

AADECA 94

SEMANA DEL CONTROL AUTOMATICO

Organizada por

AADECA



**ASOCIACION ARGENTINA
DE CONTROL AUTOMATICO**

Declarada de Interés Nacional por:

- Presidencia de la Nación-Secretaría de Ciencia y Tecnología. Resolución N° 111/94.
- Ministerio de Economía-Secretaría de Industria y Comercio Exterior. Resolución N° 124.
- Ministerio de Educación-Consejo Nacional de Educación Técnica. Resolución N° 1290/94.

Auspiciada por:

- Presidencia de la Nación-Secretaría de Ciencia y Tecnología. Resolución N° 070.
- Ministerio de Economía-Secretaría de Industria y Comercio Exterior. Resolución N° 124.
- Ministerio de Cultura y Educación, Universidad Tecnológica Nacional. Resolución N° 120/94.
- Universidad de Buenos Aires. Resolución N° 322/94.
- Unión Industrial Argentina

AADECA



ASOCIACION ARGENTINA DE CONTROL AUTOMATICO

CONSEJO DIRECTIVO AADECA

Presidente:	Ing. Jonas Paiuk
Vicepresidente 1º:	Ing. Aurelio T. Casucci
Vicepresidente 2º:	Ing. Zoltán L. Barkasz
Secretario General:	Ing. Victor F. Marinescu
Prosecretario:	Ing. Antonio A. Quijano
Tesorero:	Ing. Osvaldo H. Capino
Protesorero:	Ing. Ricardo J. Agostinelli
Vocales Titulares:	Ing. Oreste D. Lupi Dr. Ricardo S. Sánchez Peña
Vocales Suplentes:	Ing. Sergio Szklanny Ing. Ricardo O. Carelli
Adscripta a Consejo Directivo:	Susana Terlizzi

COMISION DE PROGRAMACION

Presidente:	Ing. Juan P. Weisz
Miembros:	Ing. Zoltán L. Barkasz Ing. Carlos Candiani Dr. Carlos D'Attellis Ing. Armando De Giusti Ing. Alfredo Desages Ing. Carlos A. Godfrid Ing. Vicente J. Köppel Dr. Benjamín Kuchen Dr. Gregorio R. Meira Ing. Carlos H. Muravchik Ing. Antonio A. Quijano Ing. José Romagnoli Dr. Ricardo R. Sánchez Peña
Programación de Cursos:	Ing. Víctor F. Marinescu



XIV SIMPOSIO NACIONAL DE CONTROL AUTOMATICO

NOMINA DE REVISORES

Anigstein, Pablo
Barkasz, Zoltan
Condiani, Carlos
Carelli, Ricardo
Colombo, Armando
Correa, Juan Carlos
D'Attellis, Carlos
De Giusti, Armando
Desages, Alfredo
Di Sciascio, Fernando
Godfrid, Carlos
Infante, Jorge
Justo, Pablo
Köppel, Vicente
Kuchen, Benjamín
Marchetti, Jacinto
Marques, Dardo
Meira, Gregorio
Muravchik, Carlos
Mut, Vicente
Nasisi, Oscar
Parrilo, Pablo
Patiño, Daniel
Postigo, José
Quijano, Antonio
Romagnoli, José
Rondelli, Eduardo
Sánchez Peña, Ricardo

SUMARIO

ROBOTICA

Moderador: Ing. A. Quijano

Precompensación adaptable para manipuladores robóticos usando redes neuronales. Experimentación.

D. Patiño, R. Carelli, B. Kuchen

1

Control robusto de impedancia para robots con realimentación sensorial.

V. Mut, R. Carelli, B. Kuchen

7

Sistema de teleoperación robótica con reflexión de fuerza y control de impedancia.

A. Lage, C. Schugurensky, J. Postigo, R. Carelli

13

Control de impedancia para robots móviles con realimentación sensorial.

H. Secchi, V. Mut, R. Carelli

19

Moderador: Ing. C. Godfrid

Interfase de programación orientada a objetos para el control de ejes robóticos.

R. Ramos, J. Yamamoto, F. Rendo, M. Anigstein

25

Robot semi-industrial RSA-1.

O. Morán, F. J. Abate

30

Integración de sensores para el control de un vínculo flexible en robótica.

J. Guivant, F. Masson, G. Bortolotto, E. Paolini

36

Control visual adaptable de robots con especificación de trayectoria.

O. Nasisi, R. Carelli, B. Kuchen

42

Moderador: Ing. C. Candiani

Celda flexible experimental de manufactura.

R. S. Apóstoli, D. Morán, G. Trombotto, F. J. Abate

48

Control en tiempo real de la dinámica de una celda de fabricación flexible de laboratorio basado en redes de Petri.

G. D. Trombotto, C. O. Maidana

54

Planificación de tareas de ensamblado usando redes de Petri con asistencia de metarreglas lógicas.

A. W. Colombo, M. Martín, B. Kuchen

60

Diseño e implementación de una estructura de control distribuido para sistemas de dinámica rápida con aplicación a manipuladores robóticos.

E. Zavalla, T. Durán, A. Assandri

66

Análisis de un sistema de manufactura flexible modelado con redes de Petri.

J. E. Pellicer, A. W. Colombo, R. Carelli, B. Kuchen

72

Sistemas de eventos discretos y redes de Petri.

Propuesta de control de coordinación para un sistema flexible de manufactura.

A. W. Colombo, J. E. Pellicer, R. Carelli, B. Kuchen

78

TEORIA MATEMATICA EN CONTROL

Moderador: Ing. C. Muravchik

Lugar de las raíces de funciones transferencia con retardo. Nuevo método de obtención y su cálculo automático.

V. D. Carranza, P. N. Baldini

84

Ajuste óptimo de controlador PID clásico en un sistema con retardo y su cálculo automático.

V. D. Carranza, P. N. Baldini

89

Diferentes enfoques y soluciones al problema de filtrado y control de lazo abierto robustos.

J. A. de Dona, R. H. Milocco

94

Asignación óptima de polos con observador, para un sistema de respuesta inversa en control de procesos. Consideraciones técnicas sobre función.

V. J. Köppe

100

Moderador: Dr. C. D'Attellis

Replanteo del método de Donahue.

C. V. Rivarossa, A. J. Quiroga

108

Una aplicación de redes binarias adaptativas (ALN) en control.

A. Fonseca, E. Ferreira

113

INTEGRACIÓN DE SENSORES PARA EL CONTROL DE UN VÍNCULO FLEXIBLE EN ROBÓTICA.

JOSÉ GUIVANT*, FAVIO MASSON**, GUSTAVO BORTOLOTTI***, EDUARDO PAOLINI*.

* DTO. ING. ELÉCTRICA UNS - ** DTO. ING. ELÉCTRICA UNS - CONICET

*** PLAPIQUI - CONICET - DTO. ING. ELÉCTRICA UNS

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional del Sur.
Av. Alem 1253 - (8000) Bahía Blanca
e-mail: iepaolin@arcriba.edu.ar

Resumen:

En este trabajo se presentan técnicas de medición de una barra flexible con el fin de obtener información para el control de la misma. Se presentan primero resultados de las técnicas mencionadas, basadas en la inferencia de una función posición de la punta a través de cuatro sensores de deformación colocados en puntos predeterminados del vínculo. Luego se utilizan estos sensores más un resolutor ubicado en el eje del motor, para identificar el sistema y posteriormente controlarlo.

SENSOR INTEGRATION FOR THE CONTROL OF A FLEXIBLE LINK IN ROBOTICS

Abstract:

Accurate control of flexible structure manipulators requires real time knowledge of joint position function for a single flexible link is derived based on the readings of five sensors: one resolver at the hub, and four strain-gauges placed alongside the beam. Experimental results show that very precise tip position can be inferred when the beam is flexed due to the effect of steady transversal loads or dynamic torques applied to the hub. Finally, a controller that takes into account the position information is derived to control the tip, and simulation results are presented.

1- INTRODUCCIÓN

Es conocido que para la determinación exacta de la posición del extremo libre de una barra flexible no es suficiente la medición del ángulo del extremo fijo. Esto obliga a utilizar medidas adicionales. En la literatura del tema se menciona el uso de sensores tales como cámaras de video, "strain gauges", etc. El empleo de estos sensores plantea el problema adicional de la determinación del rango de frecuencias útiles de cada sensor.

Temas centrales de este trabajo son la selección de medidas en función del rango de frecuencias y la utilización de la información de deformación instantánea de la barra para el control de la posición del extremo libre de la misma.

En este trabajo se han utilizado dos tipos de sensores, a saber: resolutores para determinar las posiciones del eje y extremo libre y sensores de deformación (strain gauges) en puntos adecuados a lo largo de la barra.

La posición de cualquier punto de la barra flexible puede ser obtenida como la suma del arco debido al ángulo rotado por el motor, representando la barra rígida ideal, más el desplazamiento respecto de esta posición debido a la flexión del vínculo.

Las distintas técnicas de medición se emplean en la identificación del modelo del manipulador. Se presentan resultados de simulación y experimentales sobre un sistema desarrollado en el Laboratorio de Control y Robótica de la UNS.

2- INTEGRACIÓN DE SENSORES

El problema del sensado del extremo libre del manipulador flexible a través de sensores de deformación a lo largo de la barra, fue tratado en trabajos anteriores (Masson, 1993).

En este trabajo se utilizan cuatro *strain-gauges* ubicados a lo largo de la barra (Fig. 2.1), en posiciones donde mediante un proceso de optimización numérica se encontró que se obtenían puntos de máxima información.

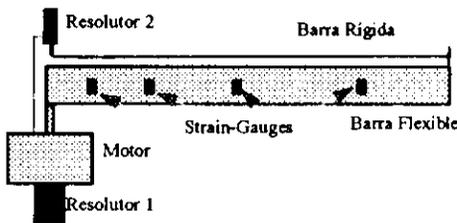


Fig. 2.1: Esquema del manipulador y distribución de sensores

El principio de medición utilizado es la descomposición de la función posición de cualquier punto de la barra en una suma de autofunciones dependiente del tiempo y el espacio como muestra la siguiente ecuación (2.1):

$$P(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j(t) \Lambda_j(x) \quad (2.1)$$

donde $\Lambda_j(x)$ son el conjunto de autofunciones espaciales de la flexión de la barra cuya expresión esta dada por:

$$\begin{aligned} \Lambda_k(x) = & [\cos(\lambda_k x) - \cosh(\lambda_k x)] \\ & - \sigma_k [\sinh(\lambda_k x) - \sin(\lambda_k x)] \\ & + 2a \sinh(\lambda_k x) / \lambda_k^3 - 2ax / \lambda_k^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_k = & [\sin(\lambda_k L) - \sinh(\lambda_k L)] \\ & + 2a \cosh(\lambda_k L) / \lambda_k^3 \\ & / [\cos(\lambda_k L) + \cosh(\lambda_k L)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde $a=m/J$, con m es la masa distribuida por unidad de longitud, J el momento de inercia en el eje del motor y los α_j son las funciones temporales de peso.

La ecuación 2.1 puede ser truncada a un número finito de autofunciones. Esto en la práctica es posible ya que el ancho de banda de los actuadores y sensores no puede responder a las frecuencias de los modos mas altos. Además estos modos son difíciles de excitar en estructuras reales y tienen coeficientes de amortiguamiento grandes.

Ahora, los *strain-gauges* miden curvatura local, que para pequeñas flexiones, su valor coincide con la segunda derivada espacial de $P(x, t)$. Si $\varphi_j(x)$ es la segunda derivada espacial de $\Lambda_j(x)$:

$$\varphi_j(x) = \frac{d^2 \Lambda_j(x)}{dx^2} \quad (2.4)$$

la ecuación 2.1 nos queda:

$$\frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x^2} = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j(t) \varphi_j(x) \quad (2.5)$$

donde el término de la izquierda corresponde a las medidas hechas sobre la barra y el de la derecha, según se ve en la ecuación 2.2, los $\varphi_j(x)$ son conocidos si se tienen los valores de inercia, masa, etc. Es decir, la única incógnita son los $\alpha_j(t)$, que dependen de la deformación instantánea de la barra.

Así, se ubican entonces los cuatro sensores sobre la barra maximizando una función objetivo para lograr la máxima cantidad de información en la medición. Con las medidas se puede construir un sistema de la forma:

$$\begin{bmatrix} \varphi_1(x_1) & \varphi_2(x_1) & \dots & \varphi_4(x_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(x_4) & \varphi_2(x_4) & \dots & \varphi_4(x_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1(t) \\ \vdots \\ \alpha_4(t) \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} M_{f1}(x_1, t) \\ \vdots \\ M_{f4}(x_4, t) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

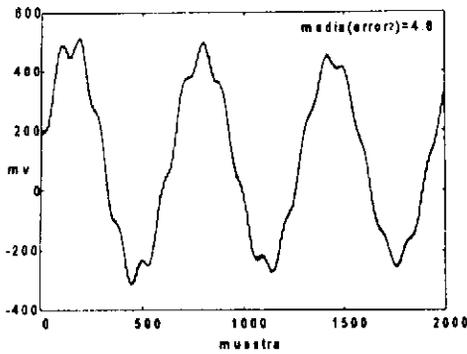


Fig. 2.4: Superposición de la señales de la posición en la punta para una experiencia distinta a la de entrenamiento

El error entre la señal verdadera y la estimada de la posición en la punta para la fig. 2.4 se mantuvo entre ± 7.5 mv.

3. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Se intenta identificar entonces, el modelo del manipulador flexible para desarrollar un controlador de desempeño deseado, utilizando las técnicas de sensado ya expuestas.

El manipulador flexible construido en el L.C.R. de la U.N.S. consta de dos varillas metálicas de acero de 1 metro de largo, 3 cm. de ancho y 1 mm. de espesor. Están montadas sobre el eje del motor en forma transversal. El actuador es un motor de corriente continua manejado con un amplificador de trasconductancia, lo que implica que con la tensión de entrada se controla directamente el torque del motor. La posición del extremo acoplado al eje se mide por medio de un resolutor. La posición del extremo libre se sensa con un sistema de medidas de flexión, con la metodología presentada en el punto 2. Las salidas de los sensores se adquieren a través de sendos canales de entrada analógica de una placa de adquisición en la computadora. El amplificador que maneja al motor de C.C. se controla por un canal de salida analógica de la misma placa. El software de soporte fue desarrollado en el Laboratorio de Control y Robótica.

Descripción del sistema

En Nebot (1988) se presentaron esquemas de identificación para encontrar los parámetros más relevantes de la planta, en forma experimental. Las dos funciones transferencia completas son:

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{I_T s^2} \prod_1^{\infty} \frac{s^2 + 2\zeta_i \Omega_i s + \Omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{Y(s)}{T(s)} = \frac{L}{I_T s^2} \prod_1^{\infty} \frac{s^2 - 2\zeta_i \alpha_i s + \alpha_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}$$

donde θ es el ángulo en el eje del motor, $T(s)$ es el torque de entrada, I_T es el momento total de inercia e $Y(s)$ es la posición del extremo de la barra flexible. Cuando se consideran los modos de alta frecuencia los polos están muy cerca de los ceros, esto hace muy difícil su discriminación. En este caso se obtiene una buena aproximación considerando los primeros modos. Ésto se justifica en el ancho de banda de actuadores y sensores que no puede responder a los modos más altos y estos modos en estructuras reales son difíciles de excitar y tienen coeficientes de amortiguamiento muy grandes.

Para cualquier punto x en la varilla, la función transferencia será:

$$\frac{\theta(x, s)}{T(s)} = \frac{1}{I_T s^2} \prod_{i=1}^{\infty} \frac{s^2 + 2\zeta_i \Omega_i s + \Omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (3.2)$$

$$\Omega_i = \Omega_i(x)$$

Donde se observa que los polos del sistema son los mismos para cada x , es decir independientes de la posición en la varilla, en cambio los ceros varían de acuerdo a la posición donde se modela el sistema.

Identificación paramétrica del sistema

Se realizó una identificación, *paramétrica* que apunta a obtener los coeficientes (parámetros) de un modelo discreto.

La frecuencia de muestreo se eligió teniendo en cuenta pruebas preliminares fuera de línea. En ella se observaron los primeros modos del sistema y se pudo estimar el rango de frecuencias donde la dinámica la planta no es despreciable. De ello surgió el valor de $T_s = 10$ ms. La identificación de los parámetros se realizó aplicando algoritmos de identificación del tipo RLS.

Las rutinas de identificación se 'alimentan' con los datos de la acción de control en la entrada de la planta y la salida de la misma. Lo que significa que se estima el modelo de la planta de lazo abierto.

Para excitar en forma persistente al flexible se utiliza una señal *chirp lineal*, la cual barre desde 0 a 25 Hz. Los resultados obtenidos para la relación entre el torque y la dinámica del extremo libre relativo al eje del motor se muestran en la siguiente tabla (3.1):

Tabla 3.1: Polos y ceros del modelo del modelo discreto

Singularidad	Valor
Polos 1,2	$0.3399 \pm 0.9214i$
Polos 3,4	$0.7869 \pm 0.6022i$
Polos 5,6	$0.9700 \pm 0.2115i$
Polo 7	$0.2425 \pm 0.9173i$
Polo 9	1
Ceros 1,2	$0.8729 \pm 1.2510i$
Ceros 3,4	$0.2471 \pm 1.1795i$
Cero 5	$0.7826 \pm 0.1990i$
Cero 6	1.5948
Cero 7	0

En la siguiente figura se muestran las respuestas en frecuencia real del sistema y la que corresponde al modelo encontrado sin considerar el polo en 1 introducido por el motor.

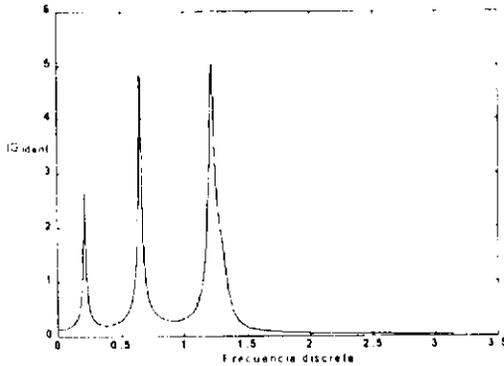


Fig. 3.2: Respuesta en frecuencia del modelo

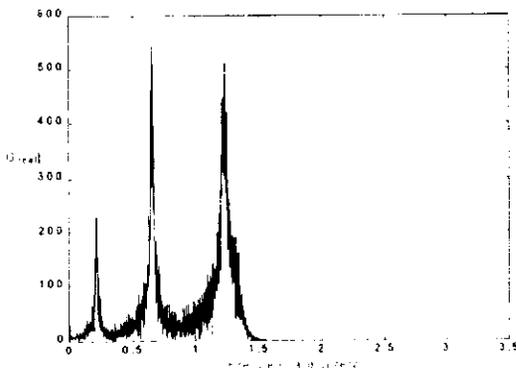


Fig. 3.2: Respuesta en frecuencia del sistema

4. CÁLCULO DEL CONTROLADOR

El esquema de control propuesto es una modificación del propuesto por Guivant (1992) y se muestra en la figura 4.1, es decir una realimentación de la salida, donde la acción de control se calcula según:

$$c(z) = k_0 r(z) - (k_1 z^{-1} + k_2 z^{-2}) y(z) + \frac{Q(z)}{1 + k_p z^{-1}} \quad (4.1)$$

donde $Q(s)$ representa la parte invertible de la planta, $c(z)$ es la acción de control, $y(z)$ es la posición de la punta calculada a partir de los strain-gauges según la formula 2.10 donde se tomó $x_p \cdot L$ y k_0, k_1, k_2, k_p las constantes del controlador incógnitas que intentan manejar la parte no invertible de la planta (Fig. 4.1).

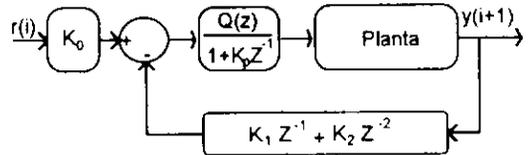


Fig. 4.1: Esquema de control

Con el conocimiento de la estructura y parámetros del modelo de la planta y de la estructura del controlador solo restan hallarse las constantes del mismo. A tal fin se consideró el método propuesto por Bortolotto-Desages (1989). El mismo se basa en la minimización numérica de una función objetivo determinada con respecto a las constantes del controlador. Esta función evalúa el comportamiento del sistema a lazo cerrado ante una entrada determinada y en un horizonte finito de tiempo. La forma general de esta función objetivo es:

$$F(K) = \sum_{n=1}^H P_1(n) e(n)^2 + \sum_{n=1}^H P_2(n) (u(n) - u(n-1))^2 + \sum_{n=1}^H P_3(n) (e(n) - e(n-1))^2 \quad (4.2)$$

donde $K = [k_0, k_1, k_2, k_p]$ es el vector cuyos elementos son las variables de optimización, $y(n)$ la salida real del sistema, $u(n)$ la acción de control, $e(n) = y_{ideal}(n) - y(n)$ es el error, $y_{ideal}(n)$ la salida deseada a lazo cerrado, $P_j(n)$ las funciones de peso y H el horizonte.

En este caso se eligió como función objetivo la siguiente:

$$F(K) = \sum_{n=1}^H e(n)^2 + P_1 \sum_{n=1}^H (u(n) - u(n-1))^2 \quad (4.3)$$

El vector K es la variable de optimización. Sus elementos son las constantes del controlador. Como entrada al sistema se supone un escalón de posición y como salida deseada un escalón suavizado por un filtro de primer orden. H se considera de 300 muestras para un tiempo de muestreo de 15 ms. La rutina de minimización usada es tipo "simplex".

Los resultados se muestran en la siguiente tabla (4.1):

Tabla 4.1: Constantes del controlador

K de Controlad.	Valor
K_0	1.4121
K_1	0.1147
K_2	0.0638
K_p	0.6194

Las simulaciones hechas se muestran la siguiente figura:

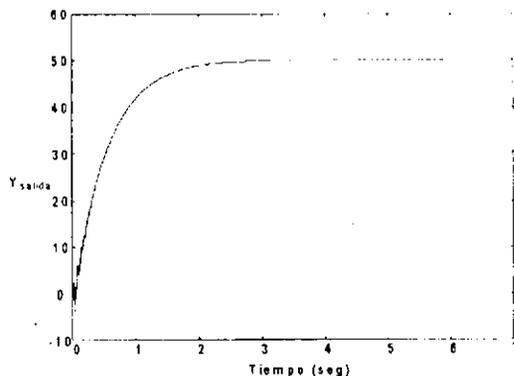


Fig. 4.2: Resultados de simulación da la salida de la planta.

5- CONCLUSIONES

Uno de los resultados más interesantes de este trabajo es la posibilidad de obtener muy buena calidad de información de posición de cualquier punto de la barra, inferida a través de pocos sensores de deformación, con constantes de tiempo pequeñas que permite obtener información instantánea.

Estos sensores son utilizados en la industria por su bajo costo y confiabilidad (no posee partes móviles que se desgasten), en estructuras mucho más rígidas que las utilizadas en este trabajo (pandeo de columnas de hormigón, etc.). Esto último permite pensar en la aplicación de estas técnicas a robots industriales.

Por último, y desde la óptica del control, se demuestra la mejora del control de la posición de la punta teniendo información colocada y no colocada (eje del motor y punta respectivamente).

6- RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al alumno de grado Pablo Vecchi, proyectista del Laboratorio de Control y Robótica y al Ing. Roberto Carabajal, por su colaboración en la construcción del manipulador y los circuitos eléctricos de excitación de los motores. Además queremos mencionar especialmente la colaboración de docentes del Laboratorio de Análisis Experimental de Tensiones del Dto. de Ingeniería de la UNS, por la donación de los sensores de deformación e información sobre la utilización de los mismos.

Por último, este trabajo fue financiado en parte con fondos de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNS.

7- BIBLIOGRAFÍA

- Masson, F. & Bortolotto, G., & Guivant, J., & Paolini, E. (1993). "Sensores distribuidos para la determinación de los modos de flexión de una barra en estado estacionario", *RPIC '93*.
- Guivant J. & Masson F. & Nebot E., "Identificación en tiempo real de los parámetros de un brazo Flexible", *RPIC 1991*.
- Nebot E., "Modelling and control of a single link flexible manipulator" *Ph.D. Thesis, Colorado State University, June 1988*.
- Guivant J. & Bortolotto G. & Nebot E., "Manipulador Flexible. Identificación en línea y sintonía automática del controlador asociado.", *AADECA 1992*.
- Bortolotto, G. & Desages A. & Romagnoli J. "Automatic tuning of PID controllers through response optimization over a finite time horizon", *Chemical Engineering Communication, 1989*.