

Servo control visual para tareas de seguimiento dinámico tridimensional, mediante la utilización de una cámara en un robot Delta

† Alberto Traslosheros
atraslosheros@etsii.upm.es

† José María Sebastián
jsebas@etsii.upm.es

†† Luís Ángel
langel@etsii.upm.es

††† Flavio Roberti
froberti@inaut.unsj.edu.ar

††† Ricardo Carelli
rcarelli@inaut.unsj.edu.ar

† 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

†† Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana. Km. 7 Vía de Pie de Cuesta, Bucaramanga, Colombia.

††† Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan. Av. San Martín. Oeste 1109, 5400 San Juan, Argentina.

RESUMEN

En el presente artículo se describe el nuevo servo control visual utilizado en tareas de seguimiento dinámico en el sistema denominado Robotenis. Esta plataforma es un robot paralelo dotado de un sistema de adquisición y procesamiento visual. Su principal característica es que posee una arquitectura de control totalmente abierta, planeada con el objeto de diseñar, implementar, probar y comparar estrategias y algoritmos de control a nivel articular y visual. Bajo esta concepción, en las siguientes secciones se muestra una nueva estrategia de control visual que tiene como objetivo el seguimiento dinámico de objetos en el espacio tridimensional. A diferencia de las estrategias mostradas en trabajos anteriores, actualmente se considera la posibilidad de modificar las consignas del seguimiento, permitiendo el agarre o el golpeo del objeto a seguir. Igualmente se considera la estabilidad de Lyapunov de este nuevo control servo visual.

Palabras Clave: Seguimiento dinámico, robot paralelo, control servo visual, estabilidad de Lyapunov.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de visión en las aplicaciones de robótica se pueden incluir para obtener información de los objetos presentes en el área de trabajo, esta información por sus características debe procesarse y extraer la que resultará útil para la aplicación, en las áreas de robótica resulta particularmente interesante el uso de la posición y orientación de los objetos con los que el sistema interactuará. Sin embargo la

integración de estos sistemas en tareas dinámicas presenta muchos aspectos aún no resueltos correctamente y que son motivos de investigación en los principales centros de investigación [9]. 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 el departamento de “Information Physics and Computing” de la Universidad de Tokyo [10].



Fig.(1) Sistema Robotenis.

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 (se muestra en la Fig.(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 plantea un nuevo algoritmo de control servo visual para tareas

de seguimiento dinámico. El algoritmo propuesto involucra un estudio de la precisión de mediciones cartesianas que se logran utilizando una sola cámara previamente calibrada.

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 [6], precisión, capacidad de carga, velocidad y una menor inercia de los motores. La principal desventaja radica en la disminución del espacio de trabajo [1]. La estructura mecánica del sistema Robotenis está inspirada en el robot DELTA [5]. El modelo cinemático, la matriz Jacobiana y el diseño óptimo del sistema Robotenis han sido presentados en trabajos previos [3]. 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 [2] y [4]. 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 constituye 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 se describe el algoritmo de control visual propuesto y temas de su implementación. En el apartado cuarto se describen algunos de los resultados que se refieren a la medición de la posición de la pelota y consideraciones prácticas que se deberán tomar en cuenta durante la implementación del controlador. Por último en el apartado quinto se destacan las conclusiones obtenidas.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

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 [1].

2.1 ENTORNO DE PRUEBAS

El objetivo definido para el sistema es que la pinza del robot sea capaz de seguir a una distancia variable una pelota de ping pong sujeta con un hilo de la estructura fija (Fig.(2)) y que se mueve 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.

2.2 SISTEMA DE VISIÓN

El sistema Robotenis posee una cámara en el extremo del robot, Fig.(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 a una distancia media 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:

2.2.1 Cámara.

Se usó 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.

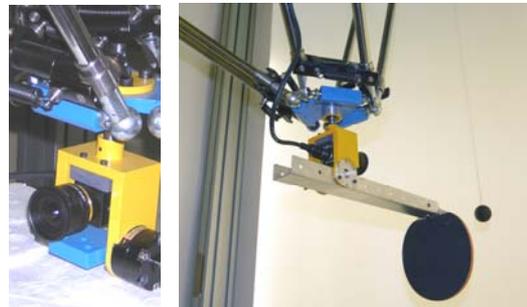


Fig.(2) Cámara y entorno del robot.

2.2.2 Tarjeta de adquisición

Se utilizó 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.

2.2.3 Procesamiento de imágenes.

Una vez adquirida la imagen el sistema realiza la segmentación de la pelota sobre el fondo blanco. Como características visuales se utilizan las provenientes de realizar dos análisis: En el primero se calculan el centroide de la pelota y el diámetro de la misma con precisión subpixel. En el segundo se ajusta una elipse con datos provenientes del perímetro de la pelota y de igual manera se utiliza precisión subpixel. Estos dos análisis se utilizan porque cuando la pelota está lejos de la cámara, se obtiene mejor precisión con el primer análisis que con el segundo. Sin embargo cuando la cámara solo observa una parte de la pelota se utiliza el segundo método que puede obtener el diámetro y centro a partir de solo tres puntos del perímetro.

Para realizar mediciones espaciales de la pelota con una cámara es necesario hacer una calibración previa de esta. El algoritmo de control implica el

conocimiento de la velocidad de la pelota, que se estima mediante un filtro de Kalman [1].

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 [1].

2.4 CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

El control visual desarrollado está condicionado por las características propias de la aplicación y del sistema RoboTenis. 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. Igualmente el sistema RoboTenis 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 SERVO VISUAL

Los sistemas de coordenadas definidos se muestran en la Fig.(3). Σ_w , Σ_e , y Σ_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 o constantes las matrices ${}^w R_e$, ${}^w R_c$, ${}^e R_c$ y ${}^e T_c$, a través de las calibraciones y modelados del sistema. Nótese que el sistema robotenis responde al esquema de cámara en mano. Por esta razón las referencias de cámara y extremo del robot son el mismo punto para efectos del presente trabajo.

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 Fig.(4), la función de error se obtiene comparando la posición deseada del objeto (${}^c p_b^*(k)$) con la

posición obtenida por el sistema de visión (${}^c \hat{p}_b(k)$), ambas expresadas en el sistema de coordenadas de la cámara. En el presente artículo la posición deseada es variable, la señal de control y la estabilidad son obtenidas y analizadas bajo este supuesto. Sin embargo en trabajos anteriores la posición deseada se ha mantenido constante y se han hecho los análisis mencionados [11].

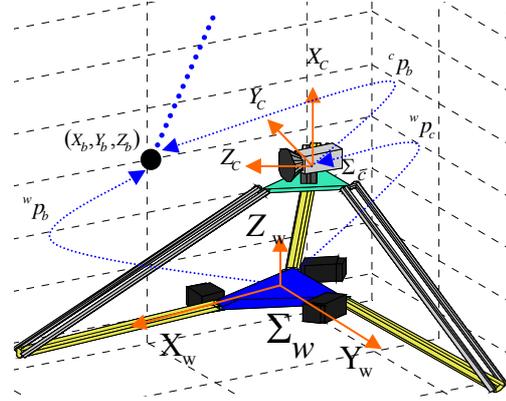


Fig.(3) Esquema del robot y los sistemas de referencia utilizados.

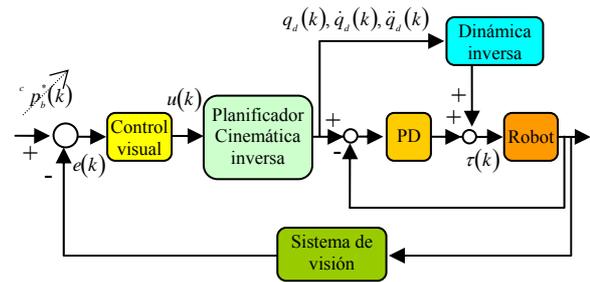


Fig.(4) Esquema de control del sistema Robotenis.

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.

3.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para el diseño del controlador se considera que de acuerdo a la Fig.(3) el error entre la posición deseada y la medida de la pelota respecto a la cámara se tiene como:

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

Donde ${}^c p_b^*$ es la posición deseada y ${}^c p_b$ es la posición medida por el sistema visual, ambas en el sistema coordenado de la cámara. Reescribiendo la ec. (1) se tiene:

$$\dot{e}(k) = {}^c p_b^*(k) - {}^c R_w \left({}^w p_b(k) - {}^w p_c(k) \right) \quad (2)$$

Derivamos el error y se obtiene:

$$\dot{e}(k) = {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w \left({}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) \right) \quad (3)$$

De la ec. (2) y (3) se observa que ${}^c p_b^*$ ya no es una posición fija puesto que se variará para acercarse a la pelota, y esta velocidad de acercamiento es llamada ${}^c v_b^*(k)$. La velocidad de acercamiento variará o no en todo el trayecto, sin embargo es deseable que tenga cierto valor en el momento de colisión con la bola y la posición deseada puede calcularse como:

$$\begin{aligned} {}^c p_b^*(k) &= T {}^c v_b^*(k) + {}^c p_b^*(k-1) \\ {}^c v_b^*(k) &= \frac{{}^c p_b^*(k) - {}^c p_b^*(k-1)}{T} \end{aligned} \quad (4)$$

Forzamos a que el error tenga un comportamiento como el que se define en la ec. (5).

$$\dot{e}(k) = -\lambda e(k) \quad (5)$$

Sustituyendo (1) y (3) en (5) se tiene:

$$\begin{aligned} {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w \left({}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) \right) &= \\ -\lambda \left({}^c p_b^* - {}^c p_b(k) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Despejando la velocidad sobre la que podemos actuar al tener el control del robot:

$$\begin{aligned} {}^w v_c(k) &= {}^w v_b(k) - \\ {}^c R_w^T \left[\lambda \left({}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k) \right) + {}^c v_b^*(k) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Asumiendo que la velocidad de la cámara es la misma que la del extremo del robot, la usamos como nuestra ley de control. La velocidad y posición del objeto es medida por medio del sistema visual, sin embargo son mediciones con alto contenido de ruido, por esto, las señales usadas en el controlador son las estimadas: ${}^c \hat{p}_b(k)$ y ${}^w \hat{v}_b(k)$.

$$\begin{aligned} u(k) &= {}^w \hat{v}_c(k) = {}^w \hat{v}_b(k) - \\ {}^c R_w^T \left[\lambda \left({}^c p_b^*(k) - {}^c \hat{p}_b(k) \right) + {}^c v_b^*(k) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 OBTENCIÓN DE λ

Supondremos que para n suficientemente “pequeña” se cumple:

$${}^w p_b(k+n) \cong {}^w p_b(k) + nT {}^w v_b(k) \quad (9)$$

Y también:

$${}^w p_c(k+n) \cong {}^w p_c(k) + nT {}^w v_c(k) \quad (10)$$

Y también:

$${}^c p_b^*(k+n) \cong {}^c p_b^*(k) + nT {}^c v_b^*(k) \quad (11)$$

Obligando a anular el error en el instante $k+n$ de la ecuación (2):

$$0 = {}^c p_b^*(k+n) - {}^c R_w \left({}^w p_b(k+n) - {}^w p_c(k+n) \right) \quad (12)$$

Sustituyendo (9), (10) y (11) en (12) se tiene:

$$\begin{aligned} 0 &= {}^c p_b^*(k) + nT {}^c v_b^*(k) - \\ {}^c R_w \left({}^w p_b(k) + nT {}^w v_b(k) - {}^w p_c(k) - nT {}^w v_c(k) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Reacomodando logramos la expresión:

$$\begin{aligned} nT {}^w v_c(k) &= -{}^c R_w^T \left({}^c p_b^*(k) + nT {}^c v_b^*(k) \right) + \\ {}^w p_b(k) - {}^w p_c(k) + nT {}^w v_b(k) \end{aligned} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que las mediciones visuales ${}^c \hat{p}_b(k)$ y ${}^w \hat{v}_b(k)$ son estimadas y considerando que ${}^w \hat{p}_b(k) - {}^w p_c(k)$ puede expresarse como ${}^c R_w^T \left({}^c \hat{p}_b(k) \right)$, sustituimos estas expresiones en (14) y tenemos:

$$\begin{aligned} {}^w v_c(k) &= {}^w \hat{v}_b(k) - \\ {}^c R_w^T \left(\frac{1}{nT} \left({}^c p_b^*(k) - {}^c \hat{p}_b(k) \right) + {}^c v_b^*(k) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Recordando la ecuación (8) se observa que un buen valor para λ es hacer $\lambda = \frac{1}{nT}$ con una n suficientemente “pequeña”.

3.3 ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Por medio del análisis de Lyapunov es posible probar la estabilidad del sistema; se puede demostrar que el error converge a cero si se consideran condiciones ideales si estas condiciones no se cumplen, puede probarse que el error finalmente quedará acotado. Para el análisis de estabilidad, consideraremos (3), y (7) para obtener la expresión en lazo cerrado:

$$\dot{e}(k) + \lambda e(k) = 0 \quad (16)$$

Escogemos una función de Lyapunov como:

$$V = \frac{1}{2} e^T(k) e(k) \quad (17)$$

$$\dot{V} = e^T(k)\dot{e}(k) = -e^T(k)\lambda e(k) < 0 \quad (18)$$

La ecuación (18) implica que $e(k) \rightarrow 0$ cuando $k \rightarrow \infty$ pero sabemos que el error no es cero por los errores inherentes al sistema visual. De esta forma la expresión ${}^w v_e = {}^w v_c \equiv u$ no es cierta y un error ρ debe ser considerado.

$${}^w \hat{v}_c(k) = u(k) = {}^w v_c(k) + \rho(k) \quad (19)$$

Donde en el vector $\rho(k)$ se tienen en cuenta los errores de las estimaciones incorrectas y de la dinámica no modelada.

La expresión real de la derivada del error se obtiene a partir de la ecuación (3), sustituyendo el valor de ${}^w v_c$ por el obtenido como ley de control ${}^w \hat{v}_c(k) = u(k)$ de la ecuación (19)

$$\dot{e}(k) = {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w ({}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) - \rho(k)) \quad (20)$$

Y teniendo en cuenta la ecuación (7):

$$\begin{aligned} \dot{e}(k) = & {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w ({}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) - \rho(k)) - \\ & - {}^c R_w \left({}^c R_w^T \left[\lambda ({}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k)) + {}^c v_b^*(k) \right] \right) \end{aligned} \quad (21)$$

Simplificando:

$$\begin{aligned} \dot{e}(k) = & {}^c v_b^*(k) - {}^c v_b^*(k) + {}^c R_w \rho(k) - \\ & - \lambda ({}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k)) \\ = & {}^c R_w \rho(k) - \lambda e(k) \end{aligned} \quad (22)$$

Considerando nuevamente la función de Lyapunov propuesta en la ecuación (17).

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e^T(k)\dot{e}(k) \\ = & -e^T(k)\lambda e(k) + e^T(k) {}^c R_w \rho(k) \end{aligned} \quad (23)$$

La condición suficiente para que $\dot{V} < 0$ se cumpla es:

$$\|e\| > \frac{\|\rho\|}{\lambda} \quad (24)$$

Si consideramos que se puede cumplir que $\rho(k) \rightarrow 0$ entonces se logrará anular el error y $e(k) \rightarrow 0$. En caso contrario, la ec. (24) no se cumple, el error no decrece pero queda finalmente acotado por:

$$\|e\| < \frac{\|\rho\|}{\lambda} \quad (25)$$

Esto significa que el error crecerá o decrecerá en medida que las estimaciones incluyan mayor o menor error.

Si consideramos que los errores de estimación de la posición y velocidad de la pelota son mucho mayores que los errores atribuidos a la dinámica del sistema, entonces podemos obtener un valor de $\rho(k)$ si igualamos las ecuaciones (7), (8) y (19):

$$\begin{aligned} u(k) = & -{}^c R_w^T \left[\lambda ({}^c p_b^*(k) - {}^c \hat{p}_b(k)) + {}^c v_b^*(k) \right] \\ & + {}^w \hat{v}_b(k) \\ = & \rho(k) + {}^w v_b(k) \\ & - {}^c R_w^T \left[\lambda ({}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k)) + {}^c v_b^*(k) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

Por lo que $\rho(k)$ se podrá expresar como:

$$\begin{aligned} \rho(k) = & {}^w \hat{v}_b(k) - {}^w v_b(k) \\ & + {}^c R_w^T \lambda ({}^c \hat{p}_b(k) - {}^c p_b(k)) \end{aligned} \quad (27)$$

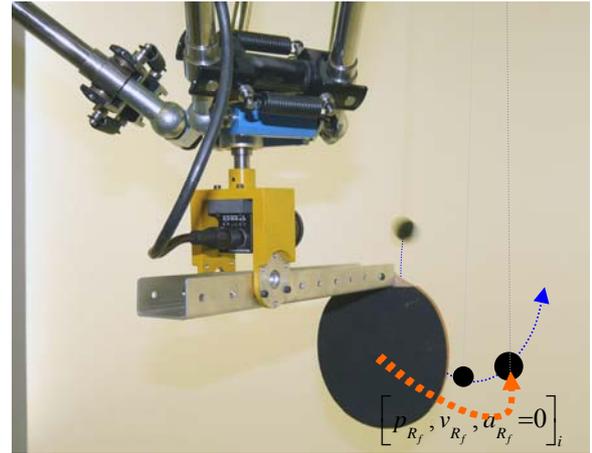


Fig.(5) Robot en tareas de golpeo. El robot debe tener una velocidad final al momento de golpear el objeto $[p_{Rf}, v_{Rf}, a_{Rf} = 0]$ el golpeo se produce en un punto de la trayectoria del objeto $[p_{obj}, v_{obj}, a_{obj}]$.

4 ESTRATEGIA DE GOLPEO

En el apartado anterior, el controlador servo visual propone una interacción dinámica con el objeto pero existen argumentos que se deben tomar en cuenta. El algoritmo aquí propuesto demuestra que es posible acercarse dinámicamente al objeto sin afectar la estabilidad del sistema. A pesar de esto, es necesario indicar cuanto se debe acercar y con que velocidad o aceleración deberá hacerlo. Se deben definir estas estrategias dependiendo si se desea que el robot golpee, agarrare o solamente se acerque a un objeto.

La tarea propuesta se refiere al juego de ping pong contra una pared. Dada la complejidad visual que este juego puede suponer, se han hecho simplificaciones visuales para agilizar el procesamiento visual. Estas consideraciones incluyen la utilización de iluminación controlada, un escenario con fondo blanco y una pelota negra.

La tarea incluye el golpeo de la pelota con una determinada dirección y sentido (Fig.(5)) por tanto es importante tener en cuenta aspectos: El modelo de movimiento del objeto, la trayectoria del robot para producir el movimiento deseado en la pelota o la incertidumbre de los datos adquiridos por el sistema visual.

El efecto de golpeo de la pelota tiene por objetivo llevar a la pelota a un punto deseado y de esta manera facilitar el siguiente golpeo.

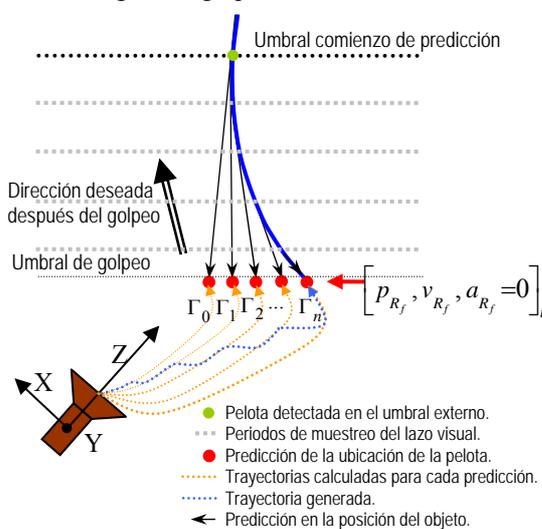


Fig.(6) Generación de trayectorias cada periodo servo visual.

El modelo de movimiento del objeto puede ser planteado de varias maneras, sin embargo se comenzará con el modelo más sencillo. Este modelo se propondrá como una primera aproximación y se comparará con modelos más complejos y aproximados al movimiento real. En la Fig.(6) se muestra un esquema donde la posición de la pelota se extrapola linealmente hasta la posición de golpeo. En cada periodo del control servo visual esta medición de la posición se actualiza, y el planificador de trayectoria del órgano final se recalcula corrigiendo la trayectoria. En la Fig.(6) se observa que esta corrección de trayectoria puede reducirse si se considera un modelo de movimiento (de la pelota) más completo. Como requisitos mínimos el modelo de movimiento de la pelota deberá proporcionar al planificador la posición y velocidad de la pelota. Cuando en cada periodo visual se recalcula el planificador de trayectorias la velocidad final (en sentido contrario al de la pelota) del extremo del robot se debe mantener hasta el momento del choque

con la pelota. Durante esta operación, los límites de operación del robot no deben sobrepasarse.

Para la planificación del extremo del robot se propone un planificador de quinto orden. Este planificador puede condicionar los extremos del movimiento hasta su segunda derivada. Cada trayectoria Γ_i se calcula teniendo en cuenta los extremos deseados. Los extremos iniciales del movimiento p_i, v_i y a_i dependen de la posición o movimientos anteriores y están definidos en todo momento. Los extremos finales del movimiento $p_f =$ punto donde se golpeará a la pelota, $v_f =$

velocidad de golpeo y $a_f = 0$, Fig.(6). Otra situación importante a tomar en cuenta por el planificador es que cuando la pelota se acerca hay un punto de decisión donde se debe optar por buscar el golpear o no la pelota. Para esto se traza una línea (caja) virtual que cuando es cruzada por la pelota planificador evalúa si logrará interceptar la pelota con la máxima velocidad y aceleración permitida (y tomando en cuenta la predicción del punto de golpeo).

Otro factor a considerarse se encuentra inmerso en tareas de golpeo o agarre; específicamente en la capacidad del sistema para interactuar con el objeto cuando no es detectado por el sistema visual. Para esto se propone predecir el comportamiento del objeto durante el periodo en que no se encuentre en el espacio visual de la cámara hasta el momento del agarre o golpeo. Al pronosticar el comportamiento del objeto, se desea contar con datos históricos del objeto que sean característicos de su movimiento. Por esto se realizará un estudio de los datos obtenidos por el sistema visual. En trabajos anteriores, se han utilizado las mediciones de este sistema visual y se sabe que las estimaciones tienen un error mayor en el eje Z de la cámara. Para realizar este estudio de los datos visuales se debe considerar que solo se cuenta con una cámara y es necesario contar con la calibración de la misma y de igual forma las dimensiones del objeto.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó un control servo visual para seguimiento dinámico de objetos en el espacio tridimensional. En trabajos anteriores se muestran experimentos donde el seguimiento es a una distancia fija del objeto y con buenos resultados. Por este motivo se piensa que el nuevo algoritmo aquí planteado logrará resultados similares. Para reforzar esta conclusión se demuestra la estabilidad del sistema y el acotamiento del error ante incertidumbres de medición. En este último punto si no se considera la dinámica del sistema, el error finalmente estará acotado por el error de la

estimación de las mediciones de posición y velocidad hechas por el sistema visual.

Como último punto se planteó la estrategia que se seguirá en el golpeo de objetos. Esta estrategia origina diferentes retos como pueden ser: interceptar la pelota en un determinado punto con un determinado vector velocidad, ajuste del modelo de movimiento del objeto golpeado y tener en cuenta las limitantes físicas del sistema.

Agradecimientos

El sistema de experimentación en control servo visual, llamado Robotenis no habría sido posible sin las subvenciones proporcionadas por los proyectos: "Control y Percepción Colaborativa en Sistemas Teleoperador para Acciones Cooperativas de Robots en Entornos Dinámicos", financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional (A/6512/06). "Robots de servicios para la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos en áreas metropolitanas", financiado por la Comunidad de Madrid (Ref. S-0505/DPI/0176)

Referencias

- [1] Ángel, L. (2005a). "Control Visual de Robots Paralelos. Análisis, Desarrollo y Aplicación a la Plataforma Robotenis". *Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid*.
- [2] Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltarén, R., Aracil, R., Gutiérrez, R. (2005b). "RoboTennis: Design, Dynamic Modeling and Preliminary Control". *IEEE/ASME AIM2005*, Monterey, USA.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Clavel, R. (1988). "DELTA: a fast robot with parallel geometry". *18th International Symposium on Industrial Robot*, pp. 91-100, Sydney, Australia
- [6] François Pierrot, Olivier Company, Sébastien Krut (LIRMM CNRS, University of Montpellier 2) Vincent Nabat, Agustin Saenz (Fundación Fatronik), Seema Gupta, (Adept Technology, Inc.). "Quattro A new robot manipulator for ultra-high-speed packaging applications". ICRA, 2007.
- [7] 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 Automatica*, Alicante
- [8] 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.
- [9] Kragic, D. y Christensen, H.I. (2005). "Advances in robot vision". *Robotics and Autonomous Systems*. 52 (1), 1-3.
- [10] Morikawa, Sho Senoo, Taku Namiki, Akio Ishikawa, Masatoshi; "Realtime collision avoidance using a robot manipulator with light-weight small high-speed vision systems"; *Robotics and Automation*, 2007 IEEE International Conference on. Publication Date: 10-14 April 2007. On page(s): 794-799. ISSN: 1050-4729. ISBN: 1-4244-0601-3. Digital Object Identifier: 10 . 1109 / ROBOT . 2007 . 363083. Posted online: MAY-2007.
- [11] Traslosheros A., Sebastián J. M., Ángel L., Roberti F., Carelli R. "Visual Servoing using a Parallel Robot: Preliminary Results". *Advanced intelligent mechatronics*. 2007 iee/asme international conference on. Publication Date: 4-7 Sept. 2007. page(s): 1-8. ISBN: 978-1-4244-1264-8. Date Published in Issue: 2007-12-26 09:56:27.0