lleva a cabo con una minicámara JAI-M536. Se emplea MATROX GENESIS como tarjeta de adquisición y procesamiento de imágenes.
- Sistema manipulador: Se compone de un robot Mitsubishi PA-10 con 7 grados de libertad.
- Objetivo: El objeto seguido se trata de un patrón cuadrado con cuatro marcas que serán las que se extraerán durante el seguimiento.

5.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el seguimiento de distintas trayectorias en la imagen haciendo uso del sistema propuesto.

La primera prueba consiste en una trayectoria parabólica. En la Figura 4 se representa un muestreo de la trayectoria deseada en el espacio 3-D junto con el muestreo correspondiente de las características deseadas en la imagen f_d^k . Aplicando los conceptos descritos en la Sección 3 se determina el campo de vectores correspondiente al flujo de movimiento para cada una de las cuatro características extraídas de la imagen. Para obtener los campos de movimiento los parámetros considerados han sido $\delta = 20$, $a = 2$ y $b = 4$, a partir de los cuales se puede deducir que la evolución de G_1 y G_2 (véase Figura 1). En la Figura 5 se muestra un detalle del flujo de movimiento para f_2

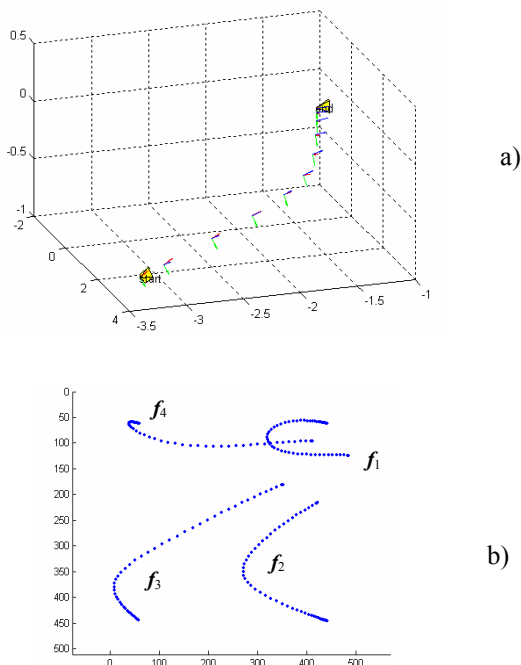


Figura 4: a) Muestreo de la trayectoria deseada en el espacio cartesiano. b) Trayectoria deseada en la imagen.

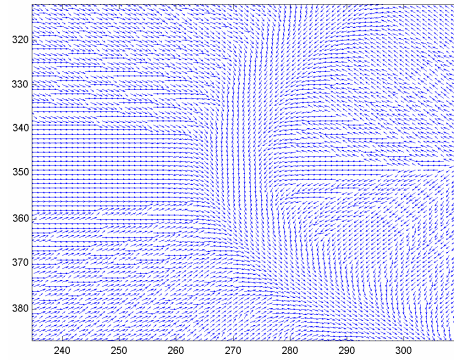


Figura 5: Detalle del flujo de movimiento obtenido para la característica f_2

Una vez determinados los flujos de movimiento anteriores y considerando lo descrito en la Sección 4, tras ejecutar el sistema se obtiene la trayectoria de las características en la imagen mostrada en la Figura 6.

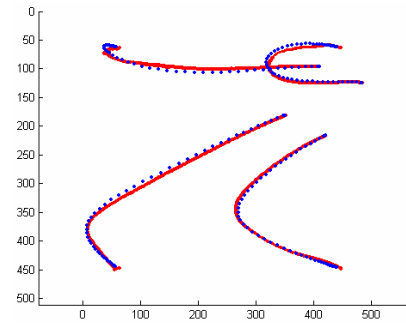


Figura 6: Comparativa entre la trayectoria real obtenida y el muestreo de la trayectoria deseada

En la Figura 7 se muestra la trayectoria 3-D de la cámara durante el seguimiento junto con la trayectoria deseada.

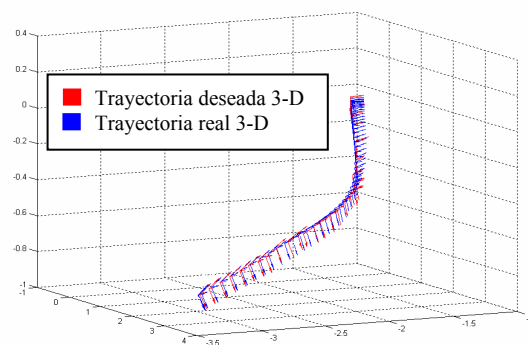


Figura 7: Trayectoria deseada y real obtenida en el espacio 3-D

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para demostrar el correcto funcionamiento se va a mostrar los resultados obtenidos empleando la arquitectura descrita en la sección 5.1.

5.3.1 Trayectoria 1

La primera trayectoria que se va a evaluar consiste en un descenso en profundidad del robot para posteriormente realizar un desplazamiento del mismo, la evolución de las características y , y, por lo tanto, la trayectoria deseada en la imagen se muestra en la Figura 8.

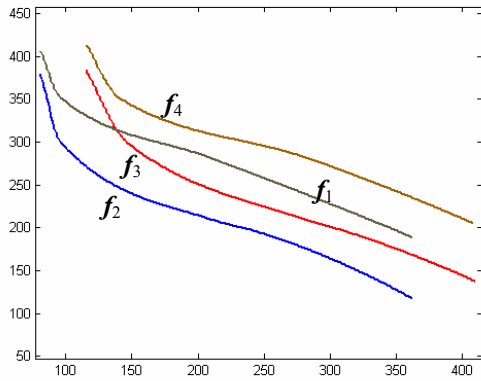


Figura 8: Trayectoria deseada en la imagen

En este experimento se desea que las características sigan la trayectoria mostrada en la Figura 8 y finalmente converjan en la posición $f_{d1}=(340,203)$, $f_{d2}=(342,134)$, $f_{d3}=(412,136)$ y $f_{d4}=(410, 204)$. En la Figura 9 se muestra la trayectoria real de las características f_1 y f_2 extraídas en la imagen durante el desarrollo de la trayectoria por el sistema de cámara en el extremo del robot. Con el objetivo de observar los errores entre la trayectoria deseada y la real se muestran también las trayectorias deseadas para cada una de estas características.

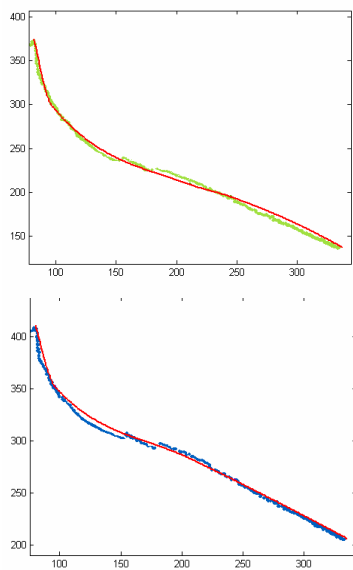


Figura 9: Trayectoria deseada y real para las características f_1 y f_2 respectivamente

El flujo de movimiento ha sido obtenido empleando los mismos parámetros que en el experimento simulado anterior. Con estas consideraciones se observa que los márgenes de error se encuentran dentro de lo esperado.

5.3.2 Trayectoria 2

En este caso la trayectoria 3-D que habrá de describir la cámara del extremo del robot se representa en la Figura 10. En esta figura se ha representado la evolución del sistema de coordenadas ubicado en el extremo del robot durante la trayectoria. Durante el transcurso de la trayectoria se produce distintas traslaciones y, como se puede observar en la figura, una rotación de la cámara alrededor del eje z el cual se mantiene siempre perpendicular al plano x - y en el que se encuentra ubicado el objetivo.

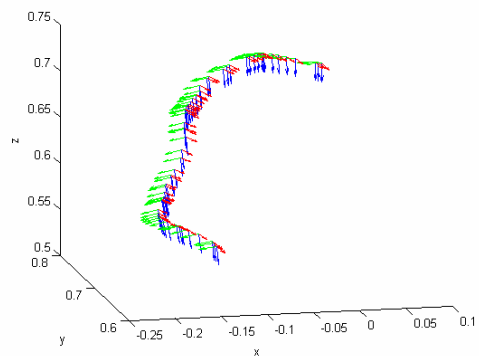


Figura 10: Trayectoria deseada en el espacio 3-D

Para realizar esta prueba se han empleado los mismos parámetros que en casos anteriores excepto $\delta = 10$. Con esto se consigue que el error máximo permitido sea menor a costa de realizar mayor número de correcciones en la trayectoria para mantener este umbral de error. En la Figura 11 se muestra una comparativa entre la trayectoria deseada y la real obtenida. Los rangos de error se encuentran dentro de los límites esperados.

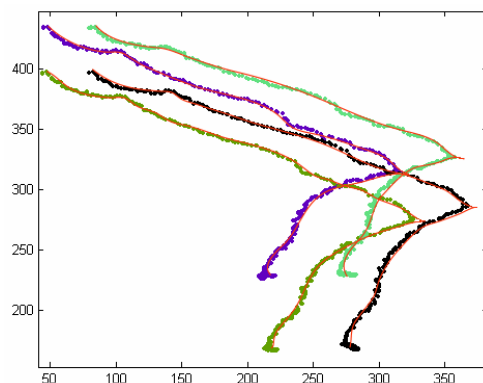


Figura 11: Trayectoria deseada y real en la imagen

La evolución de las velocidades de traslación que se aplican al robot durante el transcurso de la trayectoria se muestra en la Figura 12.

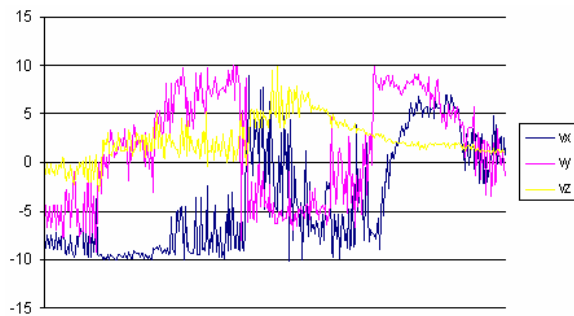


Figura 12: Evolución con el tiempo de la velocidad aplicada al robot

6 CONCLUSIONES

Un aspecto que caracteriza a los sistemas de control visual clásicos basados en imagen es que se puede especificar la posición final del robot respecto a un objeto del entorno, sin embargo, no es posible especificar la trayectoria que describirá el robot desde la localización inicial a la final en el espacio 3-D. Mientras que en el espacio de la imagen la trayectoria de las características tienden a seguir una línea recta, en el espacio cartesiano 3-D esta trayectoria es impredecible y, a menudo describe una parábola entre las configuraciones inicial y final. La aproximación descrita en este artículo permite realizar el seguimiento de las trayectorias en la imagen obteniendo así mismo un correcto comportamiento en el espacio Cartesiano 3-D.

Los sistemas de control visual aplicados hasta la actualidad para el seguimiento de trayectorias se caracterizan por el hecho de tener un comportamiento dependiente del tiempo, de forma que la referencia del sistema de control es una función variable con el tiempo. Esto provoca que no se pueda asegurar un correcto seguimiento de la trayectoria deseada debido a la necesidad de mantener las restricciones temporales. La técnica de control visual basada en flujo de movimiento descrita en este artículo permite llevar a cabo este seguimiento evitando las limitaciones de los sistemas anteriores dependientes del tiempo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto DPI2002-02103 “Desensamblado automático selectivo para reciclado mediante robots y sistema multisensorial”.

Referencias

- [1] Corke, P. I., (1993) “Visual control of robot manipulators – a review”. Visual servoing. K. Hashimoto, Ed. Singapore: World Scientific. Pp. 1-31.
- [2] Hashimoto, K., (1993) Visual Servoing: Real Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback. World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, vol 7, World Scientific Press, Singapore.
- [3] Hutchinson, S., Hager, G. D., Corke, P.I., (1996) “A tutorial on visual servo control”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp.651-670.
- [4] Lotufo, R., Zampiroli, F., (2001) “Fast multidimensional parallel euclidean distance transform based on mathematical morphology”, In *Proceedings of SIBGRAPI 2001, XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, pp. 100-105.
- [5] Mezouar, Y., Chaumette, F., (2002) “Path Planning For Robust Image-based Control”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 4. pp. 534-549.
- [6] Pomares, J., Torres, F., Puente, S. T., (2001) “Disassembly movements for geometrical objects through heuristic methods”. *Proc. SPIE Int. Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*. vol. 4569, pp. 71-80.
- [7] Puente, S. T., Torres, F., Pomares, J., (2001) “Product disassembly scheduling using graph models”. *Proc. SPIE Int. Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*, vol. 4569, pp. 63-70.
- [8] Serra, J., (1981) Image Analysis and Mathematical Morphology. Academic Press.
- [9] Serra, J., (1988) Image Analysis and Mathematical Morphology. Theoretical Advances. Academic Press.
- [10] Soatto, S., Frezza, R., Perona, P., (1996) “Motion estimation via dynamic vision”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 41, no. 3, pp. 393-413.
- [11] Wunsch, P., Hirzinger, G., (1997) “Real-time visual tracking of 3-d objects with dynamic handling of occlusions”, In *International Conference on Robotics and Automation*. pp. 2868-2873.