

SEGUIMIENTO VISUAL BASADO EN PASIVIDAD EN SISTEMAS NO INERCIALES

Fabio Gómez-Estern, Miguel G. Cordones and F.R. Rubio

Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n. 41092-Sevilla. SPAIN
e-mails: {fgs,cordones,rubio}@cartuja.us.es
TEL: +34 954487346 FAX: +34 954487340

Abstract

En este trabajo se presenta la síntesis e implementación de un controlador basado en pasividad destinado al seguimiento de visual de objetos móviles dentro de un esquema de rechazo de perturbaciones. El propósito de la aplicación es controlar la línea de visión de una plataforma de sensores de dos grados de libertad asentada sobre un sistema de referencia móvil, cuando el movimiento del vehículo terrestre o acuático que soporta la plataforma actúa como un efecto perturbador de energía limitada. Los pares externos debidos al movimiento del sistema de referencia de la base desestabilizan la imagen y pueden causar una pérdida del objetivo visual. Dichas perturbaciones se pueden compensar de manera efectiva incorporando un esquema clásico de rechazo de perturbaciones con ganancia \mathcal{L}_2 basado en pasividad, inicialmente diseñado para sistemas inerciales. La principal aportación de este trabajo consiste en hacerlos extensivos a sistemas no inerciales con realimentación visual. Los controladores diseñados han sido probados en una plataforma de laboratorio instalada sobre una mesa desestabilizadora que emula el oleaje o el movimiento de un vehículo terrestre, introduciendo el efecto perturbador de manera realista.

Palabras clave: Sistemas no lineales, Robots móviles, Pasividad, Control robusto, Seguimiento visual.

1 Introducción

En recientes trabajos, la teoría de los sistemas hamiltonianos y la pasividad han permitido profundizar en el tratamiento de la relación perturbaciones-salida de los sistemas realimentados. En [4] se han demostrado las propiedades de rechazo de perturbaciones para sistemas PCH (véase también un enfoque reciente más práctico en [5]) al imponer unas determinadas condiciones en la matriz de disipación de un sistema hamiltoniano, de modo que en bucle cerrado presente una ganancia \mathcal{L}_2 reducida, en algunos casos cuantificable, en la relación perturbación-salida.

Los sensores de vehículos o robots móviles como antenas

satélite o sistemas de seguimiento visual, se ven afectados de manera continua por perturbaciones no deseadas debidas al movimiento sistema de referencia sobre el que se asientan. Las perturbaciones se reflejan como fuerzas de coriolis y centrífugas propias de los sistemas no inerciales. Estos sistemas encuentran la dificultad de mantener una línea de visión estable frente a los movimientos del objetivo visual o los del propio sistema de referencia del sensor. Para objetivos alejados la segunda de las perturbaciones es la que más efecto tiene en el seguimiento y requiere un tratamiento especial. En el caso de vehículos acuáticos estas perturbaciones tienen carácter sinusoidal y por tanto es de esperar que su energía esté acotada, hecho importante para la efectividad del esquema de rechazo de perturbaciones \mathcal{L}_2 . Motivado por ello, en este artículo se propone el empleo de un controlador de Slotine y Li con rechazo de perturbaciones en sentido \mathcal{L}_2 basado en pasividad, inmerso en un sistema de seguimiento visual que proporciona la trayectoria de referencia a dicho controlador.

A fin de estudiar de forma realista las características y el efecto de las perturbaciones, se ha construido una plataforma de laboratorio de dos grados de libertad sobre una mesa desestabilizadora de dos grados de libertad y se ha implementado un sistema de seguimiento visual mediante cámara CCD. Al analizar el efecto de las perturbaciones de la mesa desestabilizadora sobre la calidad del seguimiento visual, se ha observado experimentalmente una sustancial mejora al incorporar el nuevo esquema de rechazo de perturbaciones al sistema de control. Estos resultados se ilustran de forma gráfica.

El presente artículo se organiza del siguiente modo: En la sección 2, se presenta el modelo simplificado de la plataforma. En la sección 3, se propone la estructura de control deseada, dividida en subsistema visual y subsistema de control. En la sección 4 se ilustra la implementación de laboratorio de los controladores. La sección 5 presenta algunos resultados experimentales. Finalmente se aportan una serie de conclusiones en el apartado 6.

2 Modelo del sistema

El sistema consiste en una plataforma de dos grados de libertad inmersa en un sistema de referencia no inercial. La

síntesis de controladores para esta plataforma presenta retos como la estabilización robusta con rechazo de perturbaciones y el seguimiento visual de objetos móviles.

El modelo empleado corresponde a la plataforma de dos grados de libertad mostrada en la figura 1. Se compone de dos cuerpos principales: la base, cuya posición está determinada por el ángulo de acimut φ y el cuerpo principal que contiene la cámara y cuya coordenada generalizada es el ángulo de elevación θ . En nuestra instalación experimental, este sistema se asienta en una mesa mecanizada capaz de girar en dos ejes. El sistema completo referido a tierra posee cuatro grados de libertad, aunque en nuestro modelo consideraremos sólo la cinemática de la plataforma de dos grados de libertad en un sistema fijo, ya que el sistema de referencia de la mesa se supone desconocido en aplicaciones reales. Por tanto cualquier efecto de acoplamiento debido al movimiento de este sistema será tratado como perturbación externa.

El peso del cuerpo de elevación se concentra a lo largo del eje de giro, por lo que la energía potencial es invariante y por tanto desaparece de las ecuaciones. El origen del ángulo de acimut es arbitrario. La variable θ es cero cuando ambos cuerpos son perpendiculares. Las coordenadas generalizadas del sistema son (φ, θ) .

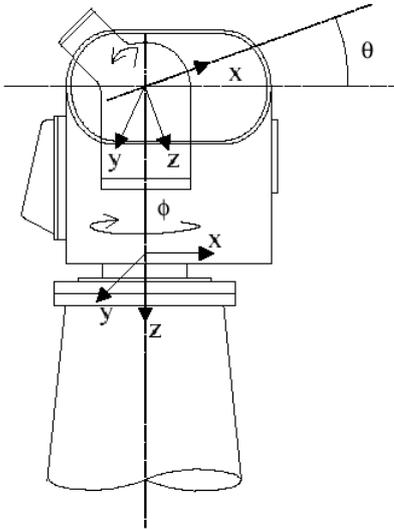


Figure 1: Plataforma de dos grados de libertad.

Las ecuaciones de movimiento se obtienen de manera sencilla en forma hamiltoniana. Bajo la suposición anterior, la energía mecánica total se reduce a la energía cinética:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} & \dot{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma(\theta) & 0 \\ 0 & I_{yy_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

que coincide al mismo tiempo con el lagrangiano y el hamiltoniano del sistema. El término $\Gamma(\theta)$ representa la siguiente

expresión:

$$\Gamma(\theta) \triangleq I_{zz_1} + I_{xx_2} \sin^2(\theta) + I_{zz_2} \cos^2(\theta) \quad (2)$$

donde I_{zz_1} es el momento de inercia en torno al eje z de la base, y I_{xx_2} , I_{yy_2} e I_{zz_2} lo son respecto a los ejes x , y and z respectivamente.

3 Seguimiento de objetos móviles en superficies no inerciales

El problema de control de esta plataforma puede ser tratado en primera aproximación como una estabilización de puntos de equilibrio. En efecto, si el objetivo visual no es móvil o su desplazamiento es lento (v.gr. satélite de comunicaciones no geostacionario), el error en posición puede ser estimado por la cámara y corregido mediante linealización por realimentación entre otras opciones.

Sin embargo si el objetivo de control es el seguimiento visual de un objeto móvil, el problema crece en interés. El movimiento del objetivo respecto a la línea de visión de la cámara puede darse en una o ambas de las siguientes situaciones:

- Seguimiento de objetos móviles desde una plataforma apoyada en tierra. La solución a este problema, al ser un caso particular, está contenida en el siguiente supuesto.
- Seguimiento de objetos fijos o móviles desde una plataforma apoyada en la cubierta de un buque u otra base móvil. En este caso el objeto a seguir tendrá un vector de velocidad no nulo con respecto al sistema de referencia ligado a la cabeza del pedestal, tanto si el objeto está en movimiento como si no. Esta velocidad será la composición del movimiento del propio objeto con el movimiento de la plataforma debido a las oscilaciones provocadas en el buque por el oleaje.

Siendo el segundo caso el más general, será el que abordaremos a continuación. Se planteará el control como un seguimiento de trayectorias basado en pasividad con rechazo de perturbaciones. Las trayectorias de referencia serán aquellas que hagan nulas las coordenadas del objeto en la imagen captada por la cámara y sus derivadas. Para ello se incluirá un módulo de precálculo de la trayectoria de referencia en virtud de los movimientos del objetivo en la imagen de la cámara. El esquema de control propuesto aparece en la figura 2.

3.1 Seguimiento visual

El diseño del primer bloque consiste en calcular la trayectoria deseada para las coordenadas de la plataforma, $q_d(t) = (\varphi_d(t), \theta_d(t))$ de modo que la imagen del objeto móvil se estabilice en el centro de la pantalla de la imagen capturada por la cámara CCD. La entrada de este bloque está formada por la posición 2D del objeto en la imagen, referida al centro

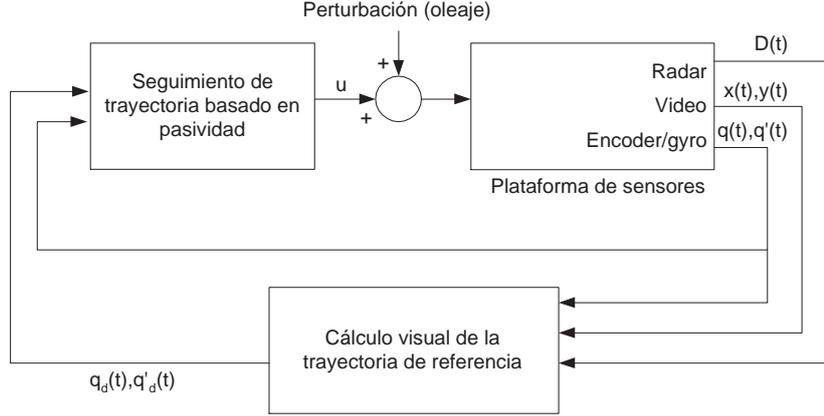


Figure 2: Esquema de control para seguimiento visual.

de la pantalla. Denotaremos estas coordenadas $(x(t), y(t))$. Supongamos que existe una trayectoria $q_d(t) \in \mathcal{C}^2$ única en las coordenadas articulares de la plataforma, tal que

$$q(t) = q_d(t) \Rightarrow (x(t), y(t)) = (0, 0), \forall t$$

Esta trayectoria es, evidentemente desconocida, pues depende de los movimientos del buque y del objeto móvil. Sin embargo, como se verá a continuación, bastará con conocer las trayectorias de las coordenadas del objeto en la imagen capturada por la cámara, para estimar $q_d(t)$ y sus derivadas en cada instante t . Conocidas éstas, se diseñará un controlador basado en pasividad para lograr estabilidad asintótica de la trayectoria, y consecuentemente

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t), y(t)) = (0, 0)$$

Es admisible afirmar que las coordenadas en pantalla (x, y) , así como las coordenadas tridimensionales en el sistema de referencia de la cámara, (X, Y, Z) , son medidas del error en seguimiento. Sin embargo, es necesario expresar dicho error en coordenadas articulares (φ, θ) , y así se obtendrá a continuación. La posición 2D del objetivo en la imagen capturada se supone estimada por un algoritmo de visión por computador estándar. El cálculo de las coordenadas (X, Y, Z) del objeto referidas al sistema de referencia de la cámara se deriva de las propiedades geométricas ilustradas en la figura 3. Por semejanza de triángulos, se tiene

$$\begin{aligned} \frac{x}{d} &= \frac{X}{Z} \\ \frac{y}{d} &= \frac{Y}{Z} \end{aligned}$$

siendo d la distancia focal al plano de la imagen, un parámetro característico (y a menudo ajustable) de la cámara. Tras algunas manipulaciones se despejan las coordenadas 3D

$$\begin{aligned} X &= \frac{xD}{\sqrt{d^2 + r^2}} \\ Y &= \frac{yD}{\sqrt{d^2 + r^2}} \end{aligned}$$

donde $r^2 = x^2 + y^2$. El error de orientación de la cámara en función de x e y viene dado por

$$\begin{aligned} e_\varphi &= \arctan\left(\frac{X}{Z}\right) = \arctan\left(\frac{x}{d}\right) = \varphi_d - \varphi \\ e_\theta &= \arctan\left(\frac{Y}{Z}\right) = \arctan\left(\frac{y}{d}\right) = \theta_d - \theta \end{aligned}$$

Si derivamos esta expresión, se tiene

$$\begin{aligned} \dot{e}_\varphi &= \frac{d}{dt} \left(\arctan \frac{X}{Z} \right) = \frac{d}{dt} \left(\arctan \frac{x}{d} \right) \\ &= \frac{\dot{x}d}{d^2 + x^2} = \dot{\varphi}_d - \dot{\varphi} \\ \dot{e}_\theta &= \frac{d}{dt} \left(\arctan \frac{Y}{Z} \right) = \frac{d}{dt} \left(\arctan \frac{y}{d} \right) \\ &= \frac{\dot{y}d}{d^2 + y^2} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}, \end{aligned}$$

De donde obtenemos trayectoria articular deseada y sus derivadas en el instante t

$$q_d(t) = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\varphi(t) \\ e_\theta(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\dot{q}_d(t) = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_\varphi(t) \\ \dot{e}_\theta(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Esta trayectoria objetivo calculada en tiempo real será la referencia del bloque de estabilización de trayectorias que se diseñará a continuación con métodos basados en pasividad.

3.2 Subsistema de estabilización de trayectorias

Para lograr el seguimiento de trayectorias partiremos de las ecuaciones de Euler-Lagrange, y emplearemos los resultados de [4]. Dada la matriz de inercia del pedestal

$$M = \begin{bmatrix} \Gamma(\theta) & 0 \\ 0 & I_{yy_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

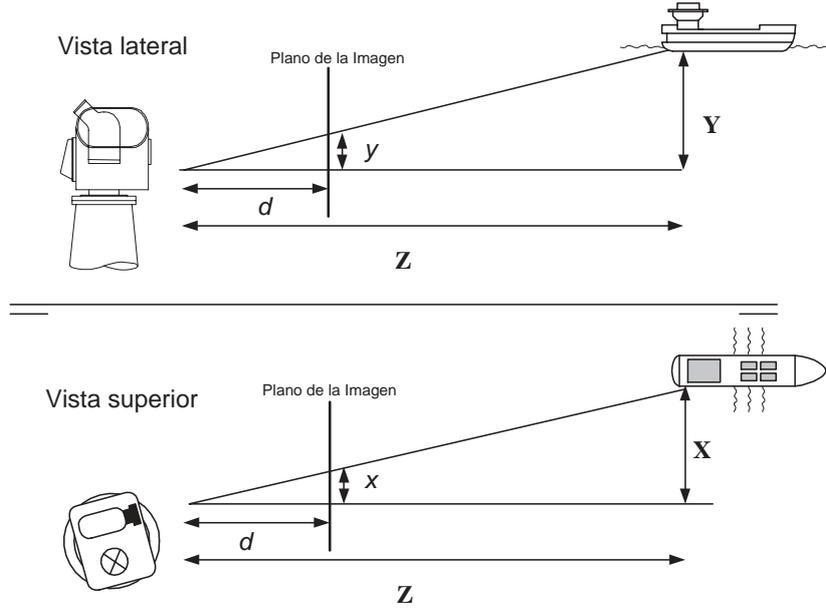


Figure 3: Coordenadas en pantalla y coordenadas reales.

se escribe la dinámica en bucle abierto en la estructura de Euler-Lagrange para sistemas robóticos

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau. \quad (6)$$

donde los términos de energía potencial no son considerados en esta aplicación por razones ya expuestas, aunque si existieran el tratamiento sería equivalente.

Para estabilizar la trayectoria de referencia $q_d(t)$ aplicaremos la ley de control

$$\tau = M(q)\dot{\xi} + C(q, \dot{q})\xi + \nu \quad (7)$$

donde

$$\xi = \dot{q}_d - \Lambda(q - q_d) \quad (8)$$

y $\Lambda = \Lambda^T > 0$. Sustituyendo en (7) se obtiene

$$M(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s = \nu \quad (9)$$

donde $s \triangleq \dot{q} - \dot{q}_d$. Definiendo la función de energía como

$$H(s, q) = \frac{1}{2}s^T M(q)s \quad (10)$$

entonces a lo largo de las trayectorias (9)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}H &= s^T M(q)\dot{s} + \frac{1}{2}s^T \dot{M}s \\ &= -s^T C s + \frac{1}{2}s^T \dot{M}s + s^T \nu = s^T \nu \end{aligned} \quad (11)$$

La última expresión se debe a la antisimetría de la matriz $(\dot{M}-2C)$. El sistema es disipativo respecto a $(s^T \nu)$ y un mapa pasivo $\nu \mapsto s$ porque $H \geq 0$, por cualquier condición inicial. Si definimos, adicionalmente

$$\hat{\nu} = Ks \quad (12)$$

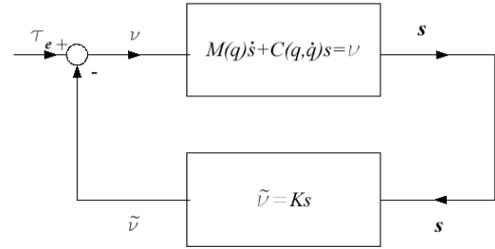


Figure 4: Estructura de control para seguimiento de trayectorias

donde $K = K^T > 0$ es una matriz definida positiva que aparece en la estructura de control (Fig.4) en la parte de realimentación. Entonces se tiene que

Proposition 3.1. *La ley de control*

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)[\ddot{q}_d - \Lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)] \\ &+ C(q, \dot{q})(\dot{q}_d - \Lambda(q - q_d)) \\ &+ K_d[\dot{q} - \dot{q}_d + \Lambda(q - q_d)] \end{aligned}$$

donde $K_d = K_d^T > 0$ y $\Lambda = \Lambda^T > 0$ are son parámetros de ajuste, y $q_d(t)$ es la trayectoria calculada que se ha de seguir, estabiliza asintóticamente el error $e(t) = q(t) - q_d(t)$ en el origen

La prueba es conocida tras los resultados de [4], y no se presentará en este lugar.

3.3 Rechazo de perturbaciones en seguimiento de trayectorias

El esquema propuesto se basa en el celebrado controlador de Slotine y Li [2], que en principio carece de propiedades de rechazo de perturbaciones cuantificable cuando se toma el error en posición del robot como salida del sistema. Un hecho conocido de la literatura (véase [3]) es que la adición de un término proporcional al error al controlador de Slotine y Li proporciona un método de rechazo de perturbaciones en sentido \mathcal{L}_2 hacia la salida $e(t) = q(t) - q_d(t)$ con un nivel de atenuación γ arbitrariamente bueno en caso de sistemas completamente actuados. La proposición anterior se transforma en

Proposition 3.2. *Considérese la plataforma de dos grados de libertad con ley de control*

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)[\ddot{q}_d - \Lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)] \\ &+ C(q, \dot{q})(\dot{q}_d - \Lambda(q - q_d)) \\ &+ K_d[\dot{q} - \dot{q}_d + \Lambda(q - q_d)] + K_p(q - q_d) \end{aligned}$$

con todas las constantes definidas en la proposición 3.1, y supóngase adicionalmente que se cumplen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} K_d &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma^2} + 1 + \lambda \right) \\ K_p &= \frac{1}{2} (\gamma^2 + 1 + \lambda). \end{aligned}$$

Entonces, la atenuación \mathcal{L}_2 desde la entrada a la salida τ la salida $(q - q_d)$ es inferior a la ganancia arbitrariamente definida γ , y el comportamiento transitorio puede ser ajustado usando el escalar positivo λ .

La prueba de este resultado puede leerse en [3]. Lo emplearemos para su implementación en la plataforma real de dos grados de libertad con realimentación visual, para lo que se describirá la conexión entre el sistema de tratamiento de imagen y la estructura aquí descrita.

4 Implementación

En la figura 5 aparece el sistema de experimentación de laboratorio. La plataforma gira en dos ejes impulsados por motores de corriente continua tipo brushless. La mesa desestabilizadora consta de dos motores trifásicos controlados con un variador de velocidad. La medida de los sensores de posición (encoders incrementales e inclinómetros para la mesa) y velocidad (giróscopos) se realimenta al PC que contiene dos tarjetas (una por eje) de adquisición y control dSpace basadas en el DSP TMS320C31 y un entorno de control en tiempo real ControlDesk.

Para la realimentación visual se ha desarrollado un algoritmo sencillo de tratamiento de imágenes que se ejecuta en un PC distinto del de control de la plataforma. Dicho algoritmo determina las coordenadas x e y de un círculo negro en la imagen capturada y las ajusta en función de los

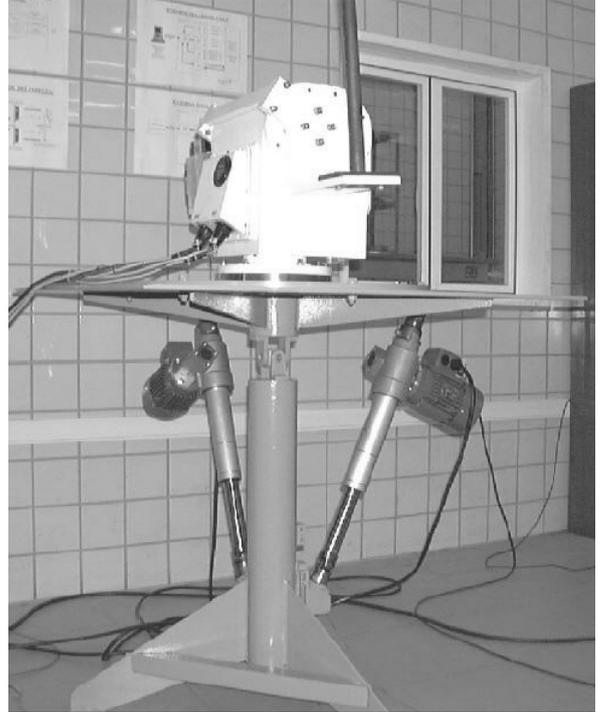


Figure 5: Plataforma experimental

parámetros calibrados de la cámara. A continuación se calculan los dos ángulos de la línea que apunta al objeto, referidos al eje longitudinal de la cámara. Este eje coincide con el de la parte superior de la plataforma. Conocidas estas coordenadas, se transmiten por medio de datagramas UDP sobre una red Ethernet des congestionada hacia el ordenador de control de la plataforma. En esta máquina se ha implementado una aplicación de memoria compartida que recibe los datagramas y transmite los valores a las tarjetas DSP. El tiempo de muestreo logrado con este esquema es de 20 milisegundos, sin haberse apreciados efectos significativos relacionados con el retraso de comunicación.

La identificación de los parámetros del modelo físico de la plataforma se han obtenido mediante ajuste mínimo cuadrático sobre los datos capturados por el PC. La compensación de fricción (ver apartado siguiente) es posible mediante la identificación de los coeficientes del modelo de LuGre tal y como se indica en [1].

5 Resultados experimentales

La calidad de los resultados incrementa considerablemente al incorporar a nuestro controlador el esquema de prealimentación para la compensación de fricción basado en el modelo de LuGre presentado en [1].

Con el controlador presentado, la figura 6 muestra los resultados experimentales. La ganancia \mathcal{L}_2 del mapa perturbación-salida ha sido ajustada de acuerdo con la proposición 3.2. Aunque el valor de γ puede hacerse arbitrariamente

pequeño, en los experimentos se ha observado que no se puede reducir por debajo de cierto valor debido a la aparición de una vibración sostenida. Esta vibración, debida a dinámicas no modeladas, se ve amplificada al aumentar el término derivativo (disipativo) del controlador, y esto se produce precisamente al reducir el valor de γ .

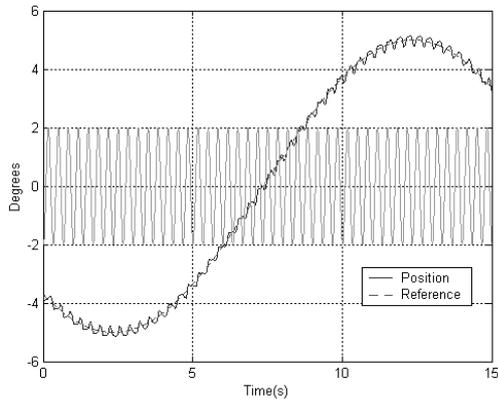


Figure 6: Seguimiento visual de objetivo fijo con movimiento de mesa senoidal y perturbación aditiva.

6 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la implementación práctica de un controlador basado en la estructura hamiltoniana con realimentación de visual y atenuación de perturbaciones.

El diseño se basa en el controlador de Slotine and Li mejorado para incorporar un esquema de rechazo de perturbaciones. Como aportación novedosa esta estructura ha sido inmersa en contexto poco habitual en trabajos de pasividad: el seguimiento visual. La extensión es natural y viene dada por el hecho de que la referencia móvil del controlador de Slotine y Li es calculada basándose en consideraciones geométricas por un subsistema de seguimiento visual.

Se ha estudiado un sistema real formado por una plataforma de dos grados de libertad sobre una mesa desestabilizadora emulando la superficie de un buque. Se ha realimentado el sistema mediante encoders, giróscopos y una cámara CCD para realimentación visual. De forma experimental se ha ilustrado el comportamiento del sistema frente a la presencia de perturbaciones externas.

Acknowledgements. Los autores desean expresar su agradecimiento al ministerio español de ciencia y tecnología patrocinar este trabajo en el marco de los proyectos DPI2001-2424-C02-01 y DPI2000-1218-C04-01.

References

[1] Olsson H. Lischinsky P. Astrom K.J., Canudas de Wit C. A new model for control on systems with friction. *IEEE Transactions of Automatic Control*, vol.40, No.3, pp. 419-425, 1995.

[2] Slotine J.J. and Li W. Adaptive manipulator control: a case study. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 13(5):995–1003, 1988.

[3] Sadegh N. and Horowitz R. Stability and robustness analysis of a class of adaptive controllers for robot manipulators. *Int. Journal. rob. Res.*, 9:74–92, 1990.

[4] A. Van der Schaft. *L₂-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*. Springer-Verlag, 1989.

[5] Cheng D. Wang, Y. and Ge Y. Li, C. Dissipative hamiltonian realization and energy-based l_2 -disturbance attenuation control of multimachine power systems. Internal report 2002.