

SIMULACIÓN DEL SERVO CONTROL VISUAL DE UN ROBOT DE 2GDL

N. García, J.M. Sabater, R. Ñeco, C. Fernández, L.M. Jiménez
Universidad Miguel Hernández
Av. Ferrocarril s/n Edificio Torreblanca
03200 Elche (Alicante)
nicolas.garcia@umh.es

Resumen

En el siguiente trabajo se presenta un esquema de servo control visual de un Robot Scara de dos grados de libertad. El artículo recoge una serie de simulaciones realizadas en Simulink en base al esquema de control propuesto. Así mismo se presentan las distintas arquitecturas de control visual y se encuadra el modelo presentado dentro del servo control visual basado en características de la imagen.

Palabras Clave: Robótica, Visión artificial, Control, Control visual.

1. Introducción

Actualmente es cada vez mayor el número de robots que se van incorporando a la industria, al sector servicios, etc. Sin embargo, la aplicación de un robot para realizar una determinada tarea depende en un elevado porcentaje del conocimiento a priori del espacio de trabajo y de la localización de los objetos a manipular. Esta limitación es debida a que los robots industriales comerciales no integran sistemas sensoriales, que les permitan adaptarse a su entorno.

Dentro de los sistemas sensoriales adaptables a los robots industriales comerciales, los sistemas de visión artificial tiene como ventaja principal mimetizar el sistema de visión humano y permitir, entre otras cosas, obtener medidas del espacio de trabajo del robot sin necesidad de contacto físico.

Ya en 1973 [1] se hace referencia al *control visual* de un manipulador describiendo como se puede utilizar la realimentación visual ("visual feedback") para corregir la posición de un robot incrementando con ello la exactitud en tareas de ensamblaje. A finales de los 70 el SRI

International realizó algunas aplicaciones en las cuales se utiliza realimentación visual para la inserción de tornillos y recoger piezas de una cinta transportadora[2][3]. En la actualidad se disponen de robots comerciales con controladores donde se integra la información proveniente de un sistema de visión formando una arquitectura en lazo abierto denominada *mirar-mover* ("look and move"). La viabilidad de estos sistemas depende en gran medida de la exactitud del sistema de visión y del robot.

Fue en 1979 [4] cuando se introdujo el concepto de controlar la posición de un robot en lazo cerrado mediante información visual, apareciendo por primera vez el término *servo control visual* ("Visual Servoing"). Se entiende por *servo control visual* el control a nivel de los servos del robot mediante la información visual proporcionada por el sistema de visión.

El servo control visual de robots manipuladores ofrece sustanciales ventajas cuando:

- Se trabaja en entornos en los cuales la posición del objeto es desconocida.
- Se requiere dotar a los robots de cierta flexibilidad.
- Se pretende mejorar la inexactitud propia de los robots manipuladores.

En el presente trabajo se desarrolla la simulación del servo control visual de un Robot Scara de dos grados de libertad basado en las características de la imagen. El lazo de control se cierra mediante la información visual de una cámara localizada en el extremo del robot, en la configuración denominada "*hand-eye*".

2. Estrategias de servo control visual

Se define servo control visual de un robot manipulador como el control de la posición y orientación (${}^0X_{t6}$, un vector de 6 elementos) final de la pinza de un robot mediante la información extraída de la imagen captada por una o varias cámaras. La cámara puede colocarse en una determinada posición observando la escena o bien en la pinza del robot. En ambos casos existirá una relación entre la posición de la cámara y la posición de la pinza del robot (${}^{t6}X_c$). La imagen del objeto en la cámara depende de la posición relativa entre la cámara y el objeto, (cX_t). (Figura 1)

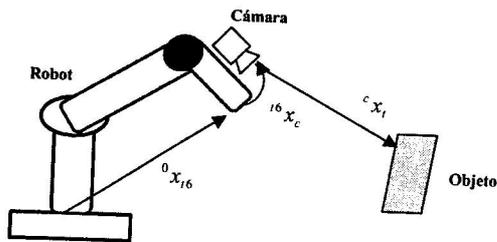


Figura 1: Relaciones entre los distintos sistemas de coordenadas envueltos en el servo control visual de un robot manipulador.

En 1980, Weiss y Sanderson [5][6] presentaron la primera clasificación de las diferentes estrategias de los sistemas con realimentación visual. Estas estrategias se muestran gráficamente en las figuras 2-5.

En una primera clasificación hay que diferenciar entre dos estrategias: estrategias de sistemas "look-and-move" y las de los sistemas "servo visuales". Un sistema dinámico "mirar y mover" es aquel en el que la estructura de control es jerárquica y utiliza el sistema de visión para proporcionar las entradas de referencia al controlador de las articulaciones que utiliza la realimentación de las variables articulares para controlar internamente el robot. Cabe destacar que la mayoría de los sistemas comerciales presentan la estructura dinámica "mirar y mover" debido entre otros motivos a: las bajas velocidades de muestreo de los sistemas de visión, disponibilidad de interfaces en los robots capaces de aceptar comandos de posición incremental o de velocidades traslacionales, etc (Ver Figuras 2-3). A diferencia de este tipo de sistemas, los sistemas servo visuales eliminan completamente el controlador de las articulaciones del robot reemplazándolo por un controlador servo visual que directamente calcula los valores de las

coordenadas articulares usando solamente la información proveniente del sistema de visión (Ver Figuras 4-5).

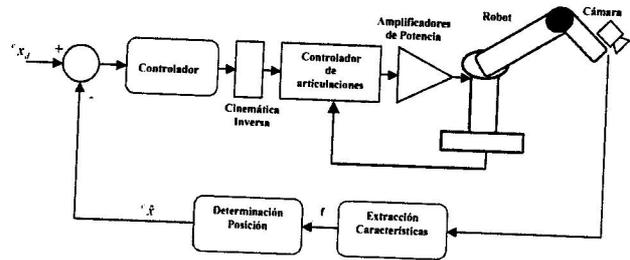


Figura 2: Estructura "mirar y mover" basada en posición.

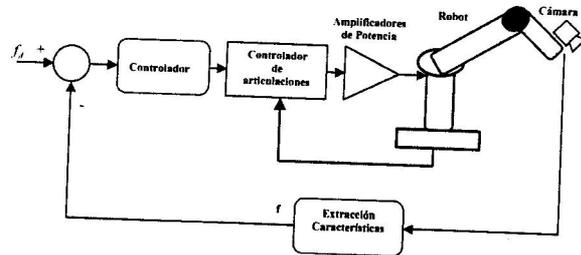


Figura 3: Estructura "mirar y mover" basada en características de la imagen.

Dentro de esta primera clasificación se podría realizar una segunda clasificación distinguiendo sistemas de control visual: basados en posición (Figuras 2 y 4) y los basados en la imagen (Figuras 3 y 5). En el control visual de robots basado en la *posición*, se extraen las características de la imagen, y utilizando la información obtenida de la imagen junto con el conocimiento del modelo geométrico del objeto se determina la posición del objeto respecto a la cámara. En el basado en la *imagen*, el último paso se omite, y el control se realiza en base a las características de la imagen directamente.

Las técnicas de control visual basadas en la imagen reducen el retardo computacional, ya que eliminan la necesidad de interpretar la imagen y los errores que se producen en la modelización del sensor y la calibración de la cámara.

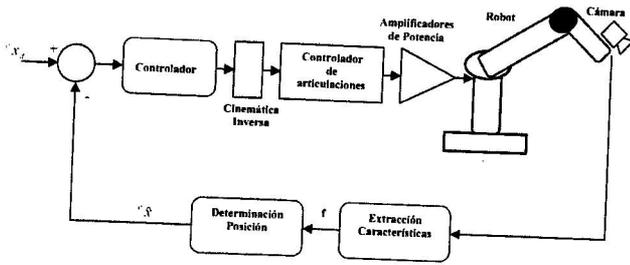


Figura 4: Estructura servo visual basada en posición.

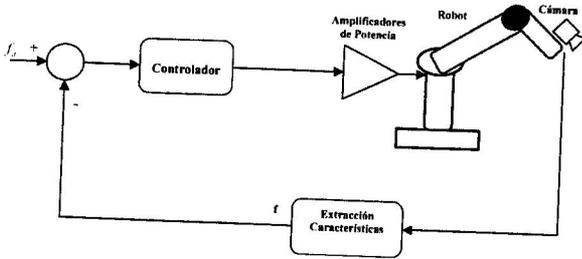


Figura 5: Estructura servo visual basada en características de la imagen.

3. Descripción del Robot

Como modelo se ha utilizado un Robot Scara industrial anulando el tercer grado de libertad (q_3), figura 6.

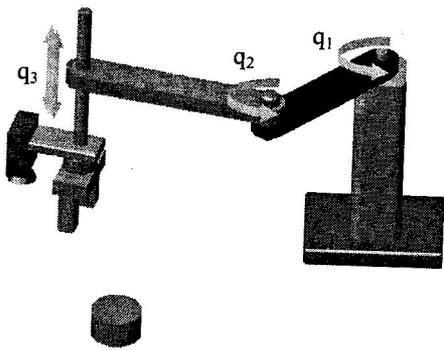


Figura 6: Robot Scara utilizado en las simulaciones anulando el tercer grado de libertad.

En el Robot Scara mostrado en la figura 6 se define un sistema de coordenadas cartesianas cuyo origen es el punto de intersección del eje de rotación de la articulación del hombro con el plano horizontal xy. En la figura 7 se puede observar las características principales (Tabla 1) utilizadas para implementar la cinemática y dinámica del robot [7].

	Descripción	Valor
l_1	Longitud del eslabón 1	0.45
r_1	Centro de masas del eslabón 1	0.091
m_1	Masa del eslabón 1	23.9
I_1	Inercia del eslabón 1	1.27
l_2	Longitud del eslabón 2	0.55
r_2	Centro de masas del eslabón 2	0.105
m_2	Masa del eslabón 2	4.44
I_2	Inercia del eslabón 2	0.24

Tabla 1: Valores de las constantes representadas en la figura 7.

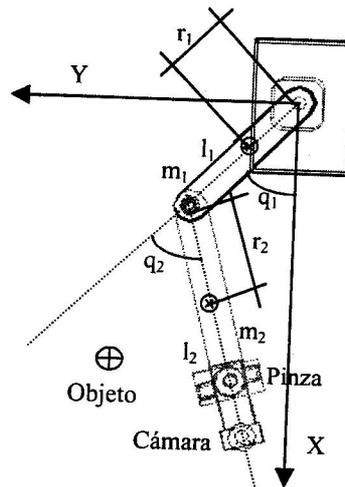


Figura 7: Robot Scara de dos grados de libertad.

3.1 Dinámica del robot

En la figura 8 se muestra el diagrama de bloques en Simulink de la dinámica directa de un robot de 2gdl [7]. Para implementar la dinámica del robot propuesto se ha utilizado el método de M.W.Walker y D.E.Orin [8] para la resolución del problema dinámico directo de una cadena cinemática abierta utilizando la formulación de N-E. De los métodos presentados en el artículo se utiliza el tercero de los presentados que es el más eficiente frente al tiempo de cómputo.

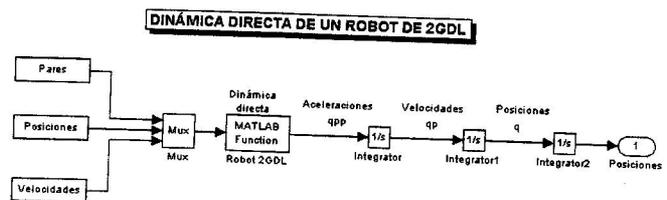


Figura 8: Dinámica directa de un Robot Scara de dos grados de libertad.

Walker y Orin resuelven la ecuación general del robot:

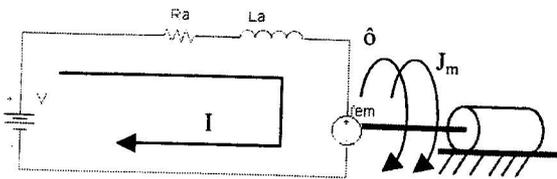
$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + K(q)^T k = \tau \quad (1)$$

donde:

- $H(q)$ Matriz no singular NxN de los momentos de inercia.
- $C(q, \dot{q})$ Matriz NxN que contabiliza los efectos de las aceleraciones centrífugas y de Coriolis.
- $G(q)$ Vector Nx1 que contabiliza los efectos de la gravedad.
- $K(q)$ Matriz Jacobiana 6xN que especifica los pares (fuerzas) creados en cada articulación debido a las fuerzas y momentos externos aplicados sobre el elemento N.
- k Vector 6x1 de los momentos y fuerzas externas ejercidos sobre el elemento N.
- τ Vector Nx1 de los pares (fuerzas) de cada articulación. (tau en los ejemplos anteriores).
- q Vector Nx1 de las variables articulares.

3.2 Modelo de los motores

Los motores de cada uno de los actuadores del Robot Scara objeto de este artículo se supondrá que se encuentran trabajando en régimen permanente [7]. El comportamiento dinámico del motor para régimen permanente se puede representar mediante el siguiente circuito eléctrico, como se observa en la figura y ecuaciones siguientes:



$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_v \omega \quad (2)$$

Siendo el par del motor es proporcional a la corriente circulante. ($\tau = k_t i$)

El diagrama de bloques del modelo es el siguiente:

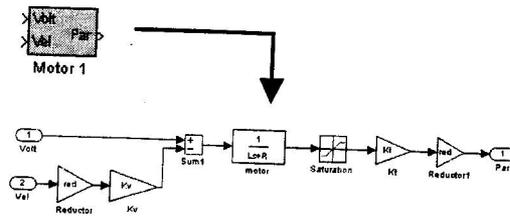


Figura 9: Diagrama de bloque del modelo de los motores en simulink

3.3 Selección de accionamientos, simulación y control del robot

Selección de accionamientos

Los parámetros del motor se obtienen una vez obtenido el par pico y el par nominal de cada una de las articulaciones. En función de estos datos y consultando catálogos de fabricantes de motores los parámetros para ambos motores son:

Parámetros	Descripción	Valor
Ra	Resistencia (Ohmios)	0.39
La	Inductancia (Henrios)	0.65E-3
Kv	V/rad/s	0.054
Kt	Nm/A	0.054
Imax	Corriente máxima (A)	25.3
Reductor	Relación de reducción	500

Tabla 2: Parámetros de los modelos de los motores.

Control del robot

Se ha implementado un control desacoplado. En dicho control se considera que las articulaciones del robot están desacopladas, de modo que un par en un determinado actuador únicamente tendrá efecto sobre el movimiento de la articulación correspondiente. De esta forma existirá un controlador para cada articulación. La ventaja del control desacoplado radica en que el diseño del regulador más adecuado para cada articulación puede hacerse utilizando las técnicas más frecuentes de diseño.

Simulación

Una vez definida la dinámica del robot, seleccionados los accionamientos y sintonizados los reguladores de cada articulación se realizó una simulación en Simulink del desplazamiento a una posición final del robot.

4. Descripción del sistema de visión

El sistema de control servo visual, presentado en este artículo, está basado en la información visual de una cámara localizada en la pinza del robot, en la configuración denominada "hand-eye". El modelo de la cámara utilizada en este artículo es un modelo idealizado sin considerar distorsiones ni aberraciones ópticas y utilizando el modelo pin-hole para modelizar la lente.

El proceso de formación de la imagen se ha modelizado utilizando la proyección de perspectiva. Una transformación perspectiva proyecta puntos del espacio (3D) en el plano de imagen del sensor (Figura 10).

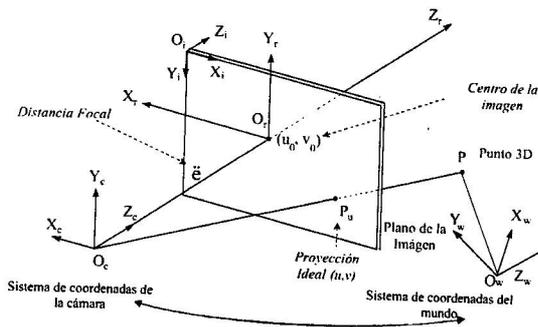


Figura 10: Formación de la imagen

Un punto en el espacio tiene por coordenadas $[{}^w p_x, {}^w p_y, {}^w p_z]$ respecto del sistema de coordenadas del mundo y $[{}^c p_x, {}^c p_y, {}^c p_z]$ respecto del sistema de coordenadas de la cámara. Un punto p de coordenadas $[{}^c p_x, {}^c p_y, {}^c p_z]^T$ se proyectará sobre el plano de la imagen en un punto de coordenadas $[u, v]^T$, según la expresión

$$\xi = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \alpha \frac{\lambda}{c p_z} \begin{bmatrix} c p_x \\ c p_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

siendo:

- λ Distancia focal
- α Factor de escala (píxeles/m)

5. Controlador basado en el Jacobiano Transpuesto

En esta sección se presenta un controlador basado en el Jacobiano Transpuesto para implementar el servo control visual de un robot manipulador de 2 gdl en el cual la cámara que proporciona la

realimentación visual está montada en la pinza del robot.

5.1 Características de la imagen

El control visual basado en las características de la imagen utiliza directamente ciertas características de la imagen como realimentación. El vector de características de la imagen puede estar compuesto por coordenadas de vértices, áreas de caras del objeto, centroides, etc.

En el caso de un robot con una cámara montada en la pinza del robot, las características serán función de la posición relativa de la cámara

respecto al objeto, ${}^c x_t$ (Figura 1). Esta función es no lineal y acoplada de forma que el movimiento de la pinza del robot será el resultado del movimiento de muchas características. Por ejemplo, la rotación de la cámara puede causar la traslación horizontal y vertical de las características en el plano de la imagen.

En el trabajo presentado en este artículo se ha seleccionado como característica el centroide de un objeto cilíndrico situado en un plano paralelo al plano de la imagen de la cámara.

5.2 Jacobiano Transpuesto

Siendo ${}^w p_o = [{}^w p_x, {}^w p_y, {}^w p_z]$ las coordenadas de la posición del objeto respecto del sistema de coordenadas del mundo situado en la base del robot y ${}^w p_{corg}$ las coordenadas del origen del sistema de referencia de la cámara respecto al sistema de coordenadas del mundo se puede concluir que cuando el objeto está estático,

$${}^c p_o = {}^c R_w * ({}^w p_o - {}^w p_{corg}) \quad (4)$$

siendo,

$${}^c R_w = ({}^w R_c)^T = (R_1 \cdot R_2)^T \quad (5)$$

donde:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\text{sen}(q_1) & 0 \\ \text{sen}(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\text{sen}(q_2) & 0 \\ \text{sen}(q_2) & \cos(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como ${}^w p_{corg}$ se puede expresar como:

$${}^w P_{corg} = \begin{bmatrix} l1 * \cos(q_1) + l2 * \cos(q_1 + q_2) \\ l1 * \sin(q_1) + l2 * \sin(q_1 + q_2) \\ a2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5) y (7) en (4) y en (3) se obtiene que

$$\xi = f(q, {}^c p_z, \alpha, \lambda) \quad (8)$$

Derivando la expresión $\xi = f(q, {}^c p_z, \alpha, \lambda)$, se obtiene la siguiente relación:

$$\dot{\xi} = J(q, {}^c p_z, \alpha, \lambda) \dot{q} \quad (9)$$

se define J como el jacobiano con realimentación visual, cuya expresión se obtiene de derivar respecto a q_1 y q_2 la expresión (8),

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial q_1} & \frac{\partial u}{\partial q_2} \\ \frac{\partial v}{\partial q_1} & \frac{\partial v}{\partial q_2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Expresión que permite calcular la Δq en función de $\Delta \xi$:

$$\dot{q} = J^T(q, {}^c p_z, \alpha, \lambda) \dot{\xi} \quad (11)$$

donde, J^T se denomina Jacobiano Transpuesto con realimentación visual [10].

6. Formulación del problema de control

En el servo control visual presentado en este artículo, las variables a controlar son las características de la imagen de un determinado objeto [9]. Concretamente la variable a controlar es la posición del centroide de un objeto cilíndrico en el plano de la imagen.

El problema de control podría formularse como el diseño de un controlador basado en el jacobiano transpuesto con realimentación visual que permita calcular las Δq a aplicar al robot para conseguir que la pinza del manipulador se coloque en una posición tal que la posición del centroide del objeto alcance la posición deseada. El error de características de la imagen se puede definir como,

$$\tilde{\xi} = \xi_d - \xi \quad (12)$$

El objetivo del control será,

$$\lim_{t \rightarrow 0} \tilde{\xi}(t) = 0 \quad (13)$$

Se supone que el valor de ${}^c p_z$ es constante y conocido a priori.

7. Esquema de control propuesto

En el esquema de control propuesto se presenta el servo control visual de posición de un manipulador de 2 gdl. En dicho esquema en vez de calcular las tensiones a aplicar en los motores de cada una de las articulaciones para obtener unas determinadas posiciones articulares deseadas q_d , se formula el problema desde el punto de vista de obtener unas características de imagen deseadas ξ_d haciendo para ello que el error de características ($\tilde{\xi} = \xi_d - \xi$) tienda a cero.

En la figura 13, se muestra el diagrama de bloques en Simulink del servo control visual de un robot scara de 2gdl. En la figura se puede observar que se implementa un control proporcional a través de una matriz de ganancia $K_{p2 \times 2}$ simétrica y definida positiva.

8. Resultados obtenidos

A continuación se presentan las simulaciones realizadas en base al esquema del servo control visual de la figura 13. En las simulaciones recogidas en este punto se considera un objeto estático situado en la posición (0.5,0.2) en un plano XY paralelo al plano de la imagen a una distancia de este de 0.75m. La característica deseada, centroide del objeto, es $\xi_d = (u,v) = (0,0)$, siendo en el instante inicial ($\xi(0)$) la correspondiente a la posición inicial del robot dada por sus posiciones articulares iniciales $q_1 = 0$ y $q_2 = 0$.

En la figura 14 se muestra la evolución temporal del error de características $\tilde{\xi} = \xi_d - \xi$ para una matriz de ganancia simétrica de valor:

$$K_p = \begin{bmatrix} 400 & 0 \\ 0 & 400 \end{bmatrix} \quad (14)$$

SIMULACIÓN CONTROL VISUAL BASADO EN CARACTERÍSTICAS DE LA IMAGEN DE UN ROBOT DE 2GDL

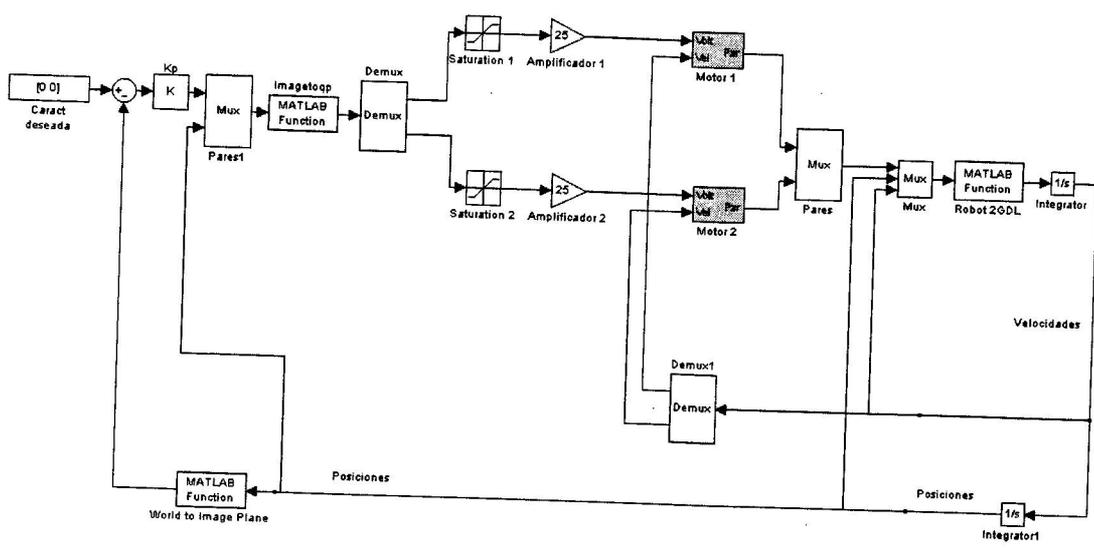


Figura 13: Diagrama de bloques en Simulink del servo control visual de un robot scara de 2 gdl.

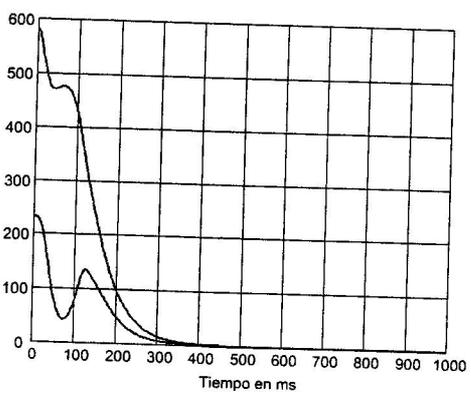


Figura 14: Evolución temporal del error de características $\tilde{\xi} = \xi_d - \xi$.

En la figura 15 se muestra la trayectoria seguida por el origen del sistema de coordenadas de la cámara en coordenadas del sistema de referencia del mundo. En esta figura sólo se muestra la variación de las coordenadas X e Y ya que la Z permanece constante e igual a 0.75 m. El punto de partida se considera para $q_1 = 0$ y $q_2 = 0$ ($X = 1$ m e $Y = 0$) y la trayectoria termina en el punto (0.5, 0.2) donde se encuentra localizado el objeto.

En la figura 16 se muestra la trayectoria de las características (centroide del objeto) en el plano

de la imagen. El punto final de esta trayectoria coincide con la entrada $[\xi_d = (0,0)]$ del esquema de control propuesto en este artículo, figura 13.

En la figura 17 se recoge la variación temporal de la coordenada u del error de las características de la imagen para distintos valores de la matriz de ganancia K_p . En la Tabla 3 se recoge los valores de las matrices de ganancia K_p a las cuales se hace referencia en la figura 17.

Matrices	Valor
K_{p1}	$\begin{bmatrix} 400 & 0 \\ 0 & 400 \end{bmatrix}$
K_{p2}	$\begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 600 \end{bmatrix}$
K_{p3}	$\begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$
K_{p4}	$\begin{bmatrix} 5000 & 0 \\ 0 & 5000 \end{bmatrix}$
K_{p5}	$\begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$

Tabla 3: K_p representadas en la figura 17.

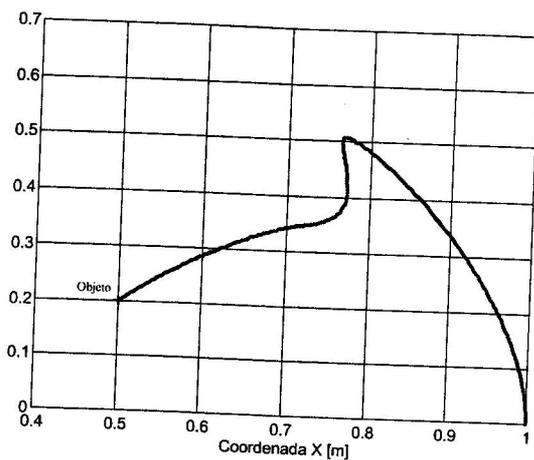


Figura 15: Trayectoria del origen de sistema de coordenadas de la cámara en el sist. de coordenadas del mundo.

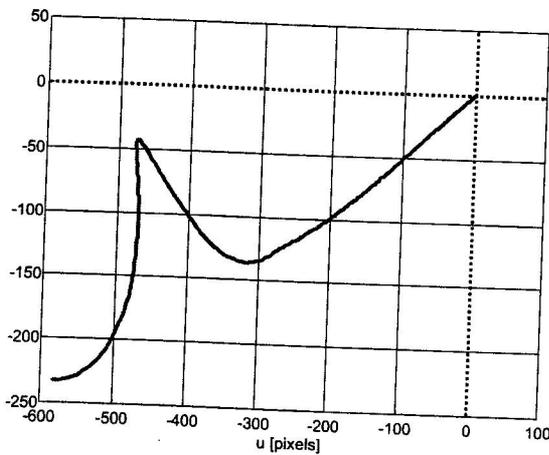


Figura 16: Trayectoria de las características en el plano de la imagen ξ .

8. Conclusiones

En el presente artículo se ha presentado un sistema de servo control visual basado en las características de la imagen. Este sistema realiza un control de posición de un Robot Scara mediante el uso del Jacobiano transpuesto con realimentación visual.

El Jacobiano transpuesto con realimentación visual permite relacionar las variaciones del error de características con las variaciones de las posiciones articulares del robot. En este artículo se ha demostrado que con un simple control proporcional se puede alcanzar resultados óptimos

eligiendo convenientemente el valor de la matriz de ganancia proporcional.

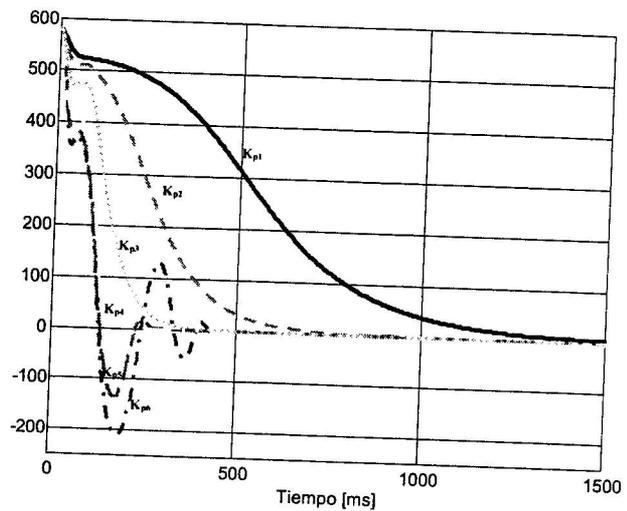


Figura 17 Variación temporal de u para distintos valores de la matriz de ganancia proporcional.

Referencias

- [1] Y. Shirai, H. Inoue, "Guiding a robot by visual feedback assembling tasks" Pattern Recognit., vol 5, pp. 99-108, 1973.
- [2] C. Rosen et al. Machine intelligence research applied to industrial automation. Six report. Technical report, SRI International, 1976
- [3] C. Rosen et al. Machine intelligence research applied to industrial automation. Eighth report. Technical report, SRI International, 1978
- [4] J. Hill, W. T. Park, "Real time control of a robot with a mobile camera" Proc. 9th ISIR. Washington D.C. Mar. 1979, pp. 233-246
- [5] A. C. Sanderson and L.E. Weiss. Image-based visual servo control using relation graph error signals. Proc. IEEE, pp. 1074-1077, 1980
- [6] Weiss L.E., Sanderson, Neuman. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.3, No. 9, 1987, pp. 404-417, 1987.
- [7] R. Saltarén, JM^a Azorín, JM^a Sabater, M. Almonacid, Prácticas de Robótica Ed. Universidad Miguel Hernández ISBN: 84-95315-59-9
- [8] Walker, M. W., Orien, D. E., "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms", Journal of Dynamic Systems,

Measurement, and Control, pp. 205-211, 1982

[9] K. Hashimoto et al., "Imaged- based dynamic visual servo for a hand-eye manipulator". In MTNS-91, Kobe, Japan, 1991, pp. 609-614

[10] O. Naisisi "Control Dinámico Servo Visual de Manipuladores Robóticos". Tesis Doctoral Universidad Nacional de San Juan, Marzo de 1998.