

# SEGUIMIENTO DE OBJETOS A ALTA VELOCIDAD MEDIANTE UN ROBOT PARALELO

L. Pari<sup>1</sup>, L. Angel<sup>2</sup>, F. Sánchez<sup>1</sup>, F. Roberti<sup>3</sup>, J.M. Sebastián<sup>1</sup>, y R. Carelli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial (DISAM)  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid  
C/ José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, España.*

<sup>2</sup>*Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana  
Km. 7 Vía de Piedecuesta, Bucaramanga, Colombia.*

<sup>3</sup>*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan  
Av. San Martín Oeste 1109, 5400 San Juan, Argentina.*

[lpari@etsii.upm.es](mailto:lpari@etsii.upm.es), [langel@etsii.upm.es](mailto:langel@etsii.upm.es), [felixhuco2003@yahoo.es](mailto:felixhuco2003@yahoo.es), [jsebas@etsii.upm.es](mailto:jsebas@etsii.upm.es),  
[rcarelli@inaut.unsj.edu.ar](mailto:rcarelli@inaut.unsj.edu.ar)

**Resumen:** *El artículo describe el sistema de control visual del robot paralelo Robotenis. El sistema ha sido diseñado y construido para realizar tareas en entornos dinámicos tridimensionales con objetos dotados de un movimiento de hasta 1 m/s, como por ejemplo el seguimiento de una pelota de ping-pong. El robot dispone de un sistema de visión que incluye una única cámara de alta velocidad situada en el extremo del mismo, y que permite cerrar el bucle de control visual cada 8.33 ms. Los resultados obtenidos muestran errores de seguimiento menores de 20 mm.*

**Palabras clave:** Control Visual, Robot Paralelo, Seguimiento de objetos

## 1. INTRODUCCIÓN.

La utilización de los sistemas de visión en las aplicaciones de la robótica aporta una información extremadamente útil sobre los objetos presentes en el área de trabajo, permitiendo tanto conocer la posición y orientación de los mismos, como reconocerlos. Sin embargo la integración de estos sistemas en tareas dinámicas presenta muchos aspectos no resueltos correctamente en la actualidad, y que son motivos de investigación en los principales centros de investigación (Kragic, 2005). Entre ellos cabe destacar el diseño de estrategias de control visual de robots en tareas de seguimiento de objetos a alta velocidad, como las desarrolladas en la Universidad de Tokio (Kaneko, 2003; Senoo, 2004).

Con el fin de poder estudiar e implementar distintas estrategias de control visual, el Grupo de Visión por Computador de la Universidad Politécnica de Madrid optó por el diseño y la construcción de la plataforma Robotenis. Dicha plataforma (Figura 1), es un robot paralelo de tres grados de libertad, con una estructura abierta para el control, que ha permitido la realización de tareas dinámicas a alta velocidad. En el presente artículo se describen las pruebas efectuadas en el seguimiento de un objeto (una pelota de ping-pong) que se mueve libremente con velocidad de hasta 1 m/s. Está prevista la realización de seguimientos a una mayor velocidad, y la realización de tareas que impliquen el golpeo de la pelota.

En términos generales, un robot paralelo consta de dos plataformas unidas por más de una cadena

cinemática cerrada. Esta estructura presenta diversas ventajas con respecto a un robot serie, como son una mayor rigidez, precisión, capacidad de carga, velocidad y una menor inercia de los motores. La principal desventaja radica en la disminución del espacio de trabajo (Ángel, 2005a).

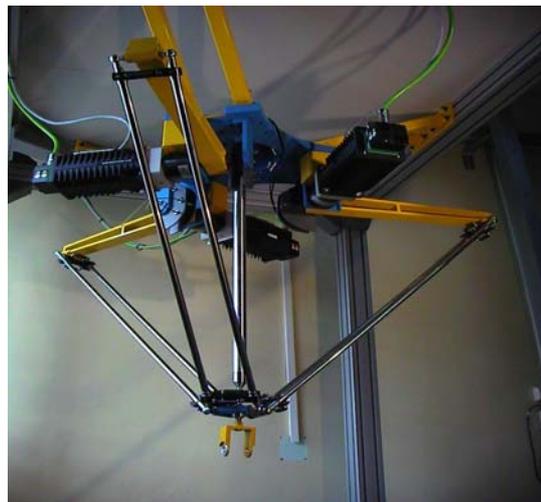


Figura 1. Sistema RoboTennis

La estructura mecánica del sistema RoboTennis está inspirada en el robot DELTA (Clavel, 1988). El modelo cinemático, la matriz Jacobiana y el diseño óptimo del sistema Robotenis han sido presentados en trabajos previos (Ángel, 2005c). La estructura del robot ha sido optimizada tanto desde el punto de vista cinemático como dinámico. Así el método de

diseño resuelve dos dificultades: La determinación de las dimensiones del robot y la selección de los actuadores. El análisis dinámico y el control articular han sido presentados en Ángel (2005b) y Ángel (2005d). El modelo dinámico está basado en los multiplicadores de Lagrange e incorpora la influencia de las inercias de los antebrazos en el desarrollo de las estrategias de control. El sistema posee dos lazos de control. Uno interno basado en la información articular, que se ejecuta cada 0.5 ms, y que incorpora el modelo dinámico en un lazo de prealimentación y un PD en el lazo de realimentación. Otro externo, basado en la información visual, que se ejecuta cada 8.33 ms, y que se describe con más detalle en el presente trabajo.

El artículo se estructura de la siguiente forma: Tras la presente introducción, en el apartado segundo se describe brevemente el sistema Robotenis, ahondándose en el apartado tercero en el algoritmo de control visual propuesto e implementado. En el apartado cuarto se describen algunos de los resultados obtenidos en el seguimiento de la pelota, mientras que en el apartado quinto se resaltan las conclusiones obtenidas.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ROBOTENIS

En este apartado se describe el entorno de pruebas, los elementos que componen al sistema Robotenis y sus características funcionales. Más información se puede consultar en (Ángel, 2005a).

### 2.1 Entorno de pruebas.

El objetivo definido para el sistema es que la pinza del robot sea capaz de seguir a una distancia de 600 mm a una pelota de ping pong sujeta con un hilo de la estructura fija (ver Figura 2) y que se mueva a una velocidad cercana a 1 m/s. A fin de facilitar la ejecución del control visual se ha optado por emplear una pelota de color negro sobre fondo blanco.



Figura 2. Cámara y entorno de trabajo

### 2.2 Sistema de visión.

El sistema Robotenis posee una cámara en el extremo del robot (ver Figura 2). La ubicación de la cámara combina la adquisición de un amplio campo visual, cuando el robot está alejado del objeto, con una adquisición más precisa cuando el robot está cerca del objeto. Este aspecto es muy importante para futuras aplicaciones del sistema, como puede ser

golpear o coger una pelota. A destacar los siguientes aspectos:

La cámara utilizada es la Sony XC-HR50, que permite la adquisición de imágenes en 8.33 ms, con resolución de 240 x 640 píxeles, con escaneado progresivo y un tiempo de integración de 1 ms.

La tarjeta de adquisición utilizada ha sido la Matrox Meteor 2-MC/4. Permite la adquisición en modo doble buffer (adquisición simultánea con el procesamiento de la imagen previa), fundamental para ejecutar el bucle de control visual en 8.33 ms.

Procesamiento de imágenes. Una vez adquirida la imagen el sistema realiza la segmentación de la pelota sobre el fondo blanco. Como características visuales se calculan el centroide de la pelota y el diámetro de la misma, todas ellas con precisión subpíxel. Mediante una calibración previa es posible determinar la posición espacial de la pelota. El algoritmo de control implica el conocimiento de la velocidad de la pelota, que se estima mediante un filtro de Kalman (Gutiérrez, 2005).

### 2.3 Sistema de control.

El hardware de control está formado por una tarjeta dSPACE 1103. En ella se ejecutan: la generación de trayectorias, el cálculo de los modelos cinemático y dinámico del manipulador, así como la implementación de los algoritmos de control. El sistema de accionamiento utilizado está compuesto por servomotores brushless AC (Unimotor), variadores de velocidad (Unidrive SP) y elementos reductores (más información en (Ángel, 2005a).

### 2.4 Características funcionales.

El control visual desarrollado está condicionado por las características propias de la aplicación y del sistema RoboTennis. Así es necesario destacar la alta incertidumbre en los datos suministrados por el sistema de visión. El bajo período de muestreo (8,33 milisegundos) convierte un error de 0,25 píxeles en una variación de 1 m/s en la velocidad de la pelota, muy elevada para la necesaria continuidad del movimiento del robot, como impone el planificador para evitar aceleraciones elevadas. Igualmente el sistema RoboTennis posee, como cualquier sistema real, diversas limitaciones que deben de ser tenidas en cuenta en la estrategia de control para poder asegurar el éxito de la misma. Las dos principales son los retrasos y las saturaciones. Existe un retraso entre los datos suministrados por la cámara y los obtenidos por los sensores articulares, estimado en 2 periodos de muestreo (16,66 milisegundos). Está motivado por la integración de la información luminosa, su transmisión y procesamiento.

## 3. CONTROL VISUAL DEL SISTEMA ROBOTENIS

Los sistemas de coordenadas definidos se muestran

en la Figura 3.  $\Sigma_w$ ,  $\Sigma_e$ , y  $\Sigma_c$  son los sistemas del mundo, del extremo del robot y de la cámara.  ${}^c p_b$  es la posición relativa de la pelota con respecto al sistema de coordenada de la cámara, y  ${}^w p_e$  es la posición relativa del extremo del robot con respecto al sistema de coordenadas del mundo, conocida a través de la cinemática directa. Se suponen conocidas y constantes las matrices  ${}^w R_e$ ,  ${}^w R_c$ ,  ${}^e R_c$  y  ${}^e T_c$ , a través de las calibraciones del sistema.

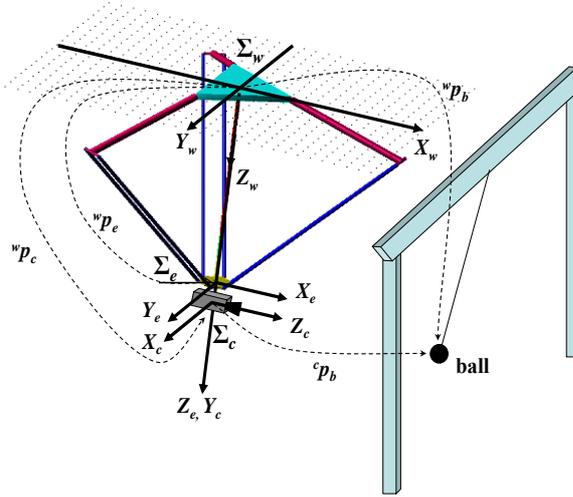


Figura 3. Sistemas de coordenadas involucradas

De entre las distintas alternativas existentes, se ha elegido la utilización de un control basado en posición. Como se aprecia en el esquema básico de la Figura 4, la función de error se obtiene comparando la posición deseada del objeto ( ${}^c p_b^*$ ) que en la presente aplicación se supone constante, con la posición obtenida por el sistema de visión ( ${}^c p_b(k)$ ). El controlador proporciona la velocidad deseada para el efector final. A través de un planificador en el espacio cartesiano y empleando la matriz Jacobiana del robot se obtiene la variación articular del robot. La variable  $k$  indica el instante de muestreo.

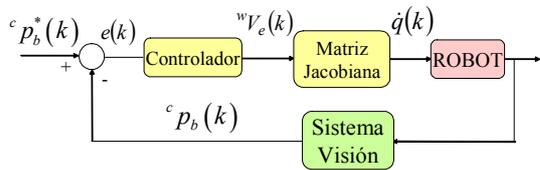


Figura 4 Control visual basado en posición

### 3.1 Modelo utilizado.

El error se define como (ver Figura 4):

$$e(k) = {}^c p_b^* - {}^c p_b(k) \quad (1)$$

La posición de la pelota en el sistema de coordenadas de la cámara se puede expresar como:

$${}^c p_b(k) = {}^c R_w ({}^w p_b(k) - {}^w p_c(k)) \quad (2)$$

Por lo que sustituyendo se obtiene

$$e(k) = {}^c p_b^* - {}^c R_w ({}^w p_b(k) - {}^w p_c(k)) \quad (3)$$

Para asegurar que el error decrezca exponencialmente, supuesto estable, se elige

$$\dot{e}(k) = -\lambda e(k) \quad \text{con } \lambda > 0 \quad (4)$$

Derivando la ecuación (3), y teniendo en cuenta que  ${}^c R_w$  es constante, se obtiene:

$$\dot{e}(k) = -{}^c R_w ({}^w v_b(k) - {}^w v_c(k)). \quad (5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (5) en (4):

$${}^w v_c(k) = {}^w v_b(k) - \lambda {}^c R_w^T [{}^c p_b^* - {}^c p_b(k)] \quad (6)$$

Donde  ${}^w v_c(k)$  y  ${}^w v_b(k)$  representan las velocidades de la cámara y de la pelota respectivamente. Ya que  ${}^w v_e(k) = {}^w v_c(k)$  la ley de control puede ser expresada como:

$${}^w v_e(k) = {}^w v_b(k) - \lambda {}^c R_w^T [{}^c p_b^* - {}^c p_b(k)]. \quad (7)$$

La ecuación (7) posee dos componentes: Una de predicción de la velocidad de la pelota ( ${}^w v_b(k)$ ) y otra de error de seguimiento ( $[{}^c p_b^* - {}^c p_b(k)]$ ). Su ejecución implica un conocimiento exacto de todas las componentes, algo que no será posible. Una aproximación más realista es la siguiente:

$${}^w v_e(k) = {}^w \hat{v}_b(k) - \lambda {}^c R_w^T [{}^c p_b^* - {}^c \hat{p}_b(k)] \quad (8)$$

Donde las variables estimadas son utilizadas en lugar de las reales.

### 3.2 Ajuste del parámetro $\lambda$ .

Un aspecto fundamental para el correcto funcionamiento del algoritmo de control visual es el ajuste del parámetro  $\lambda$ . En el presente trabajo se propone el cálculo de dicho algoritmo usando un algoritmo predictivo que intenta lograr el objetivo de control ( ${}^c p_b(k) = {}^c p_b^*$ ) en el menor número de muestras, teniendo en cuenta las limitaciones del sistema.

La posición futura de la pelota en el sistema de coordenadas del mundo en el instante  $k+n$  será:

$${}^w \hat{p}_b(k+n) = {}^w \hat{p}_b(k) + {}^w \hat{v}_b(k)Tn \quad (9)$$

Donde  $T$  es el período de muestreo (8.33 ms). Además la posición futura de la cámara en el sistema de coordenadas del mundo en el instante  $k+n$  será:

$${}^w p_c(k+n) = {}^w p_c(k) + {}^w v_c(k)Tn \quad (10)$$

Si la ley de control pretende que se anule el error en el menor tiempo posible, teniendo en cuenta la ecuación (2), y sustituyendo las ecuaciones (9) y (10) para  $k+n$ , en la ecuación (1), se cumplirá:

$${}^c p_b^* - {}^c R_w \left( {}^w \hat{p}_b(k+n) - {}^w p_c(k+n) \right) = 0 \quad (11)$$

Sustituyendo (9) y (10) en (11), se obtiene:

$${}^c p_b^* = {}^c R_w \left[ {}^w \hat{p}_b(k) + {}^w \hat{v}_b(k) T n - {}^w p_c(k) - {}^w v_c(k) T n \right] \quad (12)$$

Ya que  ${}^w v_e(k) = {}^w v_c(k)$ , la velocidad del extremo del robot se puede despejar, teniendo en cuenta la ecuación (2), obteniéndose la expresión:

$${}^w v_e(k) = {}^w \hat{v}_b(k) - \frac{1}{T n} {}^c R_w^T \left[ {}^c p_b^* - {}^c \hat{p}_b(k) \right]. \quad (13)$$

Comparando las ecuaciones (8) y (13), se define el parámetro  $\lambda$  como:

$$\lambda = \frac{1}{T n}. \quad (14)$$

La ecuación (14) suministra una opción para ajustar el parámetro  $\lambda$  cumpliéndose la función objetivo en el menor número de muestras posible ( $n$ ).

### 3.3 Algoritmo implementado.

La anterior arquitectura no considera las limitaciones físicas del sistema: Los retrasos y las posibles saturaciones motivadas por las velocidades máximas del robot. En la Figura 5, se representa un esquema de control que incorpora y tiene en cuenta estas limitaciones. El término  $z^{-r}$  representa un retraso de  $r$  periodos para las señales de control. En el presente sistema se asume que la información suministrada por el sistema de visión ( ${}^c p_b(k)$ ), posee un retraso de  $r=2$  periodos con respecto a la información

articular suministrada por el sistema de control. Así la futura posición de la pelota se expresará como:

$${}^w \hat{p}_b(k+n) = {}^w \hat{p}_b(k-r) + {}^w \hat{v}_b(k-r) T(n+r) \quad (15)$$

Mientras que la futura posición de la cámara vendrá expresada por la ecuación (10).

La ecuación (14) permite ajustar el parámetro  $\lambda$  de la ley de control, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La ecuación (13) suministra la velocidad deseada del robot, que evidentemente no podrá sobrepasar la máxima velocidad permitida, lo que obligará a un ajuste del mínimo número de muestras en el que se puede cumplir la función objetivo. Este número será distinto para cada eje del robot, por lo que habrá que considerar el más restrictivo (el mayor), y se empleará en el cálculo del parámetro  $\lambda$ .
- A fin de lograr la mayor continuidad posible en la velocidad del robot, lo que facilita la labor del planificador de trayectorias que suministra la consigna al bucle interno basado en la información articular, se ajustará los parámetros  $\lambda$  de los ejes menos restrictivos, al número de muestras más restrictivo. Así se evitan pequeñas paradas de los motores, que impedirían el correcto funcionamiento del sistema

### 3.4 Estabilidad del sistema.

No forma parte de los objetivos del presente trabajo el estudio detallado de la estabilidad del sistema. Las aproximaciones realizadas en el modelado del sistema, así como la utilización de valores estimados para la posición y velocidad de la pelota, unido a las saturaciones y no linealidades del sistema aumenta significativamente la complejidad del análisis. Tan sólo se ha tenido en cuenta que supuesto el sistema estable la ley de control diseñada obligue a que el error disminuya exponencialmente (ecuación (4)).

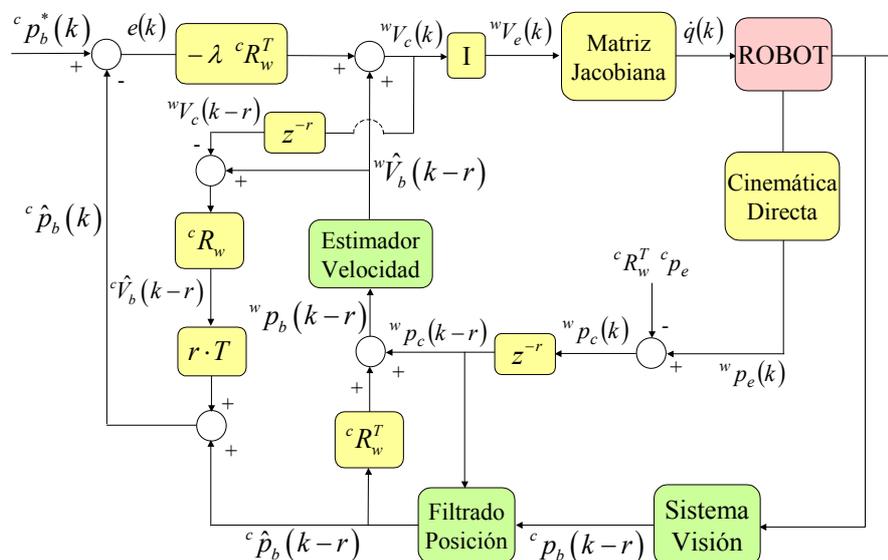


Figura 5. Arquitectura de control visual propuesta

La estabilidad asintótica se garantizará si no hay error en la medición y en la estimación, y se considera solo la cinemática del robot despreciando su dinámica (lo que es equivalente a decir que las velocidades articulares son ejecutadas instantáneamente por los actuadores).

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente apartado se describen las pruebas realizadas en el seguimiento de un objeto a alta velocidad (hasta 1 m/s) con el sistema Robotenis. El objetivo de control es que el extremo del robot permanezca a una distancia fija  $([0, 0, 600]^T \text{ mm})$  de la pelota. La pelota se sujeta a la estructura mediante una cuerda, y con un arrastre manual realiza distintas trayectorias.

##### 4.1 Índices de seguimiento.

El caótico movimiento de la pelota en el extremo de la cuerda dificulta el estudio sistemático de las pruebas, ante la dificultad para poder repetir las mismas con distintos algoritmos de control. A tal fin se han definido dos índices de seguimiento basados en el error de seguimiento (diferencia entre la posición deseada de la pelota y la real) y la estimación de la velocidad de la pelota.

- *Relación de seguimiento:* Se define como la relación entre la media del módulo del error de seguimiento y la media del módulo de la velocidad estimada de la pelota. Permite aislar la influencia de la velocidad sobre el error de seguimiento. Se expresa en mm / mm/s.

$$\text{Relación de seguimiento} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|e(k)\|}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|{}^w \hat{v}_b(k)\|} \quad (16)$$

- *Media por franjas del módulo del error de seguimiento en función del módulo de la velocidad estimada de la pelota.* Los límites inferiores y superiores del módulo de la velocidad de la pelota son 0, 200, 400, 600, 800 y 1000 mm/s. Se expresa en milímetros

##### 4.1 Leyes de control estudiadas.

Se han realizado pruebas con dos leyes de control:

- *Ley de control proporcional.* No se considera la componente predictiva de la ecuación (8).

$${}^w v_e(k) = -\lambda {}^c R_w^T [{}^c p_b^* - {}^c \hat{p}_b(k)]. \quad (17)$$

- *Ley de control predictiva.* Se considera la componente predictiva de la ecuación (8).

$${}^w v_e(k) = {}^w \hat{v}_b(k) - \lambda {}^c R_w^T [{}^c p_b^* - {}^c \hat{p}_b(k)]. \quad (18)$$

La Tabla 1 y la Tabla 2 representan los resultados obtenidos para los anteriores índices cuando se aplican las dos leyes de control. Los datos numéricos se han obtenido haciendo las medias de 10 pruebas para cada algoritmo. Se observa claramente un mejor comportamiento de la estructura predictiva, que ocasiona una menor relación de seguimiento y un menor error por franjas.

Tabla 1. Relación de seguimiento para las leyes de control proporcional y predictiva

ALGORITMO	RELACIÓN DE SEGUIMIENTO
Proporcional	40.45
Predictivo	20.86

Tabla 2. Error por franjas para las leyes de control proporcional y predictiva

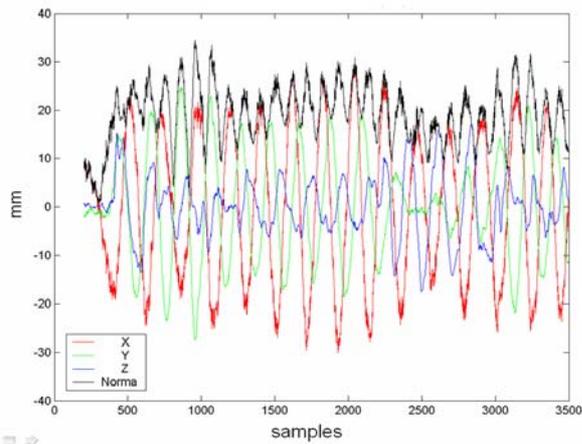
Velocidad	V< 200	200-400	400-600	600-800	V> 800
Algoritmo Proporcional	6.3	13.7	20.1	26.2	32.5
Algoritmo Predictivo	4.2	8.1	9.5	11.3	13.5

La Figura 6 y la Figura 7 muestran para un ejemplo concreto (para cada eje y en módulo) la evolución del error de seguimiento y la velocidad estimada de la pelota, tanto para una ley de control proporcional como para la ley predictiva.

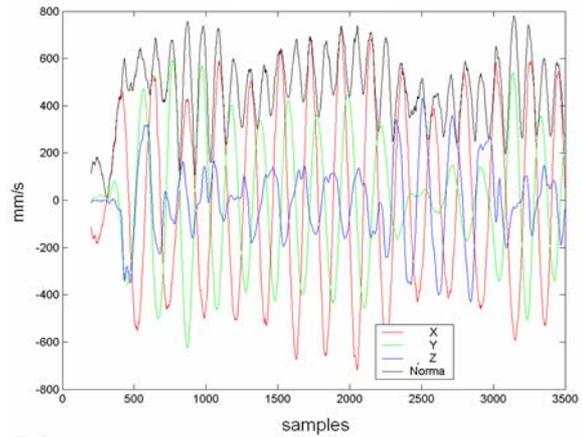
Para el control proporcional el máximo error de seguimiento es de 34.5 mm y la máxima velocidad detectada para la pelota es de 779.9 mm/s. Para el control predictivo el máximo error de seguimiento es de 18.1 mm la máxima velocidad detectada para la pelota es de 748.1 mm/s. Se observa como el empleo del término predictivo mejora significativamente el seguimiento.

#### 5. CONCLUSIONES.

El artículo presenta una novedosa estructura de control visual para un robot paralelo que tiene por objetivo interactuar con objetos que se mueven a alta velocidad con trayectorias desconocidas. Es el primer robot paralelo conocido en el que se realiza seguimiento visual en entornos dinámicos. La estrategia de control está basada en la predicción de la menor muestra en la que es posible cumplir la función objetivo. Se integran los retardos existentes en el sistema y las saturaciones producidas en la acción de control, lo cuál impide que el sistema intente alcanzar una velocidad superior a la permitida. Las pruebas realizadas muestran las altas prestaciones del sistema. Se realiza el seguimiento de una pelota de ping pong con un error inferior a 20 milímetros, y cerrándose el bucle visual en 8.33 ms. Como futuros trabajos se pretende alcanzar una velocidad de seguimiento cercana a los dos metros por segundo, que el sistema sea capaz de realizar nuevas tareas como impulsar a la pelota o agarrarla analizar la estabilidad del sistema.

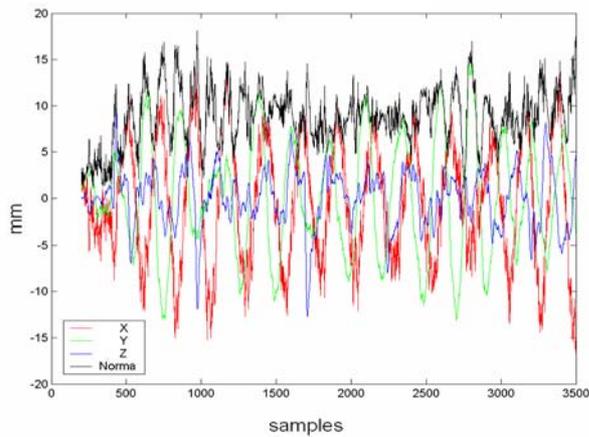


(a)

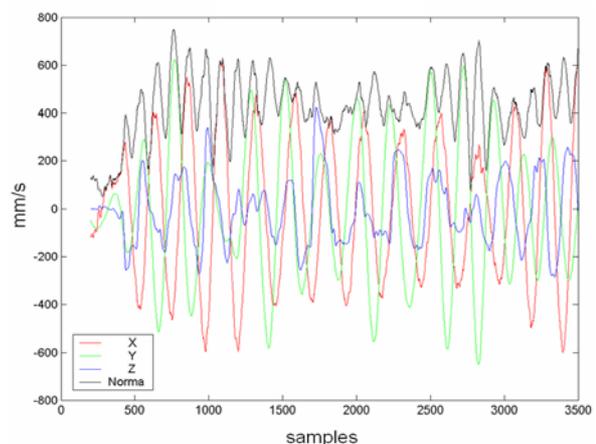


(b)

Figura 6. Ley de control proporcional. (a) Error de seguimiento. (b) Velocidad estimada de la pelota.



(a)



(b)

Figura 7. Ley de control predictiva. (a) Error de seguimiento. (b) Velocidad estimada de la pelota.

Este trabajo está subvencionado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, Proyecto DPI2004-07433-C02-02, por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) dentro del Programa de Cooperación Interuniversitaria de 2005, y por el proyecto RoboCity2030 de la Comunidad Autónoma de Madrid, referencia S-0505/DPI/0176.

#### REFERENCIAS

- Ángel, L. (2005a). Control Visual de Robots Paralelos. Análisis, Desarrollo y Aplicación a la Plataforma Robotenis. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltarén, R., Aracil, R., Gutiérrez, R. (2005b). RoboTennis: Design, Dynamic Modeling and Preliminary Control. *IEEE/ASME AIM2005*, Monterey, USA.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltarén, R., Aracil, Sanpedro, J. (2005c). RoboTennis: Optimal Design of a Parallel Robot with High Performance. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Alberta, Canadá.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltarén, R., Aracil. (2005d). RoboTennis System. Part II:

Dynamics and Control. *44 IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05)*, Sevilla, España.

- Clavel, R. (1988). DELTA: a fast robot with parallel geometry. *18<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Robot*, pp. 91-100, Sydney, Australia
- Gutiérrez, D., Sebastián, J.M., Ángel, L. (2005). Estimación de la posición y velocidad de un objeto móvil. Aplicación al sistema Robotenis. XXVI Jornadas de Automática, Alicante
- Kaneko, M., Higashimori, M., Takenaka, R., Namiki, A., Ishikawa, M. (2003). The 100 G capturing robot - too fast to see. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Volume 8, Issue 1, pp 37 – 44.
- Kragic, D. y Christensen, H.I. (2005). Advances in robot vision. *Robotics and Autonomous Systems*. 52 (1), 1-3.
- Senoo, T., Namiki, A., Ishikawa, M. (2004). High-speed batting using a multi-jointed manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '04*. Volume 2, pp 1191-1196, 26.