

# VISIÓN ARTIFICIAL PARA CONTROL POSICIONAL Y MEDICIÓN DINÁMICA DE LA GEOMETRÍA DEL PÉNDULO INVERTIDO

Bauer Jorge M.<sup>1</sup>, Pablo Negri<sup>1,2</sup> y Garayalde Damián A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Tecnología - UADE - Lima 717, Capital Federal, Argentina.

<sup>2</sup> CONICET, Av. Rivadavia 1917, Capital Federal, Argentina.

dagarayalde@uade.edu.ar

**Resumen**— Los sistemas de visión artificial comprenden una tecnología cuyo desarrollo ha crecido de manera exponencial en los últimos años. La visión artificial no sólo conforma una herramienta esencial para ciertas aplicaciones, sino que permite la sustitución de múltiples sensores mono-variables (utilizados en la automatización de procesos) por un único sensor de adquisición multi-variable basados en el procesamiento de imágenes.

En este trabajo se trata un problema clásico de la formación de jóvenes ingenieros en mecatrónica y control: la estabilización de un péndulo invertido. Mediante el procesamiento digital de imágenes se determina dinámicamente la disposición geométrica del sistema que permitiría controlar en tiempo real el péndulo invertido construido en los laboratorios de mecatrónica UADE.

Este documento describe la arquitectura del sistema con los lazos de control y los tiempos asociados a cada proceso analizando comparativamente las características de las mediciones basadas en imágenes o encoders. Los resultados demuestran la factibilidad de utilizar técnicas de procesamiento de imágenes para el monitoreo de variables de control.

**Palabras Clave**— Visión artificial, control automático, sistemas mecatrónicos, péndulo invertido.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de visión artificial comprenden una tecnología cuyo desarrollo ha crecido de manera exponencial en los últimos años. En este sentido, consideramos dicha tecnología un recurso estratégico para nuestros desarrollos asociados al control y monitoreo de dispositivos robóticos / mecatrónicos.

Mientras que los trabajos asociados a la medición de parámetros físicos mediante el uso de imágenes poseen ya una importante historia, el uso de estas técnicas para controlar sistemas a lazo cerrado conforman un desarrollo más moderno [1, 2]. El desarrollo de potentes procesadores en los últimos años ha permitido la aplicación de las técnicas de procesamiento de imágenes a sistemas con respuestas en tiempo real [3, 4, 5, 6].

Consideramos que el progreso de los sistemas de visión artificial habilitan un cambio de paradigma en el monitoreo y control de ciertos procesos, fomentando el reemplazo de múltiples sensores hacia la adquisición de información a través del procesamiento online de imágenes. Dicha concepción posee cierta correlación con los métodos en los cuales el hombre monitorea/controla usualmente muchas variables de su entorno.

Nuestro objetivo es analizar las posibilidades de reemplazar sensores tradicionales por técnicas de procesamiento de imágenes en sistemas que requieran la aplicación de control de manera continua y precisa.

Para esto, en la sección 2 se describirán los aspectos mecatrónicos de la plataforma experimental utilizada y su sistema de control. Luego nos focalizamos en los aspectos metodológicos y prácticos mediante los cuales las imágenes son procesadas en tiempo real para obtener la información de control necesaria. La sección 4 presenta un análisis comparativo entre el desempeño del sistema de procesamiento de imágenes frente a los resultados obtenidos mediante los sensores actualmente utilizados. El trabajo finaliza con las conclusiones y una proyección de estas técnicas a desarrollos futuros.

## 2. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

En esta sección se introduce la plataforma experimental, las ecuaciones que modelan su comportamiento dinámico y el sistema de control utilizado.

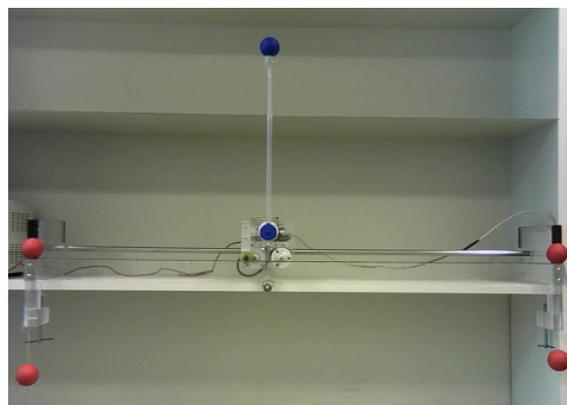


Figura 1: Implementación del péndulo invertido utilizada.

**2.1. Diseño mecatrónico**

El sistema físico bajo análisis será un péndulo invertido, cuya implementación actual fue diseñada y fabricada en UADE con base al análisis de ventajas y desventajas de algunas configuraciones existentes. El dispositivo experimental consiste de una varilla rígida montada sobre una base que desliza sobre una guía posicionada paralelamente al plano de giro del péndulo, permitiendo estabilizarlo en su posición vertical donde posee un comportamiento intrínsecamente inestable.

En nuestra implementación de la Fig.1 el desplazamiento de la base o carro se controla mediante un motorreductor (IGNIS modelo MR6-1400-1212). La posición de la base y péndulo se monitorean mediante encoders de cuadratura (HEDSS modelo ISC 3806-003G-1000BZ1-5-24F resolución 0,09°) y el sistema de control se halla implementado en un microprocesador (Freescape modelo HC12- MC9S12 DP 256B). Con el fin de modularizar el dispositivo el sistema de medición, procesamiento y motorización se hallan concentrados sobre la base del péndulo. La información proveniente de los sensores es utilizada por el microprocesador para generar una señal de control (ver sección 2.2) que se aplica al motorreductor a través de un puente H implementado con el circuito integrado L298.

Respecto de los aspectos mecánicos, la transmisión del torque motor se efectúa por sistema piñón-cremallera al tiempo que el carro es guiado por una varilla de acero. Asimismo, tanto la estructura del péndulo como la base y guía se componen de piezas mecanizadas en acrílico transparente para resaltar los componentes activos.

**2.2. Dinámica del sistema y estrategia de control**

Las ecuaciones dinámicas del sistema linealizadas para el péndulo en posición de equilibrio vertical resultan:

$$M_{eq} \ddot{x} - ml \ddot{\theta} + B_{eq} \dot{x} = K_v V_m \quad (1)$$

$$\ddot{x} + g \theta - l \ddot{\theta} - \dot{\theta} \cdot B_p / (l m) = 0 \quad (2)$$

Donde  $\theta$  es el desplazamiento angular del péndulo respecto a la vertical;  $x$  el desplazamiento lineal del carro;  $V_m$  la tensión aplicada al motorreductor;  $l$  la longitud del péndulo y  $m$  la masa colocada en su extremo;  $B_p$  el coeficiente de fricción en su eje;  $g$  la aceleración de la gravedad;  $K_v$  una constante de conversión de tensión a fuerza;  $M_{eq}$  comprende los efectos asociados a las masas del carro y péndulo así como la inercia del motorreductor; y finalmente,  $B_{eq}$  comprende los efectos asociados al rozamiento carro-guía, las perdidas por la fuerza contraelectromotriz y rozamientos internos del motorreductor.

Para reducir la complejidad del sistema estas ecuaciones diferenciales de orden dos se pueden representar mediante una ecuación diferencial vectorial de orden uno. Este método se denomina representación en espacio de estados. Para ello se definen el vector de estado  $X$  (variables de estado) y el vector de salida  $Y$  (variables a controlar) como:

$$X = Y = [x \quad \theta \quad \dot{x} \quad \dot{\theta}] \quad (3)$$

Sea  $U = V_m$  la entrada del sistema, las ecuaciones dinámicas del sistema pueden ser representadas en función de los vectores  $X$ ,  $Y$  y  $U$  mediante las siguientes expresiones matriciales:

$$\dot{X} = A.X + B.U \quad (4)$$

$$Y = C.X + D.U \quad (5)$$

Las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  se deducen de las ecuaciones (1) y (2) resultando:

$$A = \frac{1}{K_{cte}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_{cte} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{cte} \\ 0 & m l g & -B_{eq} l & -B_p \\ 0 & M_{eq} g & -B_{eq} & -B_p M_{eq} / (m l) \end{bmatrix}$$

$$B = K_{cte}^{-1} \cdot K_v [0 \quad 0 \quad l \quad 1]'$$

$$C = I \text{ dim}(4x4)$$

$$D = 0 \text{ dim}(4x1) \quad \text{Con } K_{cte} = (M_{eq} - m) l$$

Dado que el sistema es controlable [7] su respuesta dinámica y estática pueden modificarse mediante la realimentación del error entre el valor actual y deseado del vector de estados ( $X - X_{set}$ ) con un vector de ganancias  $K$ . Esta técnica es conocida como realimentación lineal de estados y será la aplicada para controlar nuestro sistema. El diseño del controlador se basa en calcular las ganancias tal que la dinámica resultante a lazo cerrado sea acorde a la deseada. Este sistema puede expresarse en forma matricial o gráfica como se observa a continuación.

$$\dot{X} = A.X - B.K (X_{set} - X) \quad (6)$$

$$Y = C.X - D.K (X_{set} - X) \quad (7)$$

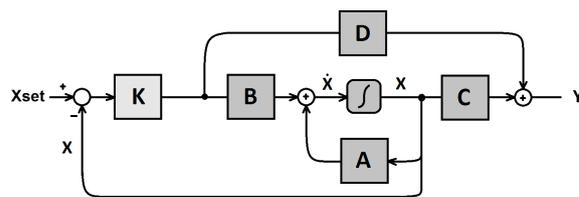


Figura 2: Sistema a lazo cerrado en espacio de estados.

En función del análisis previo, nuestra variable de control es calculada dinámicamente dentro del microprocesador como la suma ponderada de los errores entre los valores actuales y los valores deseados asociados a las variables del vector de estados.

$$V_m = \sum_i K_i (X_{set\ i} - X_i) \quad (8)$$

Ensayos previos descritos en [8] demostraron que aplicando esta estrategia con medición por encoders se logra controlar el péndulo en posición vertical durante periodos superiores a los 15 minutos.

### 3. LAZO DE CONTROL POR PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El lazo de control del péndulo se realiza a través de una webcam como muestra el esquema de la Fig.3. Las capturas de este sensor proveen la posición de los marcadores del péndulo transformando la información desde la imagen a un sistema de coordenadas en el mundo real. En este capítulo se detallan las metodologías con las cuales se consiguió asegurar este lazo de control en tiempo real.

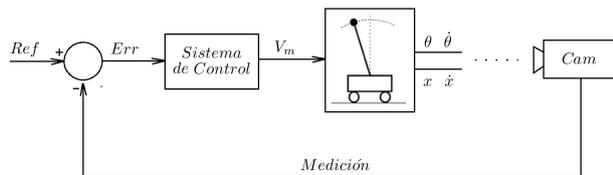


Figura 3: Sistema a lazo cerrado. Medición de las variables de control mediante tecnologías de procesamiento de imágenes.

#### 3.1. Estimación de los parámetros intrínsecos de la cámara

Los parámetros intrínsecos de la cámara están relacionados con el hardware utilizado, el captor y lentes, y no dependen de la escena que se esté filmando. Estos parámetros son: las distancias focales ( $f_x, f_y$ ), el punto principal que es generalmente el centro de la imagen ( $c_x, c_y$ ) y los factores de distorsión radial (la distorsión en la cámara al alejarse del centro de la misma) ( $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  y  $k_6$ ).

La tarea de estimar los parámetros intrínsecos se denomina calibración. Para realizar la calibración se presenta ante la cámara una imagen similar a un tablero de ajedrez, donde son conocidas las medidas de los lados de los cuadrados y se realizan diversas capturas poniendo el tablero en distintas posiciones. Utilizando una metodología como la propuesta en [9] se identifican los parámetros de la cámara.

#### 3.2. Estimación de la pose de la cámara

La estimación de la pose de la cámara (arquitectura de filmación) consiste en encontrar la transformación entre los puntos del mundo real proyectados en el plano  $uv$  de la cámara (en pixels) y el eje coordenado correspondiente al objeto de referencia  $XYZ$  (en mm) como es mostrado en la Fig.4.

El objeto de referencia consiste en cuatro marcadores de color rojo para los cuales su ubicación espacial respecto de  $XYZ$  es conocida (Fig.1). Una vez detectados los centros de los marcadores de referencia en la imagen, ver sección 3.3, conociendo la ubicación de los marcadores en los ejes  $XYZ$  y  $uv$ , se utilizan los parámetros intrínsecos de la cámara y un algoritmo iterativo como el de Levenberg-Marquardt para obtener la matriz de proyección homogénea  $M$  compuesta por una matriz de rotación  $R$  y un vector de translación  $T$ .

En este trabajo los marcadores de referencia se posicionaron de forma que la evolución del péndulo se desarrolle de manera coplanar a la localización de dichos marcadores. Conociendo la posición asociada a los marcadores del péndulo en pixeles y la matriz de proyección homogénea esta información visual se transforma en una posición espacial en el plano de los marcadores de referencia  $XYZ$  (el valor  $Z$  siempre es el mismo). Utilizando la ubicación espacial de ambos marcadores del péndulo se pueden determinar otras características del mismo como ser su rotación y posición relativa.

#### 3.3. Detección de los marcadores

En este trabajo se utilizaron como marcadores pequeñas esferas pintadas de dos colores diferentes. Los marcadores de referencia para calcular la pose de la cámara son de color rojo y los marcadores del péndulo de color azul.

La detección de los marcadores permite estimar el centro de cada una de las esferas. En el caso de los marcadores de referencia, los mismos permiten obtener la matriz de transformación homogénea, y en el caso de los marcadores del péndulo, obtener la información de la posición de ambos extremos del mismo.

La detección se realiza en los siguientes pasos:

- Transformación del espacio de color: la imagen color de entrada tiene una codificación RGB, que es convertida al espacio de color YCbCr. La transformación en este espacio de color tiene dos ventajas principales. Por una parte, para identificar un color solo es necesario utilizar dos canales (Cb y Cr), disminuyendo el tiempo de procesamiento. Por otra, al trabajar solo con las crominancias son ignoradas las diferencias en el color por sombras, cuya información está contenida en el canal Y [10]
- Identificación de los rangos del color de interés: se identifican los rangos de valores del color azul y rojo para cada de crominancias del espacio YCbCr.

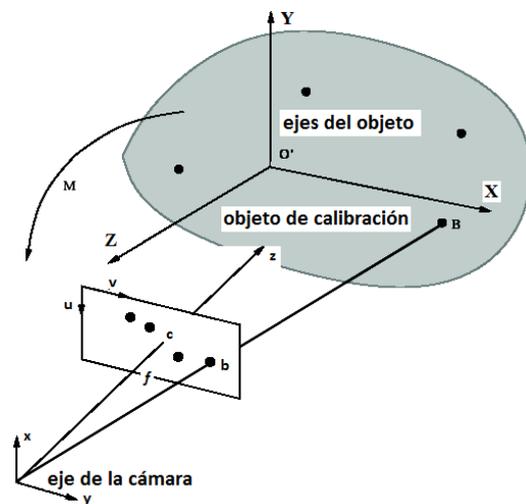


Figura 4: Modelo geométrico de la cámara

- Binarización de la imagen identificando los pixels de color: los pixels que tengan sus valores dentro de los rangos encontrados para cada uno de los colores en los canales Cb y Cr, serán activados con un 1, o con un 0 en caso contrario.
- Individualización de las regiones: una región se define como el conjunto de pixels conexos. En esta etapa es necesario filtrar regiones que no pertenecen a los marcadores filtrando por tamaño de la región y roundness.
- Aproximación de la región a una elipse: en este paso se toman los pixels de contorno de la región y por mínimos cuadrados se encuentran los parámetros de la elipse que mejor se ajusta a estos valores. Se utiliza una elipse en lugar de un círculo debido a que los marcadores capturados desde un eje que no es necesariamente perpendicular da como resultado una elipse.
- Encontrar el centro de la elipse: de cada elipse asociada a cada región, la información pertinente para nuestro sistema es el centro de la misma.
- Transformar los puntos de la imagen al plano del péndulo: utilizando los parámetros intrínsecos de la cámara y la matriz de transformación  $M$  se proyectan los centros de las elipses pertenecientes a los marcadores del péndulo al sistema de referencias definido por los marcadores de referencia. Estos valores serán la entrada del lazo de control, permitiendo realizar el seguimiento del péndulo.

#### 4. EXPERIMENTOS y RESULTADOS

Las características electromecánicas del péndulo invertido fueron descritas en la sección 2. Las características de los restantes componentes utilizados se describen a continuación. El sensor utilizado para obtener las imágenes es una cámara web (*Genius iSlim 1300 V2*) operando a una velocidad de 32 fps con una resolución de 640x480. Dichos valores se seleccionaron buscando una relación de compromiso entre la frecuencia de las capturas y los tiempos de procesamiento (asociados a la resolución de la imagen).

La imagen obtenida es luego procesada en una PC con microprocesador I7-2600 3.4 GHz, 8 GB RAM y Windows 7 de 64 bits. El software de procesamiento se programó en C++ utilizando Microsoft Visual Studio 2008, librerías propias y librerías asociadas a OpenCV.

La información extraída de las imágenes es luego transmitida por comunicación serial (emulada a través de puerto USB y conversor USB serie) al microprocesador encargado de controlar el péndulo invertido.

##### 4.1. Consideraciones sobre la asociación de marcadores en capturas sucesivas

Con el fin de hallar la posición de equilibrio vertical el péndulo se halla originalmente posicionado en reposo por

efecto de la gravedad (vertical hacia abajo). En esta condición es simple localizar que marcador corresponde a la base y cual a la cabeza del péndulo. Sin embargo, la asociación de marcadores no resulta trivial cuando el péndulo atraviesa la condición horizontal. Dado que nuestros marcadores poseen idénticas propiedades debemos hallar una manera de asociar inequívocamente los marcadores actuales a los marcadores en la imagen correspondiente a instantes previos.

A continuación se muestran cuatro posibles imágenes binarias para dichos marcadores. Sin información o lógica adicional resulta imposible asociar los marcadores de una imagen a los marcadores de otra. Suponiendo que la cámara está fija solo podemos asegurar que en las imágenes  $A$ ,  $B$  y  $D$  el círculo localizado sobre la horizontal centrada corresponde a la base del péndulo. Sin embargo en la figura  $C$  esta información no es suficiente.

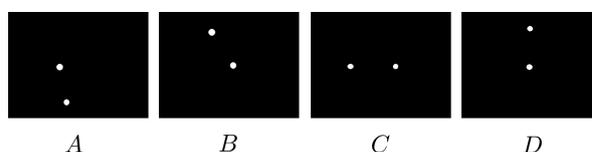


Figura 5: Potenciales imágenes binarias obtenidas en relación a los marcadores del péndulo.

Aceptando que los marcadores se asocian a un dispositivo mecatrónico (péndulo invertido) con una dinámica de movimiento más lenta que el sistema de adquisición de imágenes, se puede hallar la correspondencia unívoca entre marcadores como aquella que minimiza las distancias (euclidianas) entre los marcadores de dos imágenes consecutivas.

En estas condiciones, se debe evitar la pérdida de información durante un período excesivo ya que generaría una disociación lógica. Una posible mejora resulta de utilizar marcadores diferenciados, sin embargo ello implica cambios en el procesamiento de la imagen que seguramente incrementan los recursos computacionales.

##### 4.2. Errores en adquisición por imágenes

Debido a la digitalización de la imagen dos puntos próximos en  $XYZ$  se mapearán en  $uv$  o bien como el mismo pixel o como pixeles continuos. Se analiza este efecto para la medición del parámetro más crítico de nuestro sistema (posición angular del péndulo) y se comparan los resultados experimentales con los valores esperados teóricamente. Para esto se considera el péndulo alineado gravitacionalmente y se observa su dinámica ante un pequeño desplazamiento impulsivo.

El mínimo desplazamiento angular registrable bajo una dada resolución será aquel producido cuando el marcador del extremo libre del péndulo se desplaza 1 pixel horizontalmente. Por otra parte, dada una resolución de 640x480 la distancia vertical entre los marcadores del péndulo se halla en el orden de los 196 pixeles (Fig.6). Con lo cual

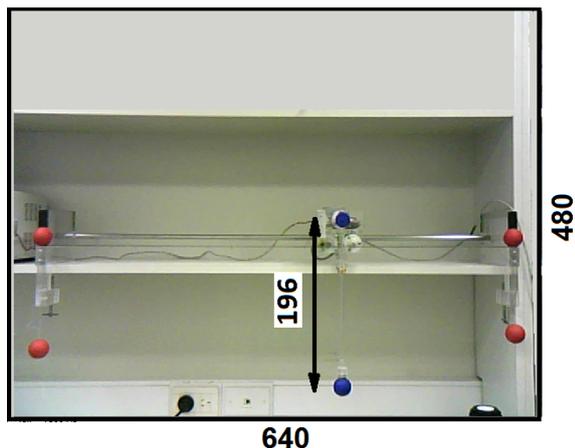


Figura 6: Distancia entre los marcadores del péndulo expresada en pixels en relación a la resolución de la imagen.

el mínimo desplazamiento angular cuantizable se calcula por trigonometría como:

$$\theta_{min} = \arctg\left(\frac{dv}{du}\right) = \arctg\left(\frac{1}{196}\right) = 0,292^\circ \quad (9)$$

En la Fig.7 los círculos corresponden a la medición de la posición angular del péndulo para pequeños desplazamientos. En estas condiciones se puede observar que los valores angulares pre-procesados obtenidos directamente de la transformación homogénea para la condición en reposo no se hallan en  $0^\circ$  como era de esperarse intuitivamente.

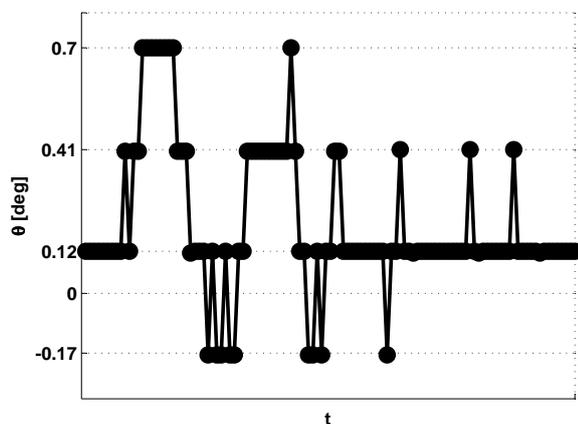


Figura 7: Medición parcial del desvío angular.

La discrepancia en el valor de reposo se debe a la suposición de que los marcadores de referencia se hallan alineados gravitacionalmente conformando un perfecto rectángulo, la cual no es totalmente exacta en términos reales ya que existen diversas desviaciones geométricas (deformación del rectángulo a rombo, no coplanariedad de los marcadores, etc). Sin embargo, este efecto se puede anular de manera sencilla sustrayendo a la medición dinámica la posición angular inicial. Por otra parte, en la Fig.7 podemos observar que los valores que toma la

medición se cuantifican en saltos de  $0,29^\circ$  lo cual resulta conforme a la predicción teórica.

Cabe resaltar que la resolución obtenida depende de la dimensión de la imagen y de la ubicación geométrica de los marcadores dentro de la misma. En el primer caso, supongamos que nuestra cámara puede utilizarse a su máxima resolución (1280x1024), con lo cual la precisión angular sería de  $0,13^\circ$ . En el segundo, si nuestra geometría permitiese utilizar por completo la extensión vertical de la imagen para detectar el péndulo tendríamos una resolución aproximada de  $0,14^\circ$ . En consecuencia, mientras que el primero puede considerarse un factor que evoluciona naturalmente con el cambio tecnológico, será crítico para la resolución del sistema el uso de un diseño que maximice la distancia entre marcadores en las capturas.

### 4.3. Análisis comparativo entre las mediciones obtenidas para ambos sensores.

Se estudió comparativamente las mediciones obtenidas mediante el encoder localizado en el eje del péndulo y nuestro sistema de procesamiento de imágenes. La dinámica bajo estudio es el movimiento oscilatorio amortiguado asociado al péndulo ante una perturbación de su posición en reposo (Fig.8). El ensayo se realizó para una amplitud máxima de  $\pm 15^\circ$ , valor muy superior a los desplazamientos angulares a controlar.

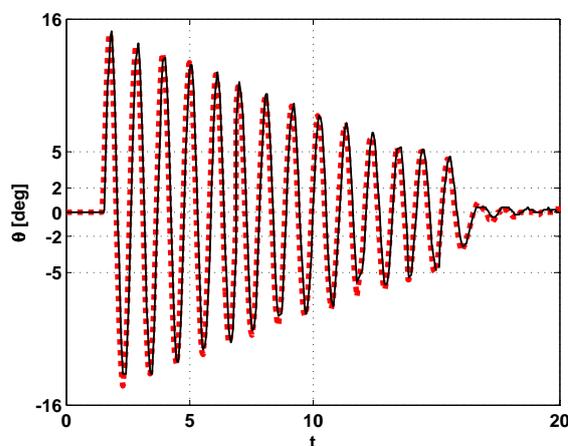


Figura 8: Desplazamiento angular ante perturbación. Medición mediante encoder en trazo de puntos y medición mediante cámara en trazos sólidos.

En la Fig.8 se puede observar comparativamente la información obtenida mediante ambos métodos. La señal solida corresponde al resultado del procesamiento de imágenes mientras que la de líneas punteadas corresponde a la medición del encoder.

En primer lugar se puede apreciar que sin ningún tipo de ajuste particular de amplitud los valores de ambas señales coinciden, lo cual constituye un indicador de la eficacia asociada al procedimiento de calibración del sistema de adquisición por imágenes.

Por otra parte, se observa un pequeño desfase temporal entre ambas señales que se expone en el detalle de la Fig.9. Este retardo es producto del tiempo requerido para la adquisición de un cuadro, el procesamiento de la información y la transmisión asincrónica. La cámara utilizada posee una velocidad de adquisición máxima de 32 *fps* ( $1/32 = 31 \text{ ms}$ ) sin embargo, nuestros ensayos indicaron que esta velocidad presenta retrasos periódicos de hasta 50 *ms*. Dado que el retraso observado entre ambas señales es de aproximadamente 60 *ms* es simple apreciar que el factor limitante para la configuración actual está dado por la velocidad de muestreo de la cámara. Ante la imposibilidad de reducir dicho retraso para una cámara dada una posible solución sería utilizar una estrategia que permita estimar muestras a futuro.

En base a los resultados obtenidos se puede inferir que pese a operar con una cámara de bajo costo, el método descrito sugiere la factibilidad de controlar el péndulo invertido del laboratorio de mecatrónica UADE. Asimismo en [6] se puede observar que el retraso y precisión obtenidos son comparables con los resultados obtenidos previamente por diversos grupos (retrasos entre 25 y 60 *ms* y precisiones angulares entre  $0,1^\circ$  y  $0,3^\circ$ ).

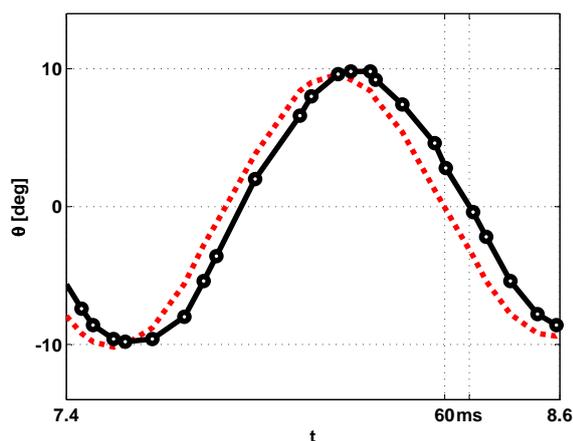


Figura 9: Retraso temporal entre la información obtenida de ambas fuentes. Medición mediante encoder en trazo de puntos y medición mediante cámara en trazos sólidos.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos la implementación de un péndulo invertido y su controlador. Se propone una metodología utilizando técnicas de procesamiento de imágenes que permitiría estimar en tiempo real las variables necesarias para el control del sistema: la posición del carro y el ángulo del péndulo.

Los experimentos llevados a cabo demostraron que la resolución o error del sistema de visión está en un orden similar a los encoders. Se compararon dinámicamente las señales y se determinó la existencia de un retraso temporal de 60*ms* que depende principalmente de la velocidad de captura de la cámara.

El esquema presentado expone la factibilidad de reemplazar estrategias de medición monovariantes por tecnologías de visión artificial para la extracción de informa-

ción geométrica relevante para el sistema de control en tiempo real.

A partir de esta experiencia consideramos que se podrían proyectar estas técnicas como señales complementarias para mejorar el equilibrio de sistemas mecatrónicos y robots móviles. En este sentido, será importante estudiar el comportamiento del sistema cuando el dispositivo de captura de imágenes no se halla montado en forma estática y externa a la unidad mecatrónica sino que se desplaza con la misma.

## REFERENCIAS

- [1] P. Corke, "Visual control of robot manipulators-a review," *Visual servoing*, vol. 7, pp. 1–31, 1993.
- [2] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. Corke, "A tutorial on visual servo control," *Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651–670, 1996.
- [3] A. Traslosheros, J. Sebastián, L. Ángel, F. Roberti, and R. Carelli, "Visual servoing of a parallel robot system," in *International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 2007, pp. 1–6.
- [4] G. Lee and S. Jung, "Line tracking control of a two-wheeled mobile robot using visual feedback," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, 2013.
- [5] H. Wang, A. Chamroo, C. Vasseur, and V. Koncar, "Hybrid control for vision based cart-inverted pendulum system," in *American Control Conference*, 2008, pp. 3845–3850.
- [6] S. Kizir, H. Ocak, Z. Bingul, and C. Oysu, "Time delay compensated vision based stabilization control of an inverted pendulum," *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, vol. 8, no. 12, pp. 8133–8145, 2012.
- [7] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna 4ED*. Pearson Educación, 2003.
- [8] J. Bauer, D. Garayalde, D. Riepl, and H. Laguyás, "Systematic-validation of a computer simulation environment for modeling and dynamic behavior analysis of complex mechatronic mobile robot's systems," in *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2012.
- [9] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [10] P. Negri, X. Clady, and M. Milgram, "A new voting algorithm for human grasping gestures," in *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, ser. Lecture Notes in Computer Sciences, vol. 3708/2005, 2005, pp. 130–137.