



I Workshop Español de Robótica, ROBOT 2007



DISEÑO Y CONTROL DE ROBOTS FLEXIBLES

**Prof. Vicente Feliu Batlle
Universidad de Castilla-La Mancha
Zaragoza, Septiembre 11-14, 2007**



Índice

1. Definición y motivación
2. Estado del arte
3. Estática
4. Dinámica
5. Control de posición
6. Control de fuerza
7. Ejemplos
8. Conclusiones



Índice

- **Definición y motivación**
- Estado del arte
- Estática
- Dinámica
- Control de posición
- Control de fuerza
- Ejemplos
- Conclusiones



Definición

- **CONCEPTO**

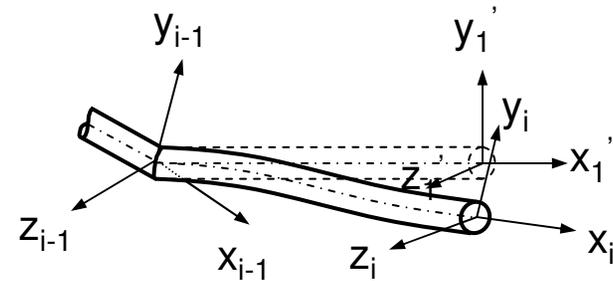
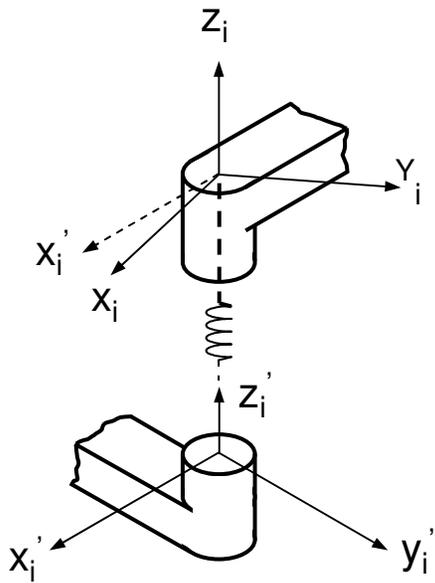
- *Robots flexibles son aquellos que tienen algún componente mecánico que se deforma elásticamente al aplicarse una fuerza o par*

- **TIPOS DE FLEXIBILIDAD**

- En las articulaciones (flexible joints)
- En los miembros (flexible links)



Definición



Flexibilidad en los miembros

Flexibilidad en las articulaciones



Motivación

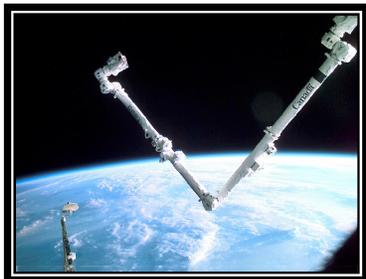
ANTECEDENTES



GRUA TELESCÓPICA COMO BRAZO FLEXIBLE



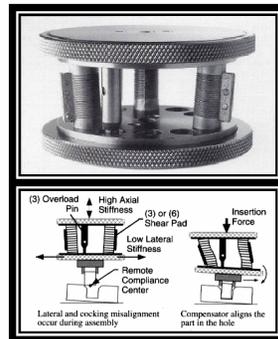
ANTENAS



SSRMS



ROBOT FLEXIBLE DE TRES GRADOS DE LIBERTAD



MUÑECA ELÁSTICA



SILLA DE RUEDAS CON UN BRAZO ROBOTIZADO

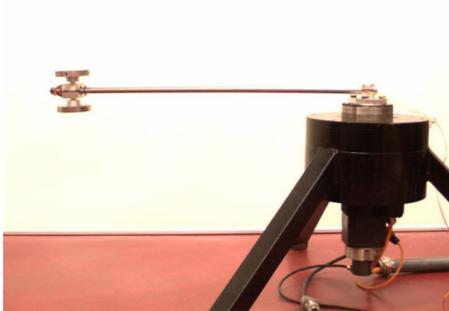


SILLA DE RUEDAS ANTI VIBRACIONES



Motivación

PLATAFORMAS LABORATORIO UCLM



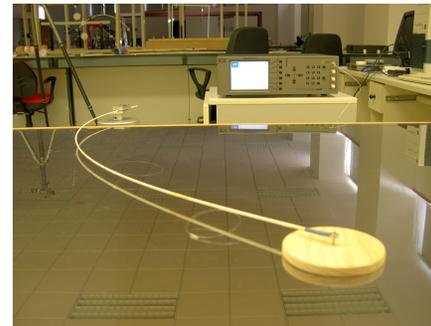
**ROBOT FLEXIBLE DE UN
GRADO DE LIBERTAD
UN MODO DE VIBRACIÓN**



**ROBOT FLEXIBLE DE TRES
GRADOS DE LIBERTAD**



**ROBOT FLEXIBLE DE UN
GRADO DE LIBERTAD
TRES MODOS DE VIBRACIÓN**



**ROBOT FLEXIBLE UN
GRADO DE LIBERTAD
NO LINEAL**

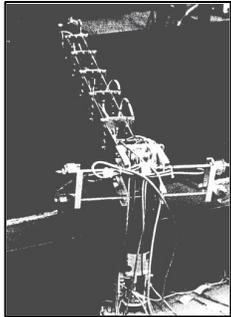


Índice

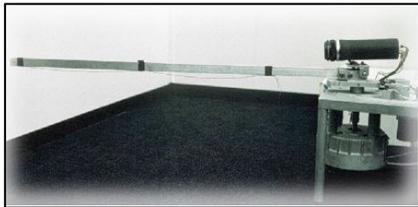
- Definición y motivación
- **Estado del arte**
- Estática
- Dinámica
- Control de posición
- Control de fuerza
- Ejemplos
- Conclusiones



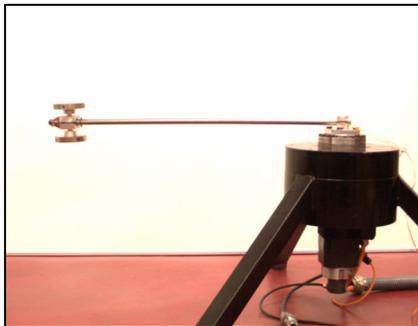
Estado del arte: Un grado de libertad



- » R. H. Cannon Jr. y E. Schmitz, “Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot”, *The International Journal of Robotics Research*, 3(3):62-75, Otoño 1984.



- » D. Wang y M. Vidyasagar, “Passive Control of a Stiff Flexible Link”, *International Journal of Robotics Research*, 11(6):572-578, Diciembre 1992.

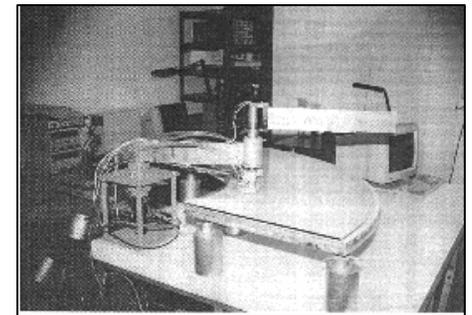
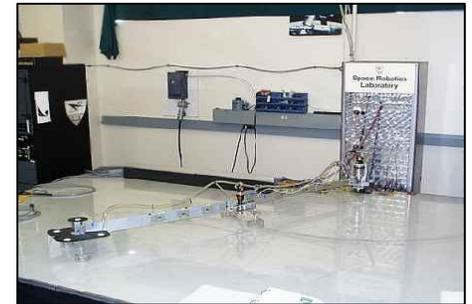


- » V. Feliu, J.A. Somolinos, C. Cerrada y J.A. Cerrada, “A new control scheme of single-link flexible manipulators robust to payload changes”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 20 (2-4): 349-373 Octubre-Diciembre 1997.



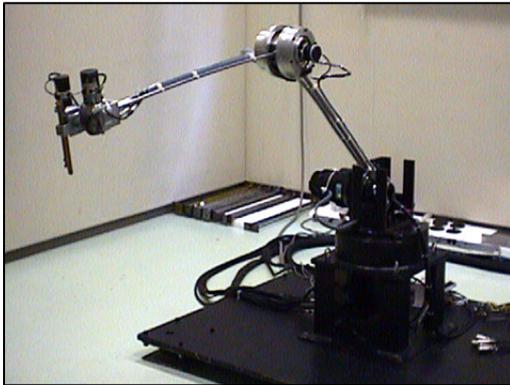
Estado del arte: Dos grados de libertad

- » J. Carusone, K.S. Buchan y G.M.T. D'Eleuterio, “Experiments in End-effector Tracking Control for Structurally Flexible Space Manipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9(5): 553-560, Octubre 1993
- » J.H. Yang, F.L. Lian y L.C. Fu, “Nonlinear adaptive control for flexible-link manipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 13(1): 140-148, Febrero 1997
- » J. Cheong, W.K. Chung, y Y. Youm, “Inverse Kinematics of Multilink Flexible Robots for High-Speed Applications”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(2): 269-282, Abril 2004.





Estado del arte: Tres grados de libertad



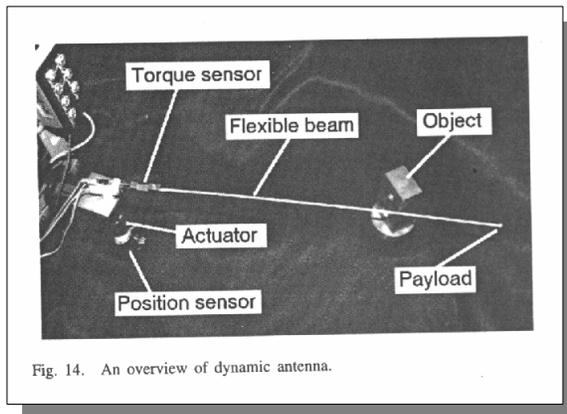
- » T. Yoshikawa, y K. Hosoda, “Modeling of flexible manipulators using virtual rigid links and passive joints”, *International Journal Of Robotics Research*, 15(3): 290-299, Junio 1996

- J.A. Somolinos, V. Feliu y L. Sánchez, “Design, dynamic modelling and experimental validation of a new three-degree-of-freedom flexible arm”, *Mechatronics* 12 (7): 919-948, Septiembre 2002



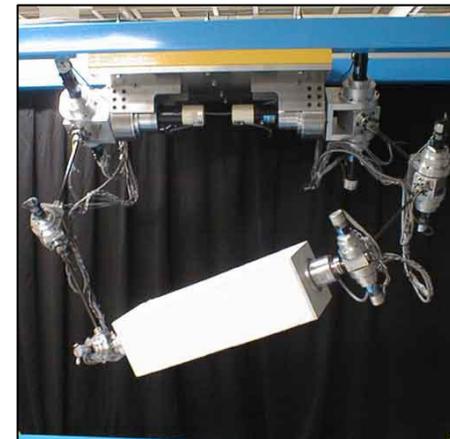


Estado del arte: Detección de impactos y control de fuerza



- N. Ueno, M.M. Svinin, M. Kaneko, "*Dynamic Contact Sensing by Flexible Beam*", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 3(4): 254-264 Diciembre 1998.

M. Yamano, J.S. Kim, A. Konno and M. Uchiyama, "Cooperative Control of a 3D Dual-Flexible-Arm Robot", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 39(1): 1-15 Enero 2004.





Índice

- Definición y motivación
- Estado del arte
- **Estática**
- Dinámica
- Control de posición
- Control de fuerza
- Ejemplos
- Conclusiones

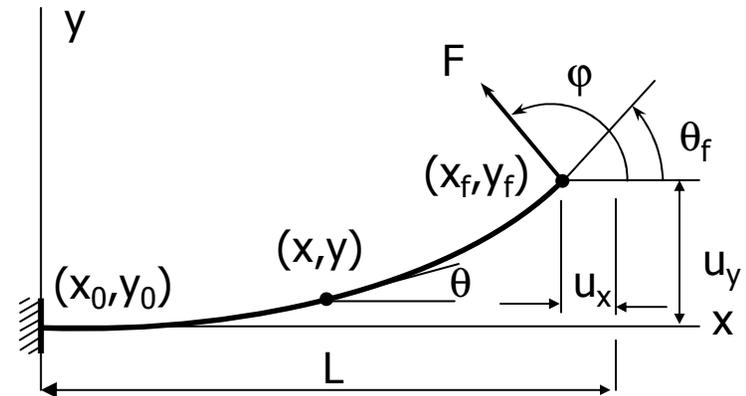


Estática (Deflexión)

- ECUACIÓN GENERAL DE LA FLEXIÓN (EULER-BERNOULLI)

$$\frac{d\theta}{ds} = -\frac{M(s)}{EI}$$

θ : pendiente s : longitud de arco
 M : momento flector
 E : módulo de young
 I : momento de inercia



- Esta ecuación no puede ser resuelta de una manera exacta y necesita del cálculo de algunas integrales elípticas que pueden ser evaluadas utilizando métodos de integración numérica



Estática (Deflexión)

- SIMPLIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE LA FLEXIÓN
 - Cuando las deformaciones son pequeñas ($dy/dx \approx 0$) la ecuación general de la flexión se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(s)}{EI}$$

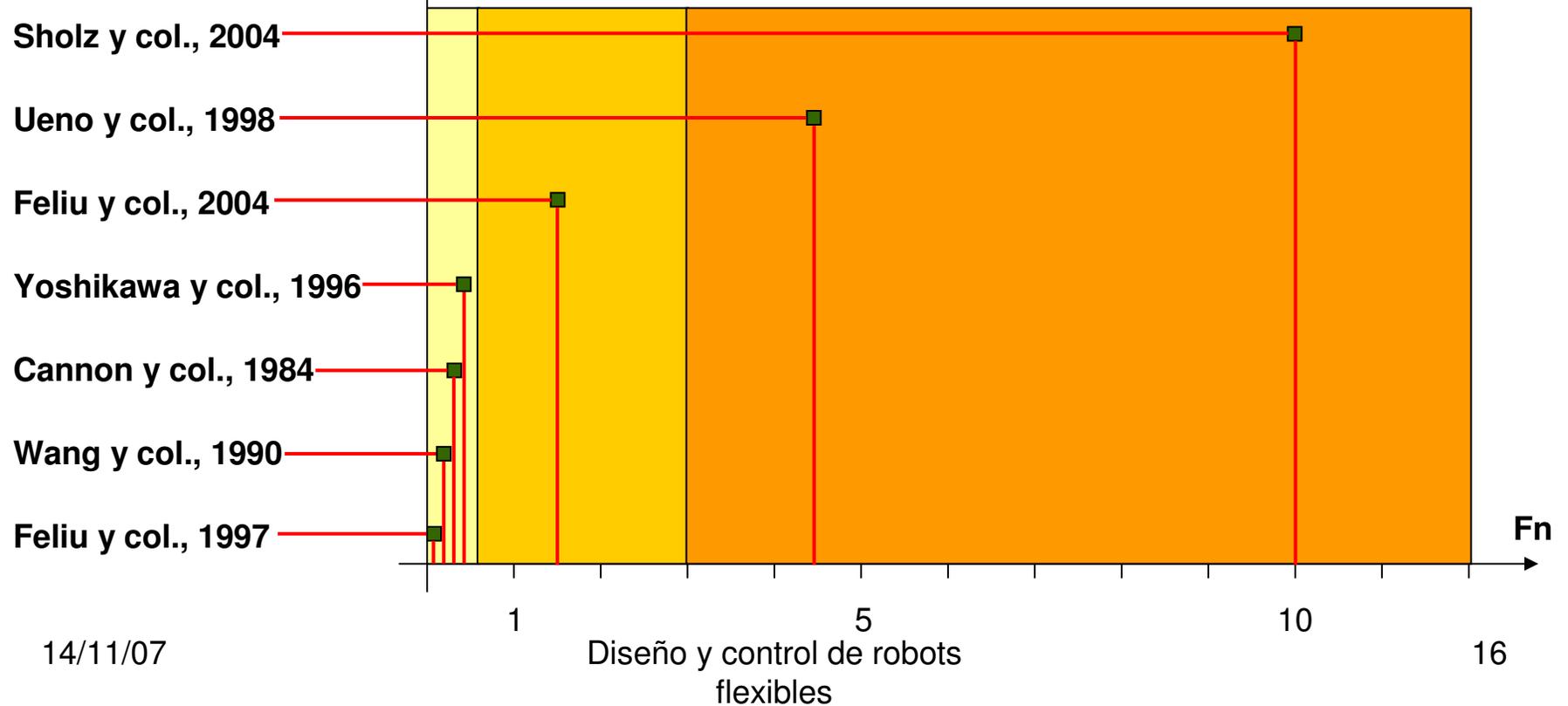
X e y son las coordenadas de un punto de la viga expresadas en un sistema cartesiano que rota con la articulación del motor



Estática (Deflexión)

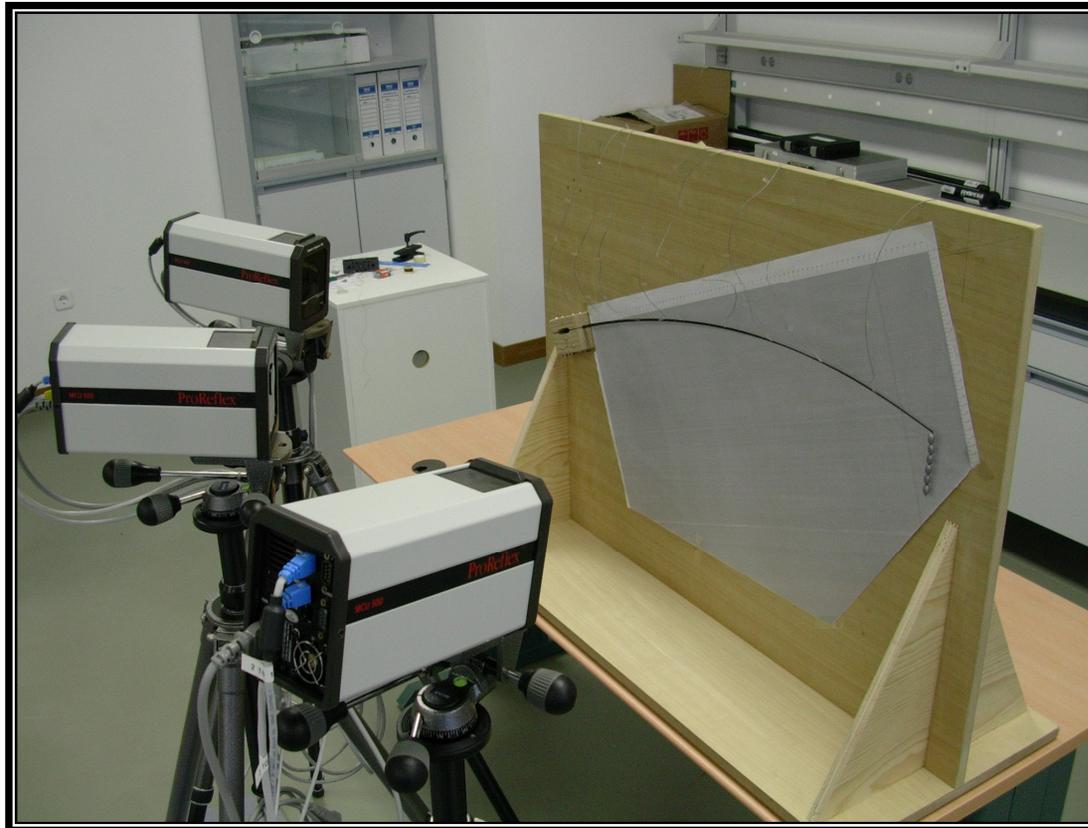
$$F_n = \frac{Fl^2}{EI}$$

- Robots fabricados con materiales metálicos
- Robots fabricados con materiales compuestos
- Antenas (brazos muy flexibles)





Estática (Deflexión)



Feliu y col., 2004 (barra de composites)

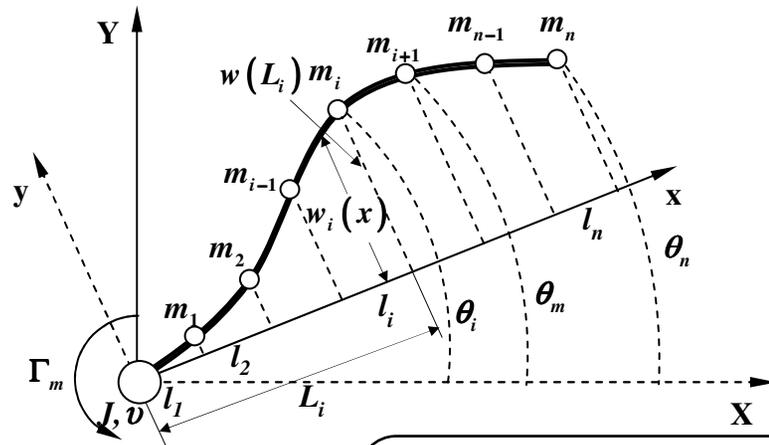


Índice

- Definición y motivación
- Estado del arte
- Estática
- **Dinámica**
- Control de posición
- Control de fuerza
- Ejemplos
- Conclusiones



Dinámica: Modelo de masas concentradas



$$\underline{M}\ddot{\underline{\theta}}(t) + \underline{K}\underline{\theta}(t) = \underline{B}\underline{\theta}_m(t)$$

Modelo de masa
puntual en el
extremo

$$\frac{\theta_m(s)}{\Gamma_m(s)} = \frac{n(s^2 + \omega_0^2)}{s \left[Jn^2 s^3 + vn^2 s^2 + (Jn^2 \omega_0^2 + c)s + vn^2 \omega_0^2 \right]}$$

$$\frac{\theta_t(s)}{\Gamma_m(s)} = \frac{n\omega_0^2}{s \left[Jn^2 s^3 + vn^2 s^2 + (Jn^2 \omega_0^2 + c)s + vn^2 \omega_0^2 \right]}$$

$$\frac{\theta_t(s)}{\theta_m(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2}$$



Dinámica: Modelo continuo

- Ecuación del eslabón

$$EIw^{IV}(x,t) + \rho_L \ddot{p}(x,t) = 0$$

$$p(x,t) := x\theta(t) + w(x,t)$$

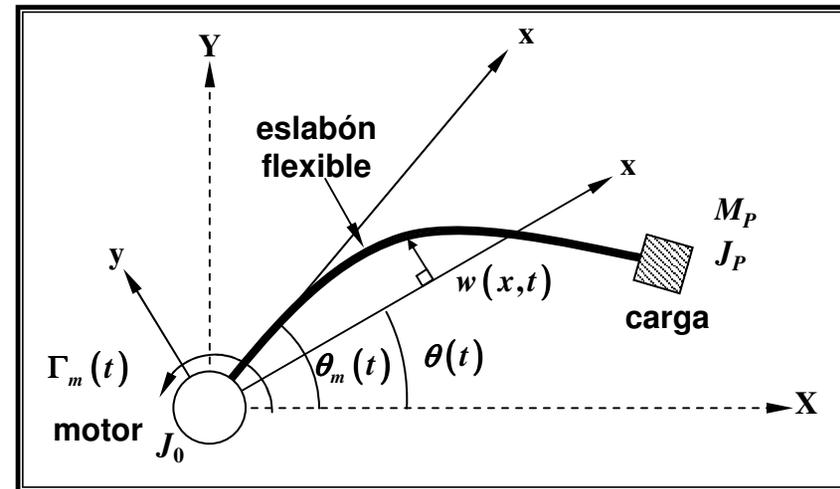
- Condiciones de contorno

$$w(0,t) = 0$$

$$EIw''(0,t) = J_0 \ddot{\theta}'(0,t) - \Gamma_m$$

$$EIw''(L,t) = -J_P \ddot{\theta}'(L,t)$$

$$EIw'''(L,t) = M_P \ddot{\theta}(L,t)$$



Robot flexible de un grado de libertad

- Análisis modal ($\Gamma_m = 0$) y separación de variables $\rightarrow w(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t)$
- Infinitas ecuaciones diferenciales desacopladas

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \Gamma_m(t) \phi_i'(0), \quad i = 0, \dots, \infty$$

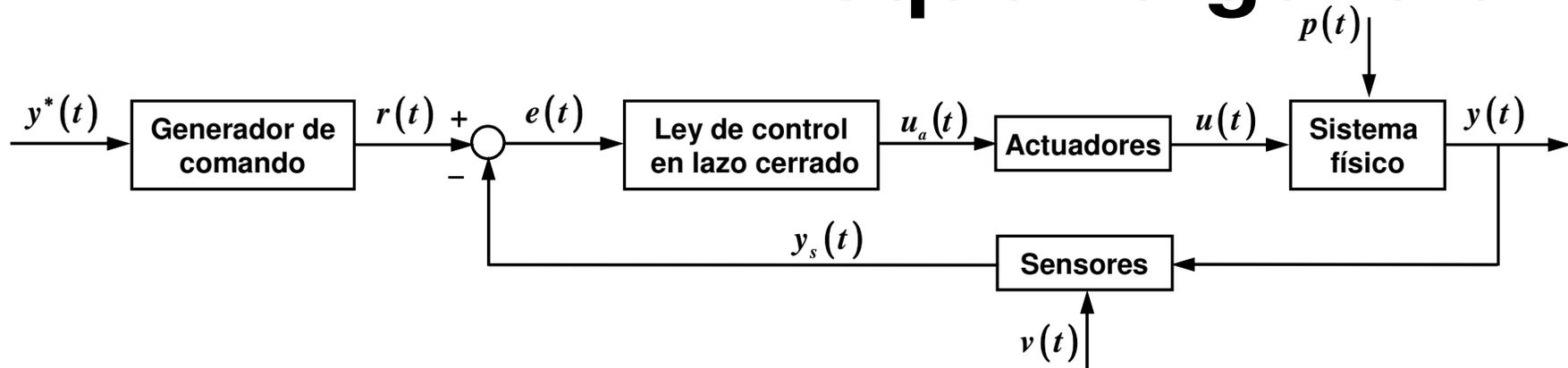


Índice

- Definición y motivación
- Estado del arte
- Estática
- Dinámica
- **Control de posición**
- Control de fuerza
- Ejemplos
- Conclusiones



Control de posición: Esquema general



Control en cadena abierta

- Filtrado o moldeado de trayectoria. Diseño de controles robustos y adaptativos. Modificación de la dinámica.

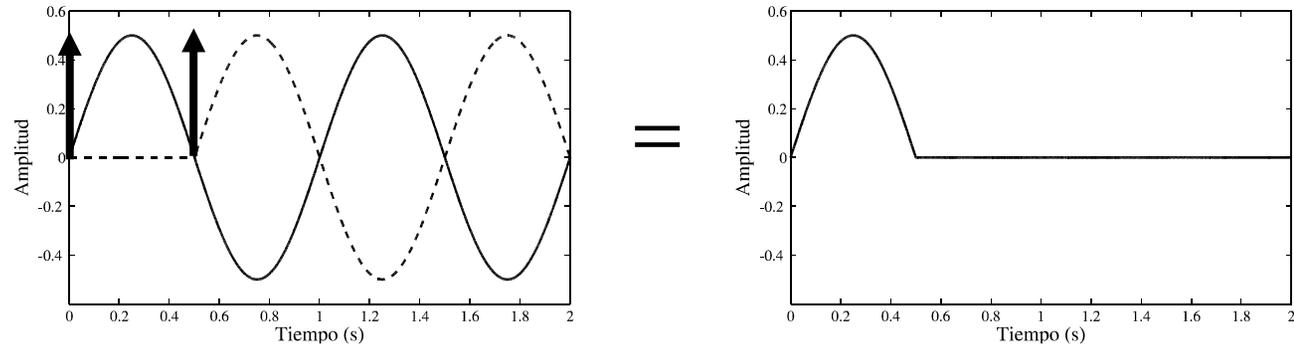
Control en cadena cerrada

- Control de un modo vibración
- Control del sistema completo (Robusto al *spillover*)

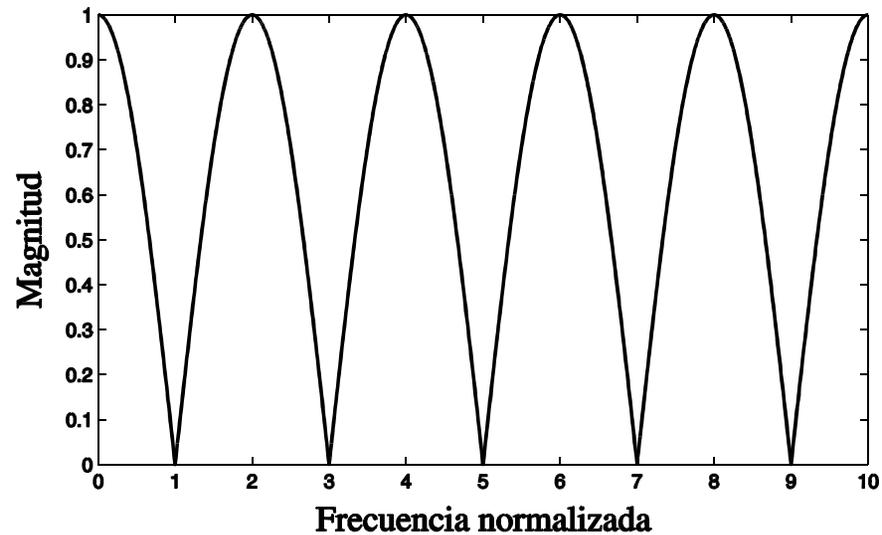


Control de posición: Cadena abierta

- **Fundamento**



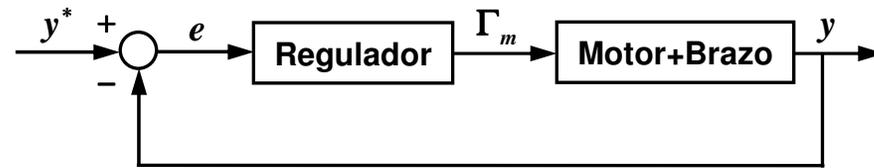
- **Respuesta en frecuencia**





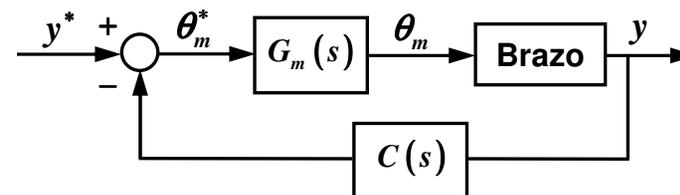
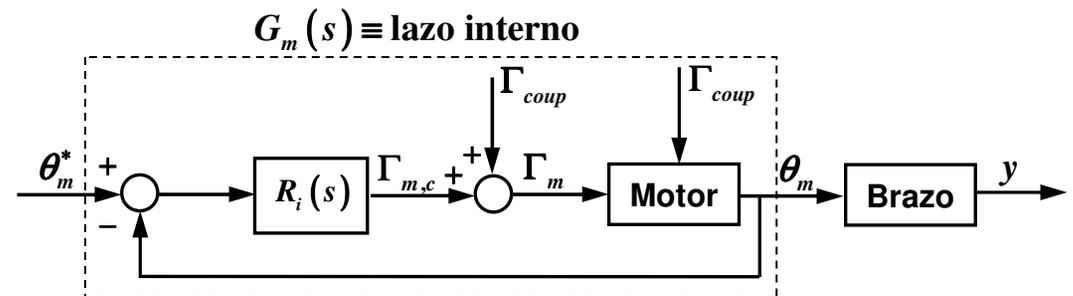
Control de posición: Cadena cerrada

Un único lazo de control



Dos lazos de control

- Desacoplamiento de la dinámica del brazo flexible y el motor
- Control del motor robusto a fricciones
- Sencillez en el control de vibraciones del brazo





Control de posición: Sensores

– ROBOT RÍGIDO:

- MEDIDA ÁNGULOS DE MOTORES

– FLEXIBILIDAD:

- MEDIDA POSICIÓN DEL EXTREMO
- MEDIDA VELOCIDAD DEL EXTREMO
- MEDIDA ACELERACIÓN DEL EXTREMO
- MEDIDA PARES DE LOS ESLABONES



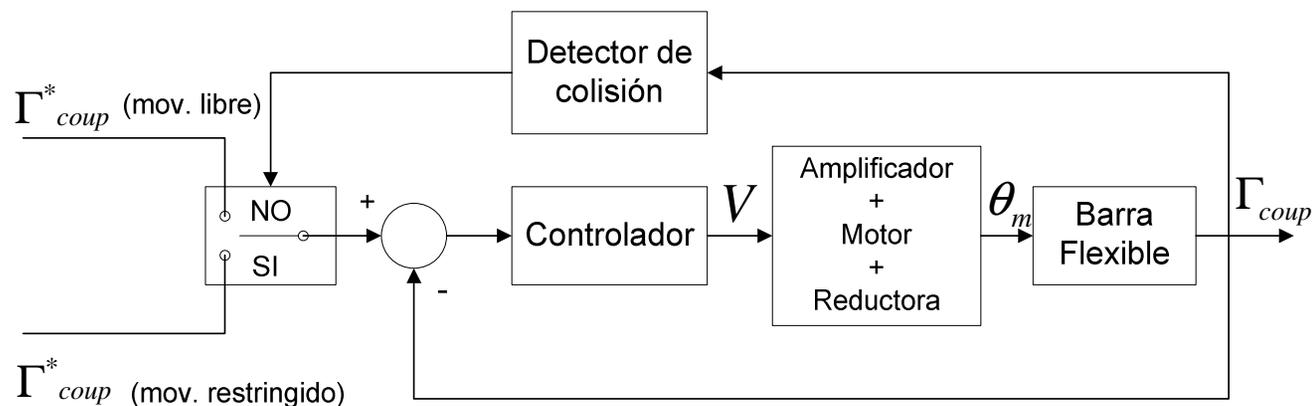
Índice

- Definición y motivación
- Estado del arte
- Estática
- Dinámica
- Control de posición
- **Control de fuerza**
- Ejemplos
- Conclusiones



Control de fuerza

- Control de fuerza para movimiento libre y movimiento restringido basado en la realimentación del par de acoplamiento entre la barra flexible y el eje del motor





Control de fuerza

- **Características del control de fuerza**
 - Esta ley de control sólo utiliza la realimentación del par de acoplamiento.
 - Controlador robusto con respecto a: fricción de Coulomb; incertidumbre en los parámetros de la planta; incertidumbre en la elasticidad del medio con el que impacta el manipulador.
 - Sistema sensorial muy barato: sólo dos galgas extensométricas pegadas a la base del brazo flexible.



Índice

- Definición y motivación
- Estado del arte
- Estática
- Dinámica
- Control de posición
- Control de fuerza
- **Ejemplos**
- Conclusiones



Ejemplos:

Cadena abierta. Modificación de la dinámica

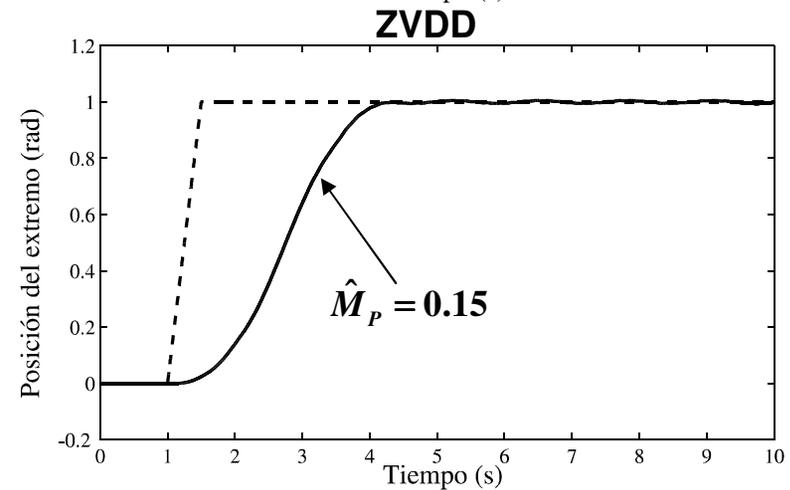
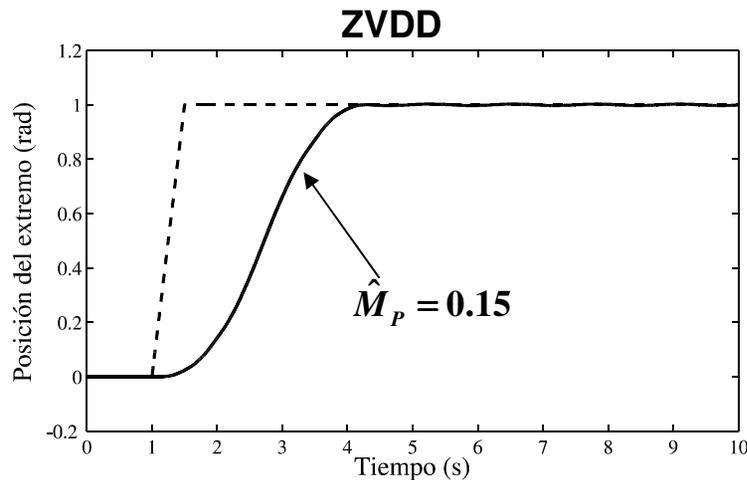
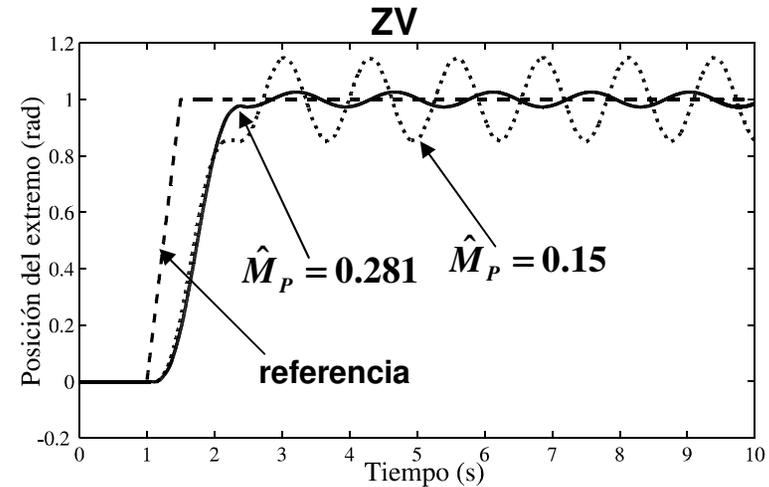
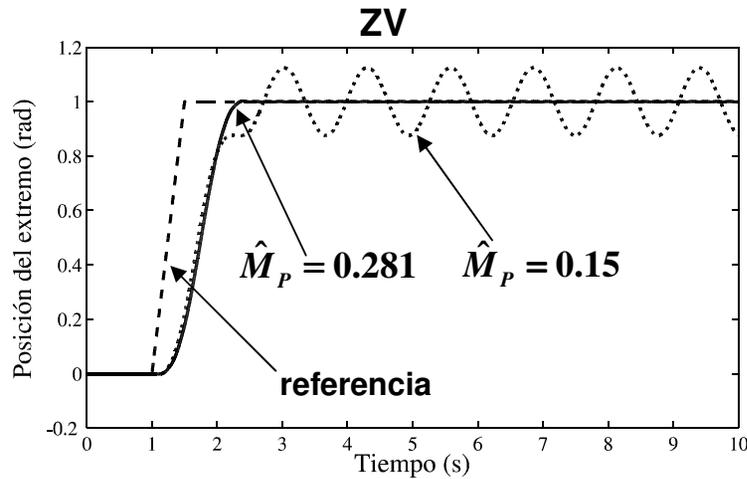
- **Adición de masas puntuales (equilibrado del eslabón)**
- **Tres modos**
 - relaciones
 - Un controlador diseñado para el primer modo, cancelará los tres primeros
 - Se considera una variación de la masa del extremo
- **Criterio**
 - Encontrar el valor de la masa y su posición tal que, dada una variación de la masa del extremo, la desviación de las frecuencias con respecto al valor deseado sea mínima
 - Controlador más sencillo
 - Para un modo cancela varios
 - Respuesta del sistemas más rápida
 - El propio sistema es más robusto



Ejemplos: Cadena abierta. Modificación de la dinámica

Simulaciones

Experimentos





Ejemplos:

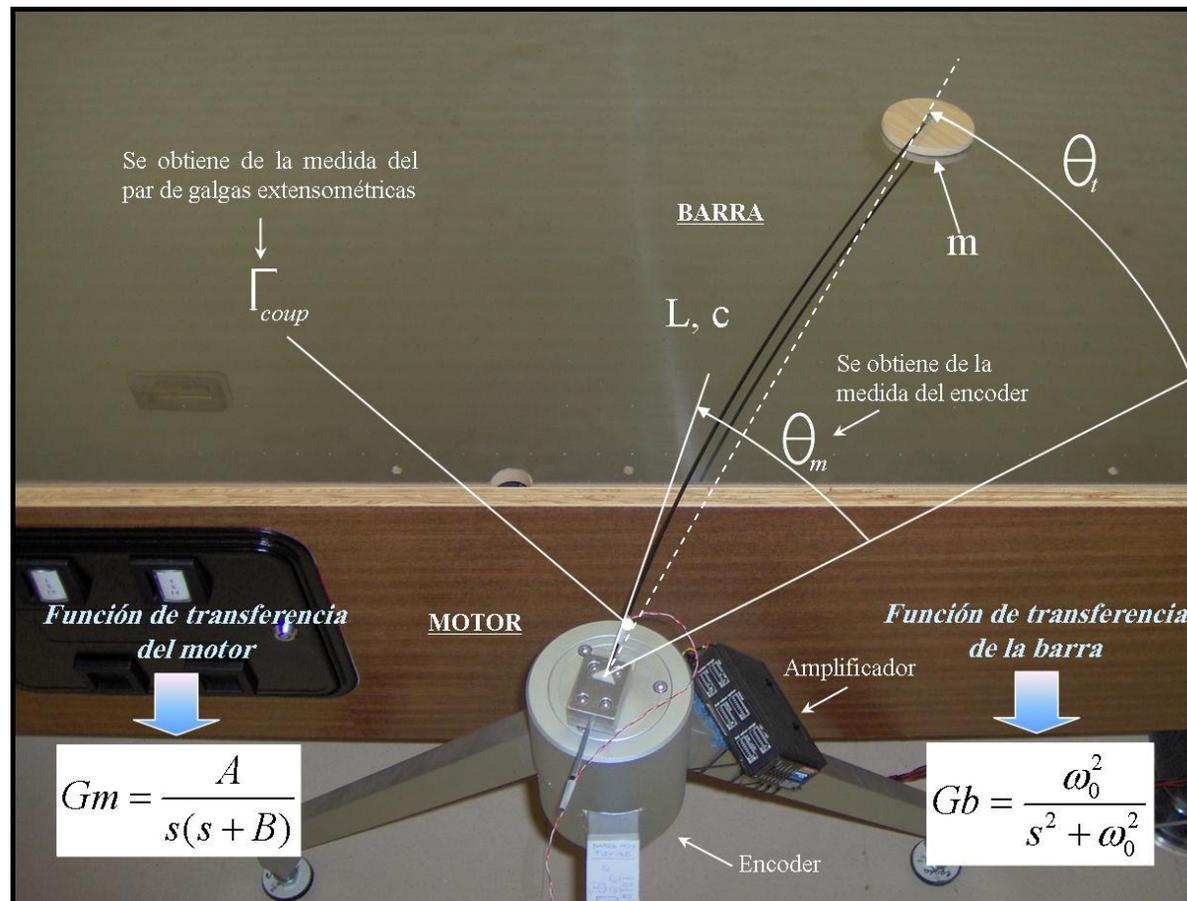
Cadena Cerrada. Modelo de masa puntual

- Características del Control GPI de posición:
 - No produce sobreoscilación.
 - No requiere la estimación de las derivadas de la señal de salida del sistema como los controladores PD, PID.
 - Presenta estabilidad interna.
 - Presenta robustez a la fricción.
 - Computación única de la posición angular.
 - Requiere el conocimiento de la dinámica del sistema.
 - Es robusto ante la fricción estática de Coulomb.
 - El esfuerzo de control requerido es bajo.



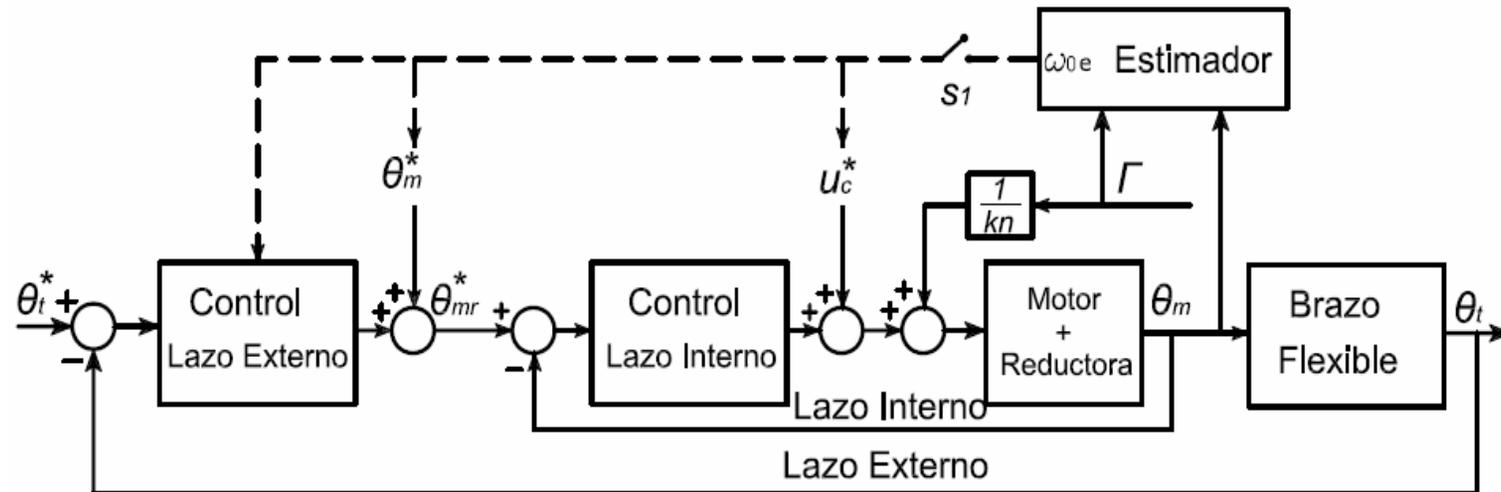
Ejemplos: Cadena Cerrada. Modelo de masa puntual

- Fotografía de la plataforma experimental



Ejemplos:

Cadena Cerrada. Modelo de masa puntual



- **Controlador robusto a perturbaciones constantes en la dinámica del motor**

Ejemplos:

Cadena Cerrada. Modelo de masa puntual

- **Controlador del Lazo Externo**

$$(\theta_m - \theta_m^*) = \left[\frac{\gamma_1 s + \gamma_0}{s + \gamma_2} \right] (\theta_t^* - \theta_t)$$

- **Término de Prealimentación del Lazo Externo**

$$\theta_m^*(t) = \frac{1}{\omega_0^2} \ddot{\theta}_t^*(t) + \theta_t^*(t)$$

- **Controlador del Lazo Interno**

$$u - u^*(t) = \left[\frac{\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{s(s + \alpha_3)} \right] (\theta_m^* - \theta_m)$$

- **Término de Prealimentación del Lazo Interno**

$$u^*(t) = \frac{1}{A} \ddot{\theta}_m^*(t) + \frac{B}{A} \dot{\theta}_m^*(t)$$

Ejemplos:

Cadena Cerrada. Modelo de masa puntual

- Estimador de la frecuencia natural del brazo flexible.

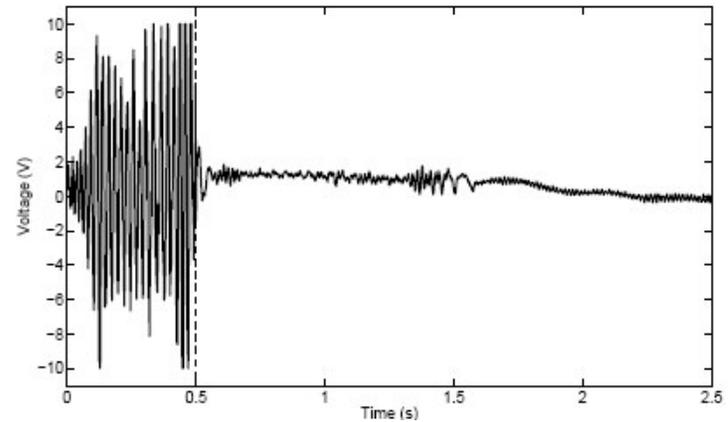
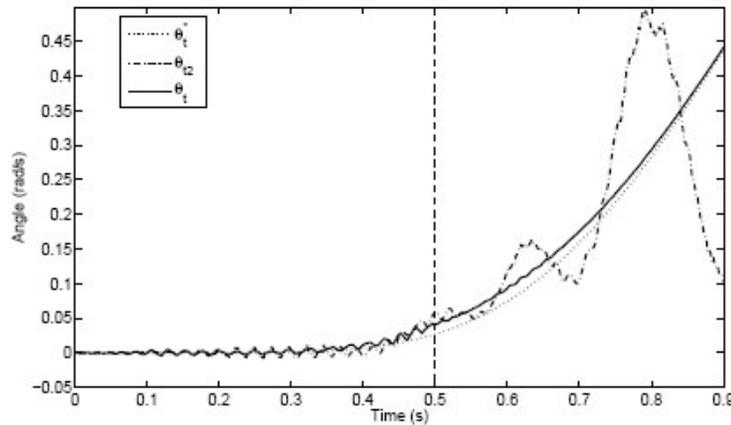
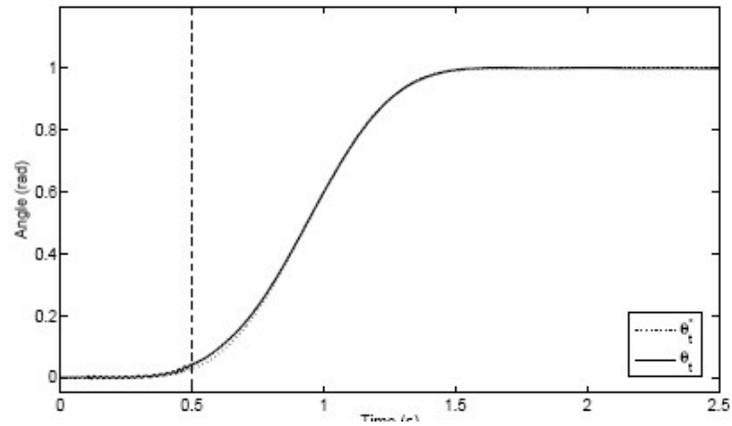
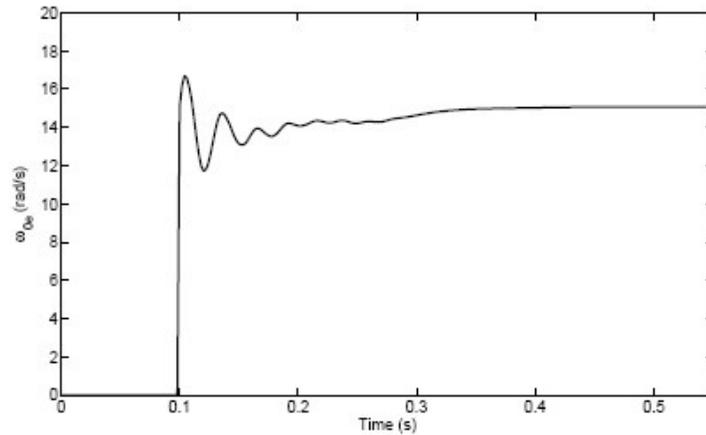
$$\omega_0^2 = \frac{c}{n} \frac{[t^2 \xi(t) - 4 \int_0^t \sigma \xi(\sigma) d\sigma + 2 \int_0^t \int_0^\sigma \xi(\lambda) d\lambda d\sigma]}{\int_0^t \int_0^\sigma \lambda^2 \hat{\Gamma}(\lambda) d\lambda d\sigma}$$

$$\xi(t) = \left(\theta_m(t) - \frac{n}{c} \hat{\Gamma}(t) \right)$$

$$\begin{array}{ll} n_e(t) & = t^2 \xi(t) + z_1 & d_e(t) & = z_3 \\ \dot{z}_1 & = z_2 - 4t \xi(t) & \dot{z}_3 & = z_4 \\ \dot{z}_2 & = 2\xi(t) & \dot{z}_4 & = t^2 \hat{\Gamma}_{coup}(t) \end{array}$$

Ejemplos: Cadena Cerrada. Modelo de masa puntual

- Resultados Experimentales

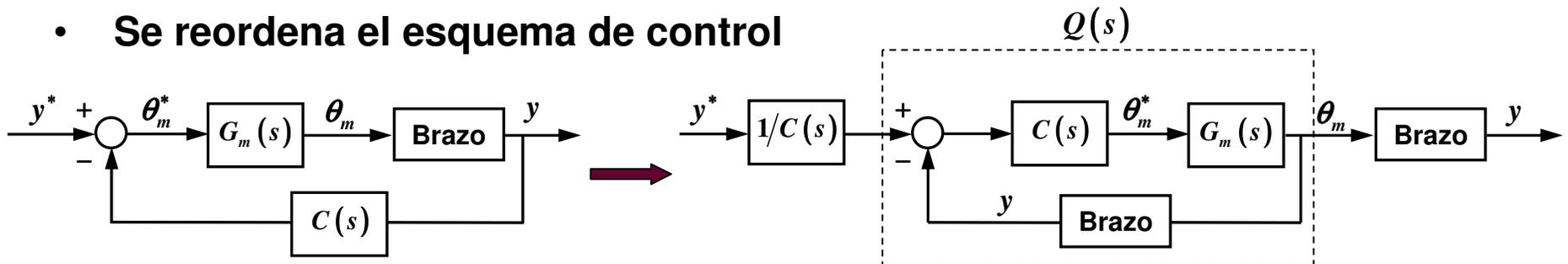




Ejemplos:

Cadena Cerrada. Control basado en pasividad

- Se reordena el esquema de control

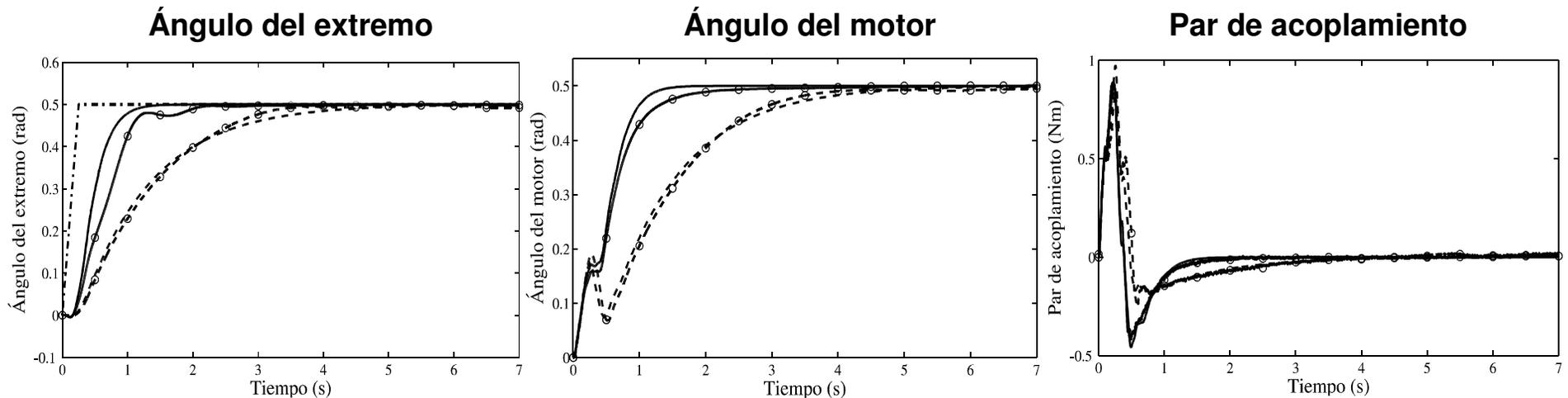


- Teorema de la interconexión de sistemas pasivos en realimentación
 - Si $C(s)G_m(s)$ se diseña de forma que sea pasiva
 - Y si se toma y tal que y/θ_m sea pasiva
 - Entonces $Q(s)$ será pasiva
 - Y si $1/C(s)$ es estable, EL SISTEMA COMPLETO SERÁ ESTABLE
- Se demuestra que existe una relación de pasividad entre $\int \Gamma_{coup}$ y θ_m
- Se toma $y = \Gamma_{coup}$ y $C(s) = C'(s)/s$
- Cuando se anula el par de acoplamiento, la posición del extremo alcanza su valor final



Ejemplos: Cadena Cerrada. Control basado en pasividad

- **Resultados con un PD en el lazo interno**
 - Se modifica la masa de la carga $M_p \in [0, 0.30]$ kg
 - Lazo interno: sistema críticamente amortiguado
 - Se diseña $C'(s)$ para $M_p = 0$ y de forma que la dinámica del primer modo de vibración sea críticamente amortiguada



(—) Simulación con $M_p = 0$; (\ominus) Experimento con $M_p = 0$; (---) Simulación con $M_p = 0.30$;
(\oplus) Experimento con $M_p = 0.30$; (-·-) Referencia



Ejemplos:

Cadena Cerrada. Control basado en pasividad



14/11/07

Diseño y control de robots
flexibles

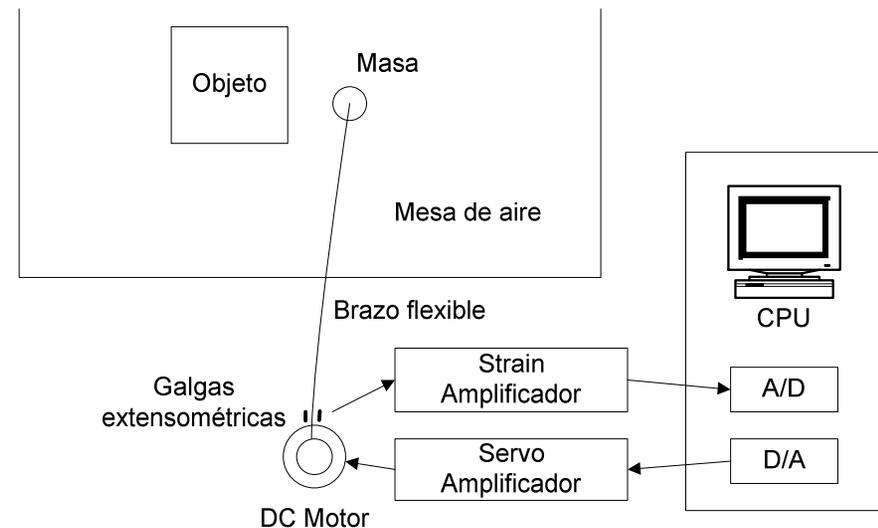
40



Ejemplos: Control de fuerzas

Sistema sensorial formado únicamente por dos galgas extensométricas.

Esta configuración elimina el riesgo de dañar los sensores de par o fuerza porque nunca están en contacto con el objeto con el que impacta el robot.

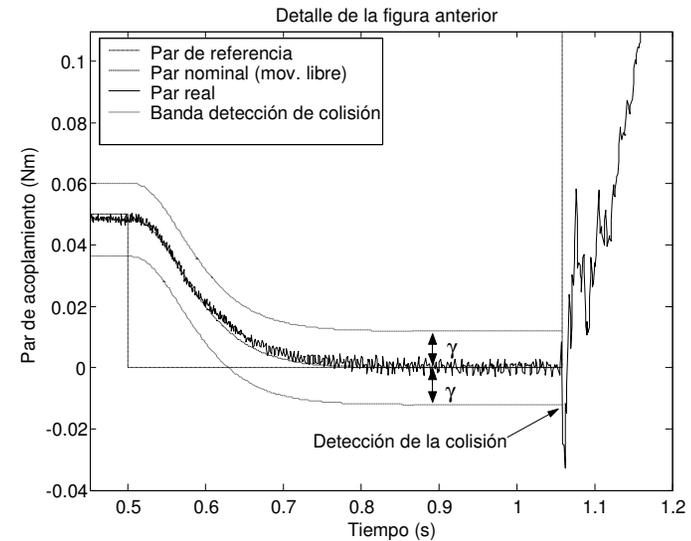
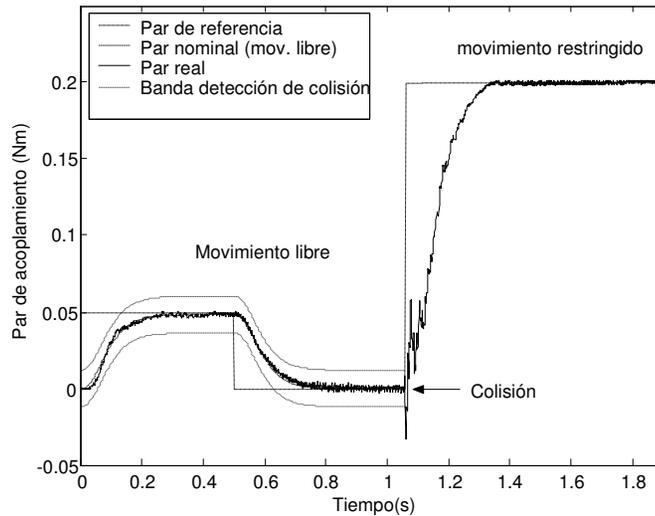


Configuración de la plataforma experimental

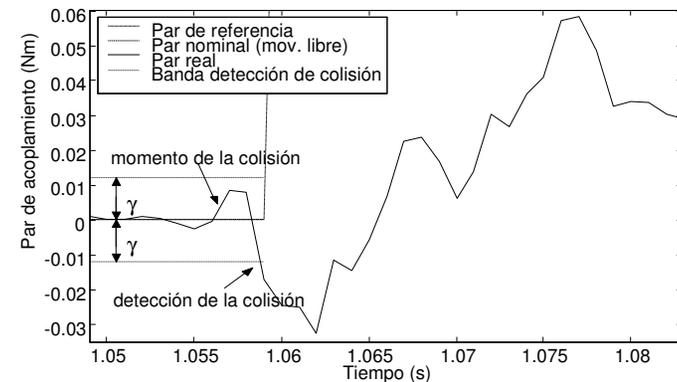
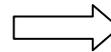


Ejemplos: Control de fuerzas

- Resultados Experimentales



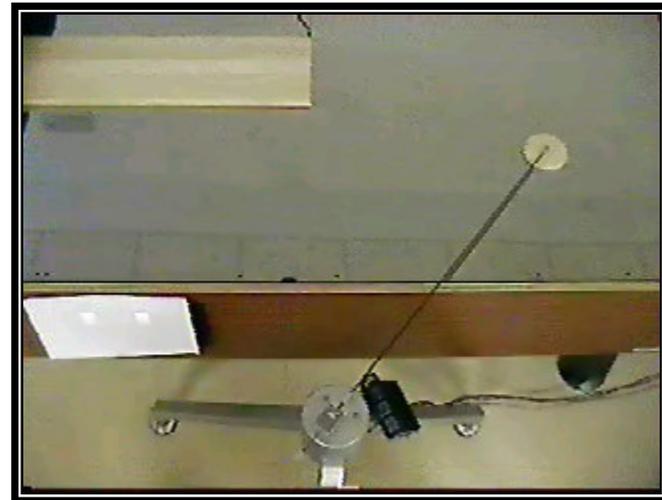
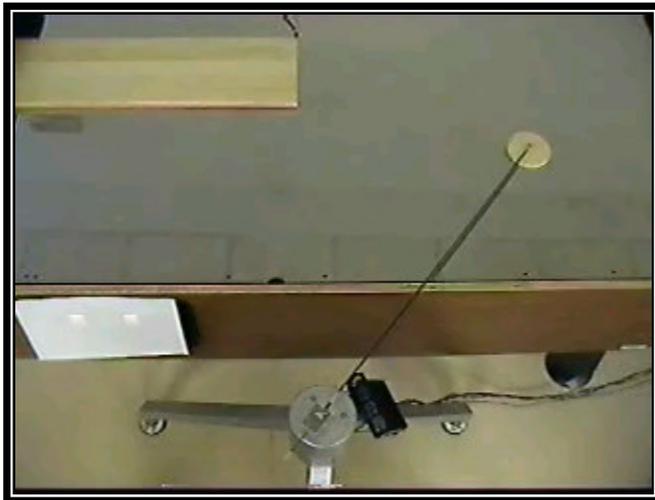
Detalle del instante en el que ocurre la colisión e instante en el que se detecta





Ejemplos: Control de fuerzas

- Resultados Experimentales





Índice

- Definición y motivación
- Estado del arte
- Estática
- Dinámica
- Control de posición
- Control de fuerza
- Ejemplos
- **Conclusiones**

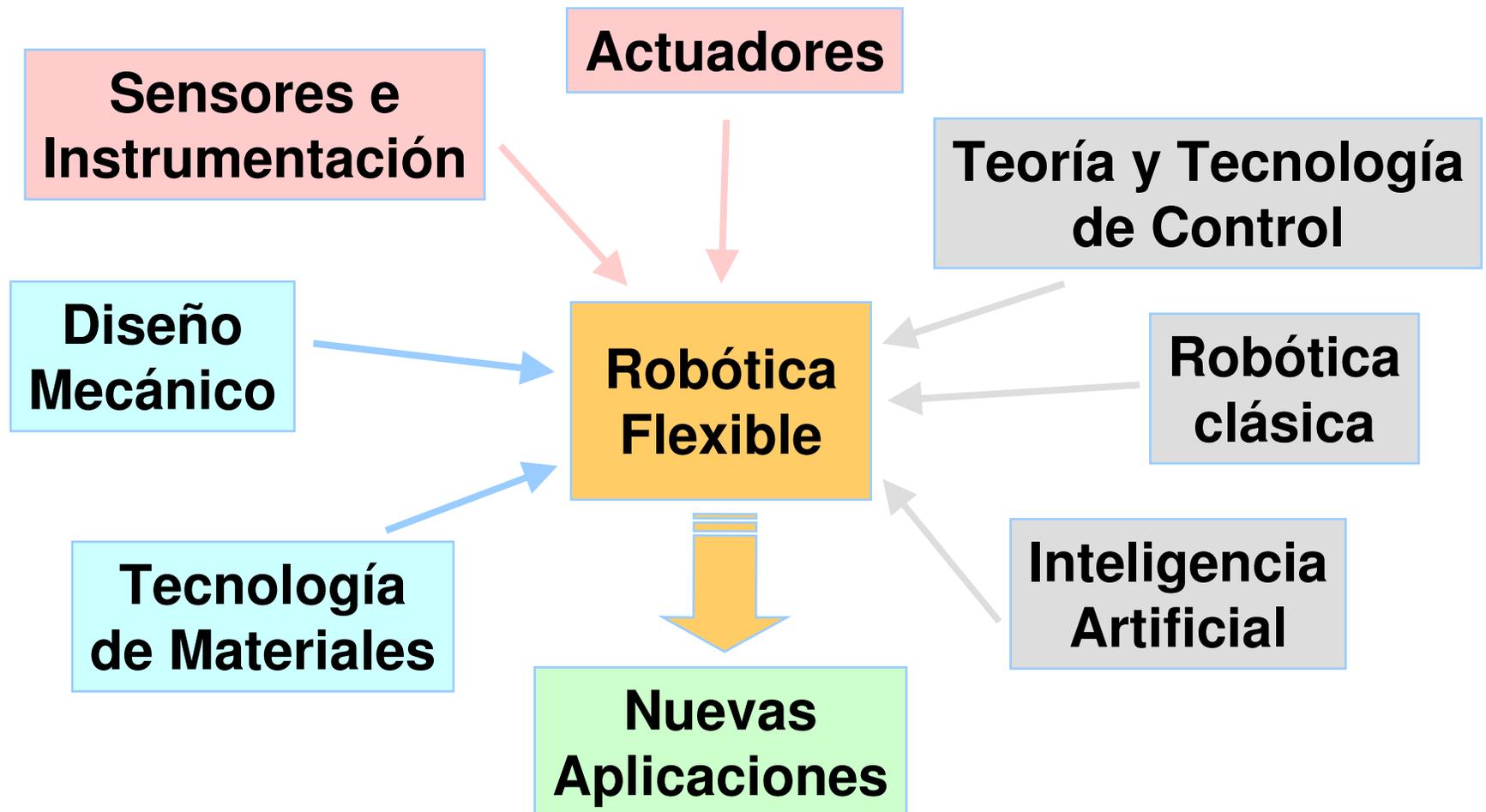


Conclusiones

- **Tema científico y tecnológico con un impacto potencialmente enorme en todos los aspectos de la robótica**
- **Tema fuertemente interdisciplinar**
- **Tema muy conectado con otros ámbitos de la ingeniería**



Conclusiones: Tecnologías aplicadas





I Workshop Español de Robótica, ROBOT 2007



DISEÑO Y CONTROL DE ROBOTS FLEXIBLES

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Prof. Vicente Feliu Batlle
Universidad de Castilla-La Mancha
Zaragoza, Septiembre 11-14, 2007