

# UN ROBOT JUGADOR DE “PING-PONG” DE BAJO COSTE

J. J. Rodrigo, L. Acosta, J.A. Méndez, S. Torres  
jamendez@ull.es

## Resumen

*En este trabajo se presenta un robot jugador de Ping-Pong de bajo coste. El objetivo que se planteó fue el de diseñar y construir una máquina que fuese capaz de jugar contra un oponente humano. La estructura mecánica del robot consta de un cuerpo con dos articulaciones. La raqueta va sujeta al extremo del segundo eslabón. A la raqueta se la ha dotado de tres grados de libertad que permiten orientarla en el espacio y además golpear la bola. El sistema de visión está formado por una única cámara. Las tareas del sistema de visión son las de procesar la imagen y estimar la trayectoria que seguirá la pelota en el espacio. El sistema de control presenta dos niveles. El control de bajo nivel se encarga de interceptar la bola y el nivel de control experto es el que define la estrategia de juego del robot.*

**Palabras Clave:** Mecatrónica, Sistemas en tiempo real, Estereovisión, Control.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido varios intentos de desarrollar robots jugadores de ping-pong [1],[3],[4], sin embargo la mayoría de ellos tenían una probabilidad inferior al 50% de golpear la pelota. De los robots desarrollados ha habido tres robots que han sido especialmente importantes:

- Toshiba en Japón construyó un robot articulado con 7 grados de libertad para este propósito. Cada una de las articulaciones dispone de un controlador propio (68020). El sistema de visión está compuesto por dos cámaras CCD. El robot está preparado para jugar contra una pared y conseguía devolver la pelota hasta cuatro veces seguidas.
- Russel Anderson en los Laboratorios Bell desarrolló como culminación de una serie de proyectos de los laboratorios Bell un robot jugador de ping-pong. La parte mecánica del robot estaba compuesta por un brazo de robot comercial (PUMA 260). La posición de la pelota era calculada gracias a la información recogida

por cuatro cámaras de vídeo. El control del sistema estaba compuesto por cuatro procesadores Motorola MC68020.

- Swiss Federal Institute of Technology construyó un robot jugador de ping-pong compuesto por un brazo mecánico de tres grados de libertad y una muñeca con tres grados de libertad. El sistema sensorial estaba formado por un sistema de visión estereoscópica (2 cámaras). Dos microprocesadores MC68020 así como algunas tarjetas MC68000 se encargaban del control del sistema.

Nuestro prototipo tiene un sistema de visión en tres dimensiones que emplea una única cámara y un sólo módulo de adquisición. Este sistema de visión se basa en la detección de la pelota y de la sombra que la misma proyecta sobre la mesa. Este procedimiento presenta una gran simplicidad con respecto a los sistemas de visión estereoscópicos que emplean dos cámaras ya que se dispone de un único módulo de adquisición y de una única imagen que procesar.

Todo el procesamiento se realiza en un único ordenador de tipo IBM PC compatible, con un funcionamiento en tiempo real procesando 25 imágenes por segundo. Los algoritmos de procesamiento y segmentación de las imágenes han sido especialmente optimizados empleando programación a bajo nivel y las extensiones MMX de los microprocesadores de Intel que permiten trabajar con varios pixels de la imagen en paralelo.

Otro aspecto muy importante a resaltar de nuestro sistema y que lo diferencia claramente del resto de sistemas similares ha sido el bajo coste de su desarrollo, basado en componentes estándar en el mercado (ordenador PC, tarjeta de adquisición,...). Asimismo se ha desarrollado la estructura mecánica del brazo de robot con componentes no industriales. Ésta diferencia de coste en comparación con los otros robots expuestos puede superar en muchos casos la relación de 10:1.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la figura 1 se presenta la estructura mecánica, observándose claramente la mesa, la cámara de vídeo con su soporte y el robot que va montado sobre dos raíles que le permitirán desplazarse lateralmente. También se observan las palas del robot que tienen unas dimensiones parecidas a una raqueta normal de ping-pong. Un elemento importante (y que no se aprecia en la figura) es el foco que ilumina la mesa y que está situado justo encima de la misma. El sistema lo podemos subdividir en tres módulos como se muestra en la figura 2:

a) Sistema de visión: Es el sistema sensorial del robot que le va a permitir ver la pelota y calcular su trayectoria. Este subsistema está compuesto por una cámara CCD, un sistema de adquisición de imágenes y una serie de algoritmos de procesamiento de la información [2].

b) Estructura mecánica: La estructura mecánica está compuesta por un brazo de robot que será el encargado de golpear la pelota. Este brazo de robot posee unas palas similares a una raqueta de ping-pong. Cada uno de los ejes de movimiento del robot debe ser controlado para llevarlo hasta la posición deseada.

c) Sistema de control: Este subsistema es el encargado de recibir la información sensorial del sistema de visión, procesarla y mover el robot a la posición correcta para golpear la pelota [5]. También es el encargado de definir el tipo de juego que desarrollará el robot. Esto se consigue controlando la fuerza con la que el robot va a golpear la pelota y la orientación de la pala en el momento del golpeo.

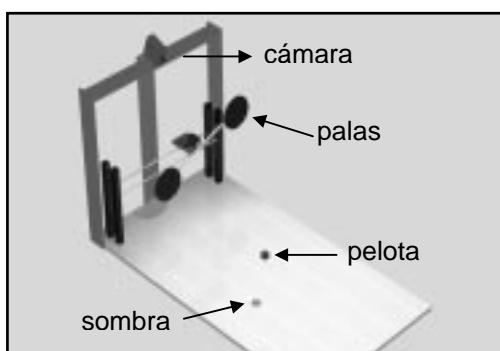


Figura 1: Estructura física del robot y del espacio de juego.

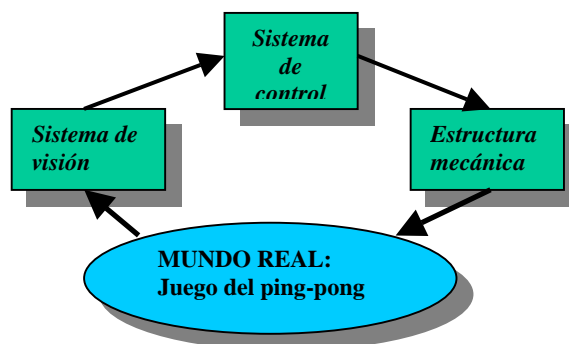


Figura 2: Subsistemas que componen el robot.

## 3 SISTEMA DE VISIÓN

Sin duda el sistema de visión va a ser uno de los pilares principales del robot ya que va a ser el encargado de indicarle dónde está la pelota en cada momento, información sensorial que necesita el robot para poder golpear la bola y desarrollar un juego con la persona.

Normalmente cuando se pretenden calcular las coordenadas de un objeto en el espacio se emplea la visión estereoscópica, que consiste en colocar dos cámaras separadas una cierta distancia entre sí para obtener dos imágenes diferentes del mismo objeto y poder calcular matemáticamente la posición real del mismo. Este tipo de sistemas de visión requieren el uso de dos cámaras y por tanto dos sistemas de adquisición de imágenes, que deben estar dotados de algún tipo de sincronismo externo para que ambas cámaras capturen las imágenes en el mismo instante de tiempo.

En este proyecto se ha desarrollado un sistema de visión en tres dimensiones que emplea una sola cámara, y por tanto un único sistema de adquisición. Para ello se aprovecha la información de la sombra que proyectan los objetos, que en nuestro caso en particular es la sombra proyectada por la pelota sobre la mesa. A continuación se describe el proceso de extracción de las coordenadas de la pelota a partir de la imagen.

La información de la que disponemos son las coordenadas  $(X_p, Y_p)$  (pixels imagen) de la pelota y la sombra y queremos obtener las coordenadas espaciales  $(x, y, z)$  de la pelota con respecto a los ejes de coordenadas definidos para nuestro sistema

El sistema de visión debe realizar los procesos que se indican en la figura 3.

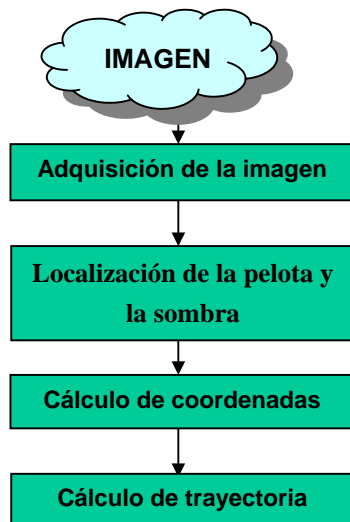


Figura 3. Procesos a realizar por el sistema de visión.

### 3.1 ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN

Las rutinas de adquisición de las imágenes son las encargadas de interactuar con el Hardware de la tarjeta de adquisición para programar la captura de las imágenes que provienen de la cámara. Estas imágenes se capturarán y se copiarán en una dirección especificada de la memoria principal, que las hará accesibles al resto de rutinas del sistema de visión. En el prototipo inicial se están capturando y procesando 25 imágenes por segundo, aunque dado que el procesador todavía tiene recursos libres podría aumentarse este número hasta 50 imágenes por segundo, que es lo máximo que nos permitiría la cámara (sistema de vídeo PAL).

El Hardware para la adquisición de la imagen está formado por una pequeña cámara de vídeo CCD color con salida de vídeo PAL y una resolución de 768x576 pixels en dos campos y una tarjeta de adquisición de imágenes basada en el chip Bt878. Esta tarjeta permite gran flexibilidad a la hora de diseñar los algoritmos de captura, permitiéndonos separar las diferentes componentes de color de la imagen en tres buffers de memoria independientes.

### 3.2 LOCALIZACIÓN DE LA PELOTA Y SU SOMBRA

Una vez capturada la imagen y localizada en un buffer de memoria (descompuesta en sus componentes Y, U y V), debemos de recorrer los 384x288 píxeles para localizar la pelota. La localización de la pelota se basa en el hecho de que la pelota va a tener un color diferente del entorno (pelota roja o azul). La localización de la pelota la podemos dividir en dos subprocesos :

**Concordancia de color:** se marcan los píxeles que están dentro del rango de color especificado para cada una de las componentes de la imagen (YUV). Esta es la rutina computacionalmente más compleja porque debemos de recorrer los 110000 píxeles de la imagen para localizar los puntos que tengan un color similar al de la pelota. Esta rutina se ha codificado enteramente en ensamblador empleando los registros extendidos del procesador Pentium II de Intel (registros de 32 bits) y haciendo uso de las extensiones MMX. Se han realizado diversas comparaciones y podemos concluir que el algoritmo optimizado MMX es 3.3 veces más rápido que su equivalente en lenguaje de alto nivel C. En la Tabla 1 se muestran los tiempos de ejecución (en ms.) de los algoritmos codificados en ensamblador con instrucciones MMX y en C para diferentes imágenes de entrada.

Código	Imag. 1	Imag. 2	Imag. 3	Media
MMX	1.21	1.05	1.58	1.28
C	4.56	4.02	4.25	4.27

Tabla 1. Comparación de tiempos de ejecución del algoritmo de concordancia de color.

**Segmentación :** Los píxeles marcados se agrupan en objetos mediante un algoritmo estándar. Para evitar píxeles de ruido (píxeles aislados del color buscado) se van a eliminar aquellos objetos que sean menores de un tamaño determinado. Para cada objeto detectado se calcula su compacticidad, definida como  $P^2/A$ , siendo P el perímetro del objeto y A el área. El objeto que será identificado como la pelota será aquel que tenga un factor de compacticidad más próximo a  $4\pi$ . Las coordenadas de la pelota se obtienen calculando el centro de gravedad de este objeto.

El algoritmo de localización de la sombra es en general muy parecido al de localización de la pelota visto en el párrafo anterior. En este caso acotaremos la zona de búsqueda con la información sobre la posición de la pelota que nos ha devuelto el algoritmo de localización de la pelota. La búsqueda de la sombra quedará acotada a un cono de píxeles dentro la mesa situados debajo de la pelota.

### 3.3 CÁLCULO DE COORDENADAS

El algoritmo anterior de localización de la pelota y localización de la sombra devuelve la posición de la pelota y la sombra dentro de la imagen. Ahora necesitamos definir una transformación que nos permita la conversión de coordenadas imagen a coordenadas espaciales (nuestro sistema de referencia en la mesa).

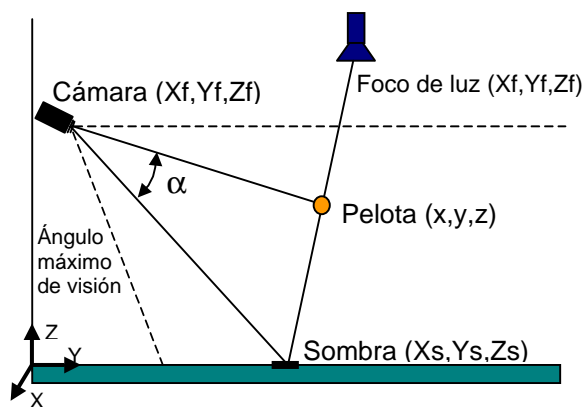


Figura 4: Localización en el espacio de la pelota y la sombra.

Nuestro objetivo es calcular las coordenadas de la pelota y para ello debemos de resolver el triángulo formado por la pelota, la cámara y la sombra, como se muestra en la figura 4.

El cálculo de coordenadas se realiza de la siguiente forma:

- 1.- Cálculo de las coordenadas de la sombra.
- 2.- Corrección de las deformaciones de la lente.
- 3.- Cálculo del ángulo entre la pelota y la sombra.
- 4.- Coordenadas espaciales de la pelota.

### 3.3.1 Cálculo de las coordenadas de la sombra

La sombra tiene la peculiaridad de que al estar proyectada sobre la mesa tiene una “z” constante y conocida, por lo que únicamente debemos de calcular su (Xs, Ys). Lo que conocemos es la posición de la sombra dentro de la imagen (Xsp, Ysp) (en píxeles). Para resolver este problema emplearemos una red neuronal multicapa *feed-forward* que recibirá como entrada el par (Xsp, Ysp) y dará como salida las coordenadas espaciales de la sombra (Xs, Ys). La red será entrenada con un algoritmo *backpropagation* y los pares de entrenamiento se generarán a partir de puntos conocidos de la mesa. Para el entrenamiento de la red neuronal, que se llevó a cabo formando una rejilla sobre la mesa, fueron necesarias 200.000 iteraciones obteniendo un error medio final de 0.15 cm. Los parámetros de entrenamiento utilizados fueron: número de neuronas de la capa intermedia=8, velocidad de aprendizaje=0.12 y momento=0.7.

### 3.3.2 Cálculo de las deformaciones de la lente

Para poder calcular el ángulo entre la pelota y la sombra, que como veremos en el siguiente apartado de este capítulo nos va a ser imprescindible para llegar a conocer las coordenadas de la pelota, debemos primeramente corregir las deformaciones de

la lente y dejar la imagen “plana”. Para conseguir este objetivo se generó un *patrón de calibración* consistente en una malla ortogonal equiespaciada. Con este patrón de calibración se entrena una red neuronal *Feed-Forward* que nos permitirá hacer la transformación entre coordenadas imagen y coordenadas planas. Por tanto la entrada a la red neuronal será las coordenadas del punto en la imagen deformada y la salida de la red serán las coordenadas de ese punto en el patrón de calibración. El entrenamiento de la red neuronal consistió en 200.000 iteraciones con 60 patrones. El error final conseguido fue inferior a un 0.5%.

### 3.3.3 Cálculo del ángulo entre la pelota y la sombra, $\alpha$

La información de la que disponemos es la posición de la pelota y de la sombra dentro de la imagen (ver figura 4). A estas posiciones vamos a aplicarle la corrección de la lente vista en el apartado anterior. Estos dos nuevos puntos ya corregidos definen los dos vectores de la pelota y la sombra y lo único que debemos de hacer es calcular el ángulo entre esos dos vectores,  $\alpha$ .

### 3.3.4 Cálculo de coordenadas espaciales

En este punto ya se dispone de las coordenadas reales de la sombra y del ángulo que forman en la imagen la pelota y la sombra. También es conocida la posición de la cámara y del foco. Mediante triangulación podemos resolver el sistema y calcular las coordenadas de la pelota.

## 3.4 CÁLCULO DE TRAYECTORIAS

Para realizar la estimación de la trayectoria de la pelota necesitamos conocer al menos la posición de la pelota en dos instantes de tiempo diferentes, es decir, necesitamos haber procesado como mínimo dos imágenes y haber extraído de ellas las coordenadas de la pelota.

Se han realizado mediciones del tiempo que tarda en viajar la pelota desde el humano hasta el robot y se ha concluido que ese tiempo oscila entre 250 y 300 milisegundos aproximadamente. Teniendo en cuenta que el robot necesita por lo menos dos imágenes de la pelota para conocer su trayectoria y que estamos trabajando a 25 imágenes por segundo (una imagen cada 40 milisegundos), a esa cifra debemos descontarle entre 40 y 80 milisegundos, por lo que nos resulta que el robot dispone aproximadamente de 200 milisegundos para llegar a la pelota y golpearla. La trayectoria de la pelota se ha modelado usando las fórmulas del tiro parabólico y añadiendo un término correspondiente al rozamiento de la pelota con el aire

(Fuerza de rozamiento =  $\eta$  \*velocidad<sup>2</sup>,  $\eta$ = coeficiente de rozamiento viscoso). La obtención de este factor  $\eta$  se ha realizado de forma empírica llevando a cabo mediciones de trayectorias reales de pelotas, obteniéndose un valor de  $\eta = 0.0014$ .

#### 4 ESTRUCTURA MECÁNICA

Para diseñar la estructura mecánica del robot se ha desarrollado un simulador para comprobar diferentes configuraciones y elegir la que mejor se adaptaba a nuestro problema. Asimismo se ha realizado un modelizado 3D con ayuda del programa CAD MicroStation. La solución adoptada ha consistido en una estructura con un cuerpo (ver figura 5) y una muñeca sujeta a la raqueta. El cuerpo consta de una articulación prismática ( $x_1$ ) y una articulación de rotación ( $\theta_2$ ). La muñeca tiene dos grados de libertad ( $\theta_3$  y  $\theta_4$ ) y una articulación prismática para realizar el golpeo ( $x_5$ ). La construcción del prototipo se ha realizado empleando materiales ligeros y resistentes. El objetivo es conseguir movimientos rápidos y precisos. Así se han empleado materiales como aluminio anodizado, fibra de carbono, deprón, etc.

Cada pala tiene dos movimientos de rotación, uno lateral ( $\theta_3$ ) y otro arriba-abajo ( $\theta_4$ ), y un movimiento de golpeo ( $x_5$ ).

##### 4.1 ARTICULACIÓN DE ROTACIÓN LATERAL

La rotación lateral de las palas se hará independientemente para cada pala. Cada una tendrá un pequeño microservo de 9gr. de peso situado en la parte posterior y unido al tubo de carbono, como se muestra en la figura 6. Las palas están unidas al tubo de carbono mediante una bisagra que permite únicamente el movimiento lateral de la pala que será controlado por el microservo.

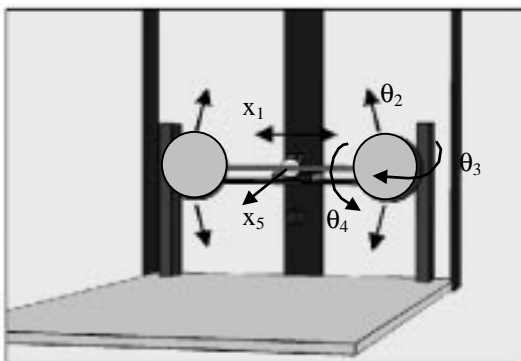


Figura 5: Estructura del cuerpo del robot.

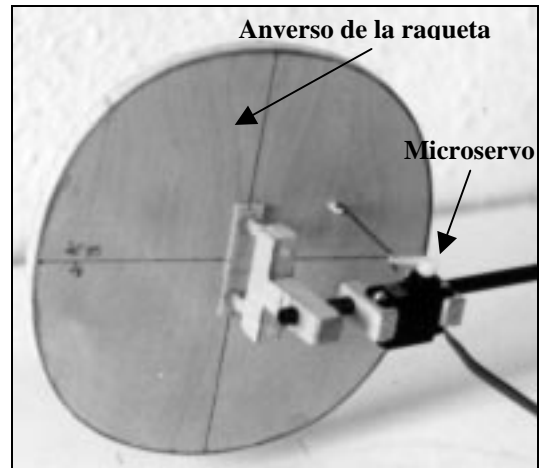


Figura 6: Mecanismo de rotación lateral de las palas.

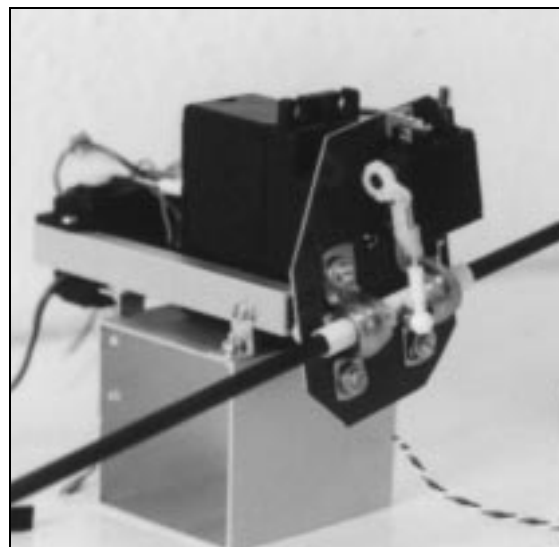


Figura 7: Rotación arriba-abajo de las palas

##### 4.2 ARTICULACIÓN DE ROTACIÓN ARRIBA-ABAJO

El movimiento de rotación arriba-abajo de las palas se va a conseguir rotando el tubo de carbono que une las palas entre sí y que está sujeto a la estructura del servo de rotación mediante dos rodamientos. La figura 7 muestra esta articulación.

##### 4.3 ARTICULACIÓN DE GOLPEO

Para conseguir el golpeo el servo S1 se encuentra montado sobre unos rieles que permiten un movimiento lineal del mismo. El servo S2 es el responsable de realizar el movimiento de golpeo. No es importante la precisión espacial en el movimiento, sino la precisión temporal para hacer coincidir el movimiento con el impacto de la pelota sobre la raqueta. Realmente este movimiento debe iniciarse algunas décimas de segundo antes. En la figura 8 puede verse la articulación de golpeo.

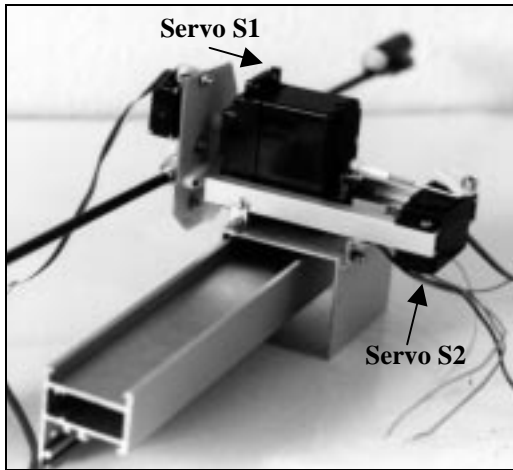


Figura 8: Articulación de golpeo

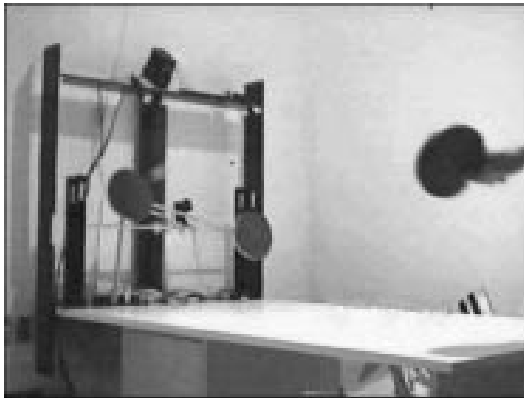


Figura 9. Vista general del prototipo.

En la figura 9 se muestra una visión general del prototipo durante un juego.

## 5. SISTEMA DE CONTROL

El objetivo de nuestro sistema es ser capaz de jugar con un oponente humano [6]. La principal ligadura que el robot debe cumplir es que el golpeo de la bola se debe hacer de forma que ésta bote dentro de la mesa de juego. Para conseguir esto intervienen dos factores: la orientación de la raqueta y la fuerza de golpeo. Podemos distinguir dos niveles diferentes de control del sistema:

**Control de bajo nivel:** El objetivo de este subsistema es situar la raqueta en la posición correcta  $(x_1, \theta_2)$  para interceptar la pelota. Para conseguir esto, el sistema de visión facilitará la trayectoria estimada para la pelota. Las coordenadas de la bola en el plano de la raqueta definirán el punto destino para la raqueta. El objetivo es situar el centro de la pala en estas coordenadas. En cada toma de una nueva

imagen se irán corrigiendo las coordenadas de este punto.

**Control experto:** La estrategia de juego que se adopte es la que determinará la orientación de la raqueta en el espacio tridimensional  $(\theta_3, \theta_4)$  y la fuerza de golpeo  $(x_5)$ . Siempre se debe tener en cuenta que la bola debe botar dentro de la mesa de juego. Por ello se debe realizar una estimación de la trayectoria seguida por la bola tras el golpe. La estimación realizada asumirá que tras el choque la bola pierde alrededor de un 30% de la energía cinética. Con esto, y considerando la regla de reflexión de los ángulos, es posible obtener una trayectoria aproximada para la pelota. El módulo experto debe orientar la raqueta y golpear la pelota para que ésta bote en el lugar elegido.

En el primer prototipo construido sólo se ha incorporado el control de bajo nivel. Los controladores empleados son PI ajustados para obtener una respuesta rápida y con un amortiguamiento adecuado. En un segundo prototipo se incorporará el control experto, lo que permitirá aumentar la versatilidad del robot en el juego.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un robot jugador de Ping-Pong de bajo coste. El prototipo realizado es capaz de jugar con un humano empleando un sistema de visión para detectar la bola. El sistema presenta cinco grados de libertad que permiten posicionar la raqueta en cualquier punto del plano de la estructura, orientarla en el espacio y golpear la bola. Para conseguir aumentar la rapidez de respuesta y la precisión de los golpes el prototipo ha sido diseñado con materiales de bajo peso y resistentes.

Una de las características del sistema es que emplea una única cámara para detectar la bola. Para conseguir esto combina la información de la posición de la pelota con la de la sombra proyectada por esta en la mesa. En cada golpe el sistema de visión estima la trayectoria que recorrerá la bola en el espacio y pasa esta información al sistema de control que se encarga de posicionar la raqueta en el punto adecuado y con la orientación deseada. El sistema de control presenta dos niveles. El control de bajo nivel se encarga de posicionar el centro de la raqueta en el punto correcto para interceptar la bola. El control experto es el que define la estrategia de juego del robot. En el primer prototipo implementado no se ha incluido el módulo experto. Los resultados con este prototipo han sido satisfactorios tanto en respuesta de la estructura como en rendimiento del sistema.

## Referencias

- [1] Anderson R.L, (1987) A robot ping-pong player: Experiments in real time control, Cambridge MA, The MIT Press.
- [2] Davies E. R., (1997), Machine Vision, Academic Press.
- [3] Fassler H., Vasteras H.A, Zurich J.W, (1990) "A robot ping pong player: optimized mechanics, high performance 3D vision, and intelligent sensor control", *Robotersysteme*, pp161-170, Spring-verlag.
- [4] Hartley J, (1987) "Toshiba progress towards sensory control in real time", *The Industrial Robot*, Vol 14, No 1, pp 50-52.
- [5] Slotine J.J., Li W. (1987) "On the Adaptive Control of Mechanical Manipulators", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, no. 3.
- [6] Valavanis K.P., Saridis G.N., (1992) Intelligent Robotic Systems: Theory, Design and Applications, Kluwer Academic Publishers.