

En este trabajo se plantea el problema de la presencia de incertidumbre de la matriz inercial en el modelado de los robots considerando una serie de métodos para realizar el control de movimientos. Se presentan técnicas basadas en un controlador con parámetros variables (control adaptativo) introduciendo también aspectos de robustez ante otros tipo de incertidumbres.

Control de movimiento de robots en presencia de incertidumbre: un enfoque adaptativo

Antoni Escrig Vidal. toniescrig@yahoo.es
IOC UPC

En el modelado de los robots manipuladores, generalmente nos encontramos con que desconocemos algunos de sus parámetros. Este es el caso del transporte de distintos tipos de cargas en el que tendremos incertidumbre en los parámetros inerciales (véase la figura 0). En estas situaciones, en el diseño de controladores, no podremos utilizar las técnicas clásicas de control. En el caso de que la incertidumbre en los parámetros no sea reducida on-line mediante algún mecanismo de adaptación, podemos tener problemas de inexactitud o incluso de inestabilidad.

El objetivo del control robusto y adaptativo de robots es conseguir unas ciertas prestaciones respecto a estabilidad, error de posición u otras especificaciones, a pesar de incertidumbres en los parámetros inerciales del modelo de las articulaciones, interferencias externas y comportamientos dinámicos no modelados (flexibilidad de las articulaciones y enlaces, dinámica de los actuadores, fricción, ruido provocado por los sensores y dinámica desconocida del entorno). La distinción entre un control robusto y un control adaptativo reside en que en el robusto los parámetros son fijos, mientras

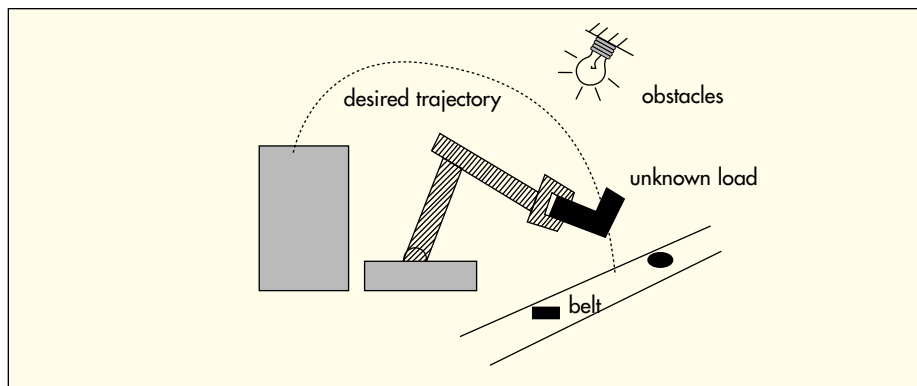


Figura 0. Presencia de incertidumbre en un manipulador

que en el adaptativo se realiza una estimación de los parámetros on-line.

En este trabajo, una vez presentado el problema a resolver, dado su carácter fuertemente no lineal, presentaremos una técnica para encontrar la estabilidad: el método directo de Lyapunov. A continuación describiremos y analizaremos un par de métodos de control adaptativo: un algoritmo basado en la dinámica inversa y otro basado en los trabajos de Slotine y Li.

Finalmente, para mejorar las prestaciones del control adaptativo, introduciremos el control adaptativo-robusto, que consiste en combinar las dos filosofías de control con el objetivo de reducir las incer-

tidumbres inerciales o de variación lenta por métodos adaptativos, y otros tipos de incertidumbres, por métodos robustos.

I. FUNDAMENTOS DEL CONTROL ADAPTATIVO

El controlador adaptativo [5] difiere de un controlador normal en que sus parámetros son variables y existe un mecanismo para ajustar dichos parámetros de manera online basado en medidas del sistema.

Una de las principales arquitecturas adaptativas es la que utiliza un modelo de referencia, como queda señalado en la figura 1. Este esquema consta de 4 partes:

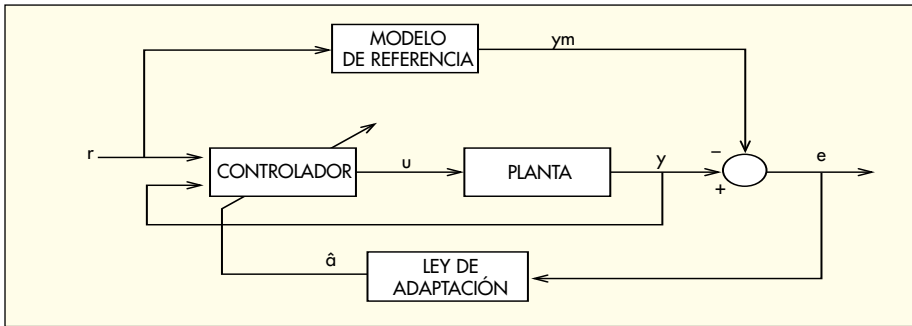


Figura 1. Sistema de control adaptativo de modelo de referencia

1. Una planta que contiene parámetros desconocidos.
2. Un modelo de referencia para especificar la salida deseada del sistema.
3. Una ley de control realimentada conteniendo parámetros estimados.
4. Un mecanismo de adaptación para actualizar los parámetros estimados.

Asumimos que la planta tiene una estructura conocida pero algunos de sus parámetros nos son desconocidos. Por otra parte, la elección del modelo de referencia tiene que satisfacer las características deseadas para el sistema a controlar, como tiempo de establecimiento, sobreamortiguamiento, etc.

El controlador, en ausencia de incertidumbres, debe lograr que la salida de la planta sea idéntica a la del modelo de referencia. Cuando los parámetros no son conocidos, el mecanismo de adaptación debe ajustar los parámetros del controlador con la finalidad de lograr un seguimiento perfecto de manera asintótica. Por consiguiente, el objetivo de dicho mecanismo de adaptación es conseguir que el error de seguimiento converja a cero. Para deducir esto último usaremos técnicas de análisis de estabilidad para sistemas no lineales según Lyapunov. Estas técnicas nos permitirán deducir si un sistema representado por un conjunto de ecuaciones no lineales es estable o asintóticamente estable sin necesidad de resolver las ecuaciones.

II. ESTABILIDAD DE SISTEMAS NO LINEALES

La idea principal del método directo de Lyapunov para el estudio de la estabilidad de sistemas no lineales se basa en

que si la energía total de un sistema mecánico o eléctrico es continuamente disipada, entonces el sistema acabará convergiendo hacia un punto de equilibrio. De este modo, podemos deducir la estabilidad del sistema examinando la variación de una función escalar representativa de su estado energético.

Un sistema no lineal puede representarse como un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$. Aunque esta ecuación no contiene explícitamente la entrada de control como una variable, se puede aplicar a sistemas de control retroalimentados, ya que la entrada de control será función del estado \mathbf{x} y del tiempo t . Por tanto:

$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ y como $\mathbf{u} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$ sustituyendo tendremos una dinámica en lazo cerrado de $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{g}(\mathbf{x}, t), t)$.

Puntos de equilibrio

Un estado \mathbf{x}^* es un punto de equilibrio del sistema si $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) = 0$. Es decir una vez $\mathbf{x}(t)$ ha alcanzado estado \mathbf{x}^* , permanece en dicho estado para todo tiempo futuro.

Estabilidad

El punto de equilibrio \mathbf{x}^* es estable si por cualquier $R > 0$, existe $r > 0$ tal que si $\|\mathbf{x}(0)\| < r$, entonces $\|\mathbf{x}(t)\| < R$ para todo $t \geq 0$. De otra manera el sistema es inestable.

El punto de equilibrio \mathbf{x}^* es asintóticamente estable si es estable y además existe algún $r > 0$ tal que una condición inicial $\|\mathbf{x}(0)\| < r$ implica que $\mathbf{x}(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$.

Función de Lyapunov

Si en un entorno \mathbf{B}_{R_0} la función $V(\mathbf{x})$ es definida positiva, tiene derivadas parciales continuas y su derivada a través de una tra-

yectoria de estado es definida seminegativa ($\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$) entonces decimos que $V(\mathbf{x})$ es una función de Lyapunov del sistema.

Teorema de Lyapunov para estabilidad local

Si en un entorno \mathbf{B}_{R_0} existe una función escalar $V(\mathbf{x})$ con las primeras derivadas parciales continuas tal que,

- $V(\mathbf{x})$ es definida positiva (localmente en \mathbf{B}_{R_0})
- $\dot{V}(\mathbf{x})$ es semidefinida negativa (localmente en \mathbf{B}_{R_0})

entonces decimos que el punto de equilibrio es localmente estable. Si $\dot{V}(\mathbf{x})$ es definida negativa localmente en \mathbf{B}_{R_0} , entonces la estabilidad es asintótica.

Teorema de Lyapunov para estabilidad global

Si existe una función escalar V del estado \mathbf{x} , con derivadas primera continuas tal que:

- $V(\mathbf{x})$ es definida positiva.
- $\dot{V}(\mathbf{x})$ es definida negativa.
- $V(\mathbf{x}) \rightarrow \infty$ cuando $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$

entonces el punto de equilibrio en el origen es asintóticamente estable de manera global.

Una problemática habitual en el análisis de estabilidad de los sistemas no lineales es encontrar una función de Lyapunov. Con esta finalidad, es interesante fijarse en la física del sistema. De esta manera evitaremos el engorroso método de prueba y error. A modo ilustrativo, presentaremos a continuación una aplicación concreta en el campo de la robótica.

Ejemplo: estabilidad asintótica global de un controlador de posición de un robot.

La dinámica de un robot puede expresarse por un conjunto de n ecuaciones no lineales:

$$M(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) + g(q) = \tau \quad (2.1)$$

donde q es un vector de n dimensiones que describe las articulaciones del robot, τ es el vector de par de entrada, b representa las fuerzas de Coriolis y centrífugas provocadas por el movimiento de los segmentos del robot, g modela el efecto de la gravedad y M es la matriz de inercia del robot (de dimensión $n \times n$).

Consideramos, a modo de ejemplo, un controlador compuesto por un término PD y un término compensador de la gravedad. Por tanto, la orden de control para el sistema (2.1) tendrá la siguiente forma:

$$\tau = -K_D \dot{q} - K_P q + g(q) \quad (2.2)$$

De cara al estudio de la estabilidad del lazo cerrado formado por (2.1) y (2.2), resulta del todo impracticable buscar una función de Lyapunov por el método de prueba y error ya que la dinámica del robot contiene cientos de términos para un robot de 5 ó 6 articulaciones de los que normalmente encontramos en el entorno industrial.

Teniendo en cuenta ciertas consideraciones físicas de la estructura del robot, podremos encontrar una función de Lyapunov adecuada para nuestros propósitos.

En primer lugar observamos que la matriz de inercia M es definida positiva para cualquier valor de q . En segundo lugar, el controlador proporcional-derivativo puede ser interpretado como una combinación de amortiguadores y muelles. Esto sugiere la siguiente función de Lyapunov como candidata:

$$V = \frac{1}{2} \left[\dot{q}^T M \dot{q} + q^T K_P q \right] \quad (2.3)$$

donde el primer término representa la energía cinética del manipulador y el segundo representa una «energía potencial artificial» asociada con el muelle virtual de la ley de control PD.

Para derivar la función anterior podemos considerar el principio físico de que el ritmo de cambio de la energía de un sistema mecánico es igual a la energía proporcionada por fuerzas externas. Por tanto tendremos:

$$\dot{V} = \dot{q}^T (\tau - g) + \dot{q}^T K_P q \quad (2.4)$$

Sustituyendo la ley de control (2.2) en la expresión (2.4) tendremos:

$$\dot{V} = -\dot{q}^T K_D \dot{q} < 0 \quad (2.5)$$

Por tanto el sistema en lazo cerrado será asintóticamente estable y el error de seguimiento tenderá a cero.

III. DINÁMICA INVERSA ADAPTATIVA

La ley de control de la dinámica inversa para el sistema

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = u \quad (3.1)$$

es

$$u = \hat{M}(q)(\ddot{q}^d - K_0 e - K_1 \dot{e}) + \hat{h}(q, \dot{q}) \quad (3.2)$$

donde q^d es la trayectoria deseada y e es el error de seguimiento.

Aunque el sistema (3.1) es no lineal, lo podemos reescribir como una relación lineal entre parámetros que son función de masas y momentos de inercia. Por tanto tendremos:

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})p = u \quad (3.3)$$

donde Y es una matriz de funciones conocidas y p es un vector de parámetros con incertidumbre.

La aproximación de la dinámica inversa adaptativa deja la estructura de la ley adaptativa fija pero actualiza los términos \hat{M} y \hat{h} . Si igualamos los sistemas (3.1) y (3.2) obtendremos:

$$M\ddot{q} + h = \hat{M}(\ddot{q}^d - K_0 e - K_1 \dot{e}) + \hat{h} \quad (3.4)$$

Operando podemos reescribirla como:

$$\hat{M}(\ddot{e} + K_1 \dot{e} + K_0 e) = \tilde{M}\ddot{q} + \tilde{h} = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\tilde{p} \quad (3.5)$$

Donde \tilde{M} , \tilde{h} y \tilde{p} representan la diferencia entre los valores estimados y los reales.

Considerando que la matriz de parámetros inerciales estimada es invertible podemos escribir la dinámica del error como

$$\ddot{e} + K_1 \dot{e} + K_0 e = \hat{M}^{-1} Y \tilde{p} := \Phi \tilde{p} \quad (3.6)$$

A continuación, tenemos que deducir un algoritmo para actualizar el vector p estimado y comprobar que el sistema global sea estable. Para ello escogemos una matriz Q simétrica, definida positiva y resolvemos la ecuación de Lyapunov

$$A^T P + P A + Q = 0 \quad (3.7)$$

Escogemos como candidata la siguiente función:

$$V = x^T P x + \tilde{p}^T \Gamma \tilde{p} \quad (3.8)$$

Si la derivamos obtendremos

$$\dot{V} = -x^T Q x + 2\tilde{p}^T (\Phi^T B^T P x + \Gamma \dot{\tilde{p}}) \quad (3.9)$$

Escogeremos una ley de adaptación de manera que eliminemos el segundo término de la derivada. De esta manera el sistema será estable según Lyapunov.

Con $\dot{\tilde{p}} = -\Gamma^{-1} \Phi^T B^T P x$. Como p es constante tendremos que $\dot{\tilde{p}} = \dot{\hat{p}}$ y por lo

tanto, la ley de adaptación quedará

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma^{-1} \Phi^T B^T P x \quad (3.10)$$

De esta manera tendremos que $V = -x^T Q x \leq 0$ y el sistema será estable.

En la figura 2 podemos apreciar la respuesta de seguimiento para un controlador de este tipo.

Considerando un manipulador de una sola articulación:

$$I \ddot{\theta} + MgL \sin(\theta) = u \quad (3.11)$$

con la siguiente ley de control:

$$u = \hat{I} \ddot{v} + \hat{Mg}L \sin(\theta) \quad (3.12)$$

con

$$v = \ddot{\theta}^d - 2w(\dot{\theta} - \dot{\theta}^d) - w^2(\theta - \theta^d) \quad (3.13)$$

Para $w = 10$, $I = 10 = MgL$ y $\hat{I} = 5 = \hat{Mg}L$ tendremos:

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ MgL \end{bmatrix}, \quad \Phi^T = \frac{1}{\hat{p}_1} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -100 & 20 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

y la solución de Lyapunov para $Q = I$ será

$$P = \begin{bmatrix} 2.265 & 0.005 \\ 0.005 & 0.02525 \end{bmatrix}$$

Se consigue para estas condiciones un error de seguimiento nulo en un tiempo de 0,8 s.

Las figuras 2 y 3 ilustran la evolución de los parámetros estimados de la matriz de inercia. Obsérvese que aunque el parámetro p_2 no converja, el controlador funciona correctamente eliminando el error de seguimiento.

IV. EL ALGORITMO DE SLOTINE Y LI

Este método difiere del anterior en que la ley de control no linealiza las ecuaciones de movimiento del robot. Sus principales ventajas radican en que no necesita una estimación de la aceleración ni calcular la inversa de la matriz de parámetros inerciales, con el consiguiente ahorro en tiempo computacional.

Para entender cómo actúa el algoritmo de Slotine y Li [5] primero lo estudiaremos considerando que conocemos de manera exacta los parámetros inerciales, para pasar a continuación a la exposición del caso adaptativo.

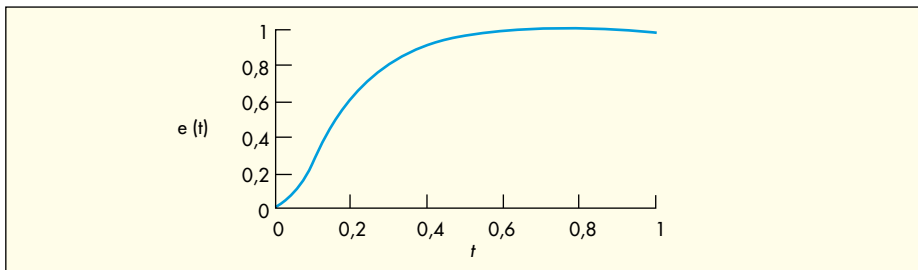


Figura 2. Respuesta de seguimiento para dinámica inversa adaptativa.

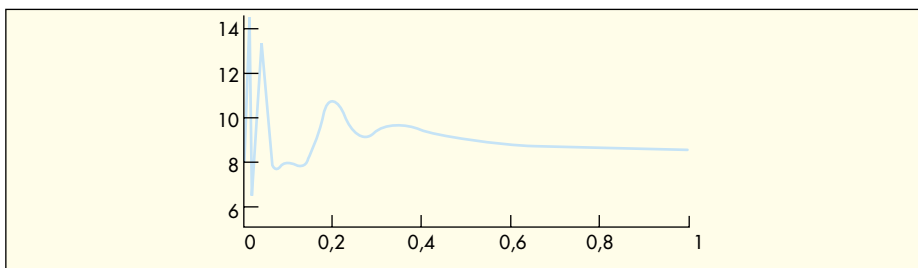


Figura 3. Estimación del parámetro p1

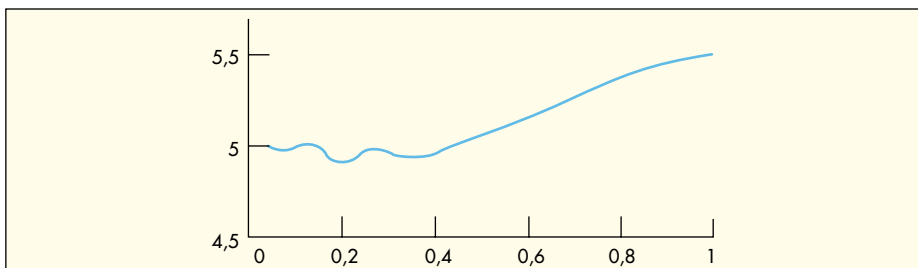


Figura 4. Estimación del parámetro p2

4.1. Parámetros conocidos

Dada la ecuación general de la dinámica del manipulador:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u \quad (4.1.1)$$

fijamos el siguiente lazo de control:

$$u = M(q)v + C(q, \dot{q})v + g(q) - K_D(\dot{q} - v) \quad (4.1.2)$$

con

$$v = \ddot{q}^d - \Lambda(q - q^d) = \ddot{q}^d - \Lambda e$$

donde Λ es una matriz diagonal de ganancias positivas.

Definiendo

$r = \dot{q} - v = \dot{e} + \Lambda e$ con $e = q - q^d$ y sustituyendo la ecuación de control (4.1.2) en la dinámica del sistema (4.1.1) obtendremos:

$$M(q)r + C(q, \dot{q})r + K_D r = 0 \quad (4.1.3)$$

A continuación comprobaremos su estabilidad aplicando las técnicas de Lyapunov.

Definimos la función de energía siguiente:

$$V = \frac{1}{2} r^T M(q) r \quad (4.1.4)$$

cuya derivada será:

$$\dot{V} = r^T M(q) \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r \quad (4.1.5)$$

Sustituyendo M por (4.1.3) obtendremos

$$\dot{V} = r^T (-C(q, \dot{q})r - K_D r) + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r \quad (4.1.6)$$

Sabiendo que es $M - 2C$ es antisimétrica la derivada será negativa $\dot{V} = -r^T K_D r \leq 0$ y por tanto, el error de seguimiento de la trayectoria tenderá a cero.

4.2. Parámetros desconocidos

Para estudiar la situación en que desconocemos los parámetros inerciales volveremos a partir de (4.1.1), pero conside-

rando ahora que los parámetros de la ley de control son ahora una estimación.

$$u = \hat{M}(q)v + \hat{C}(q, \dot{q})v + \hat{g}(q) - K_D r \quad (4.2.1)$$

sustituyendo (4.2.1) en (4.1.1) tendremos:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + g = \hat{M}\ddot{v} + \hat{C}\dot{v} + \hat{g} - K_D r \quad (4.2.2)$$

Considerando que $\ddot{q} = \dot{r} + \dot{v}$ y $\dot{q} = r + v$ podremos reescribir (4.2.2) como:

$$M\dot{r} + Cr + K_D r = \tilde{M}\dot{v} + \tilde{C}v + \tilde{g} = Y(q, \dot{q}, v, \dot{v})\tilde{p} \quad (4.2.3)$$

donde:

$$\tilde{M} = \hat{M} - M, \quad \tilde{C} = \hat{C} - C, \quad \tilde{g} = \hat{g} - g \quad \text{y} \quad \tilde{p} = \hat{p} - p$$

Cabe señalar que la matriz no depende de la aceleración del manipulador sino de la aceleración de la trayectoria de referencia y de la velocidad del error de seguimiento.

A continuación, tal como hemos realizado antes, comprobaremos la estabilidad del sistema aplicando las técnicas de Lyapunov. Para ello, definimos la siguiente función de energía:

$$V = \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2} \tilde{p}^T \Gamma \tilde{p} \quad (4.2.4)$$

Derivando (4.2.4) y sustituyendo M por (4.2.3) obtendremos:

$$\dot{V} = -r^T K_D r + \tilde{p}^T (\Gamma \dot{\tilde{p}} + Y^T r) \quad (4.2.5)$$

Para que el segundo término se anule escogeremos la siguiente ley adaptativa:

$$\dot{\tilde{p}} = \dot{\tilde{p}} = -\Gamma^{-1} Y^T r \quad (4.2.6)$$

de esta manera tendremos

$$\dot{V} = -r^T K_D r \leq 0$$

tendiendo a cero el error de seguimiento.

4.3. Ejemplo de aplicación

Si consideramos el caso de un manipulador con una sola articulación

$$I\ddot{\theta} + MgL \sin(\theta) = u \quad (4.3.1)$$

tendremos la siguiente ley de control:

$$u = I\dot{v} + MgL \sin(\theta) - K_D r \quad (4.3.2)$$

con $v = \dot{\theta} - \Gamma(\theta - \theta^d)$ y $r = \dot{\theta} + \Gamma\dot{\theta}$

Por tanto, el sistema resultante será:

$$I\dot{r} + K_D r = Y(v, \theta)\tilde{p} \quad (4.3.3)$$

con $Y(\dot{\theta}, \theta) = \begin{bmatrix} v \sin(\theta) \end{bmatrix}$

En la figura 5 podemos observar la respuesta del sistema de control sin esti-

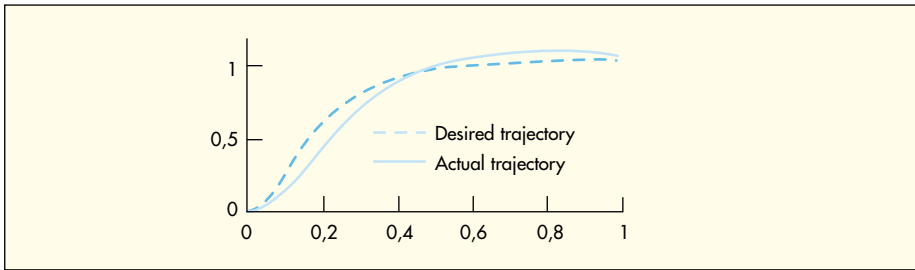


Figura 5. El algoritmo de Slotine y Li sin estimación de parámetros ($p_1 = 5$ y $p_2 = 5$)

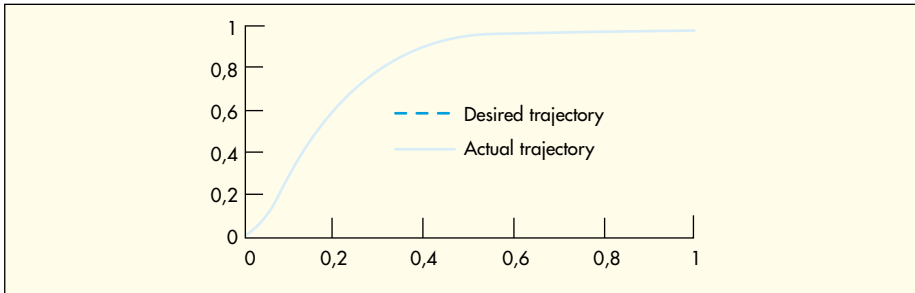


Figura 6. El algoritmo de Slotine y Li con estimación de parámetros

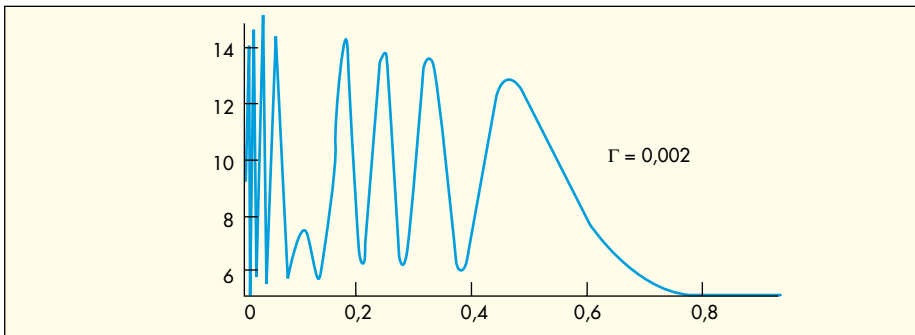


Figura 7. Estimación del parámetro p_1

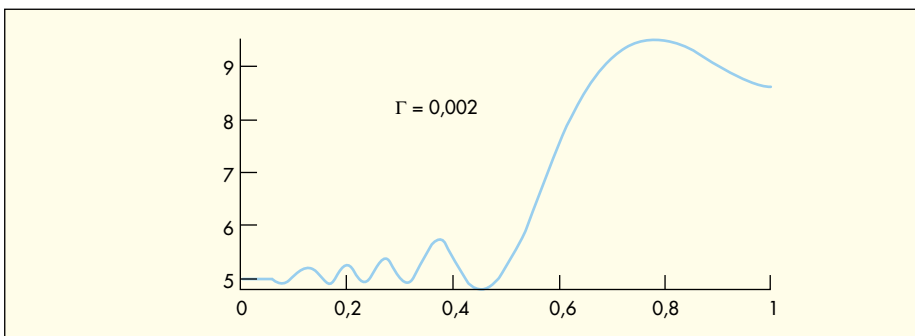


Figura 8. Estimación del parámetro p_2

mación de los parámetros, observándose un cierto error de seguimiento.

En cambio, en la figura 6, que corresponde al caso adaptativo el error de seguimiento tiende a cero.

Cabe remarcar que aunque los parámetros no converjan a su valor real, tal como se observa en las figuras 7 y 8, el seguimiento de la trayectoria es muy bueno.

V. CONTROL ADAPTATIVO ROBUSTO

Los casos tratados anteriormente contemplaban situaciones en que la incertidumbre se producía en los parámetros inerciales. En la práctica, podemos encontrarnos con otros tipos de incertidumbres no paramétricas tales como dinámica no modelada de alta frecuencia

(dinámica de los actuadores o vibraciones estructurales), de baja frecuencia (fricción de Coulomb), ruido en las medidas y retardos en la computación. Estas incertidumbres pueden provocar que la ley de adaptación no distinga la información de los parámetros del ruido y que el sistema no converja adecuadamente. Es decir, puede haber una deriva en los parámetros.

En la figura 9 se muestra la influencia de la flexibilidad de los ejes sobre la respuesta de seguimiento de la posición de un robot.

Un método para reducir la deriva de los parámetros es el de la zona muerta. Ésta se basa en la observación de que los errores de seguimiento pequeños contienen en gran medida ruido e interferencias. Por consiguiente, parece un buen método eliminar la ley de adaptación cuando los errores son pequeños y mantenerla en caso contrario. Si la ley de adaptación tiene la siguiente forma

$$\hat{a} = -\gamma ve, \text{ la sustituimos por}$$

$$\hat{a} = \begin{cases} -\gamma ve & |e| > \Delta \\ 0 & |e| < \Delta \end{cases} \quad (5.1)$$

donde Δ es el tamaño de la zona muerta.

Otro método para aumentar la robustez es el propuesto por Slotine [1]. Consideremos el sistema de control adaptativo siguiente:

$$\tau = \tau_a = Y(\cdot)\hat{\phi} - K_2 e_2 - K_1 e_1 \quad (5.2)$$

$$\frac{d\hat{\phi}}{dt} = -Y^T(e_1 + e_2) \quad (5.3)$$

siendo $e_1 = q - q^d$ y $e_2 = \dot{e}_1$.

En el supuesto de que no haya interferencias en el modelo del robot, se puede demostrar que con el control anterior, el error de seguimiento es asintóticamente estable. Pero con la presencia de una interferencia T_d , el parámetro estimado $\hat{\phi}$ puede no convergir. Slotine demostró que el parámetro estimado permanece acotado si utilizamos la siguiente ley de control

$$\tau = \tau_a + k_d \operatorname{sgn}(e_1 + e_2) \quad (5.4)$$

Donde k_d es un escalar positivo que satisface $k_d > \|T_d\|$.

El control adaptativo robusto requiere de mayor tiempo de cálculo, pero en contrapartida, ofrece mayores prestaciones en cuanto a insensibilidad ante incertidumbres no inerciales.

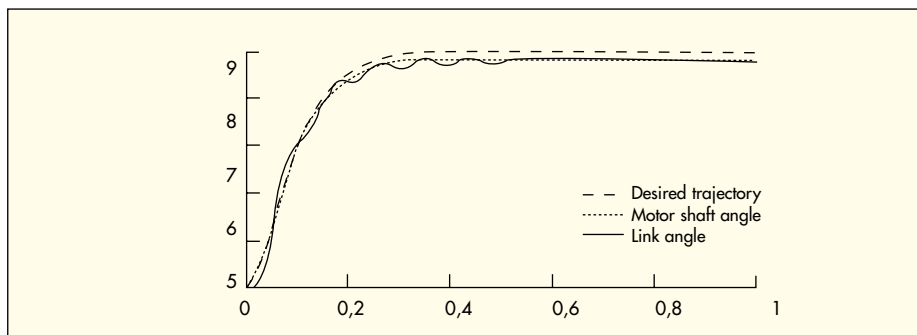


Figura 9. Respuesta de seguimiento con torsión

VI. CONCLUSIONES

Hemos introducido varios métodos para controlar la posición de un robot de forma adaptativa. La técnica de la dinámica inversa adaptativa presentaba el problema de disponer de la medida de la aceleración del manipulador y del cálculo de la inversa de la matriz inercial. Este problema se soluciona con el algoritmo presentado por Slotine y Li, del que se expone la versión no adaptativa y la adaptativa.

Un problema presente en el control de robots es el de otros tipos de incertidumbres, como vibraciones o ruido

Un problema presente en el control de robots es el de otros tipos de incertidumbres, como vibraciones, ruido, etc. Se han mostrado varias técnicas que disminuyen la influencia de dichas incertidumbres en el control.

El control adaptativo suele ser superior respecto al control robusto cuando las incertidumbres son de parámetros constantes o de variación lenta. El motivo radica en que el control adaptativo mejora su desempeño a medida que se aplica la ley de adaptación. En cambio, el control robusto intenta conseguir un desempeño consistente. Otra razón es que el control adaptativo requiere poca o

ninguna información a priori sobre los parámetros desconocidos. En cambio, el control robusto a menudo requiere una estimación a priori de los límites de los parámetros.

El control robusto tiene como ventajas el tratar con interferencias, parámetros de variación rápida y dinámica no modelada.

Una vez presentadas las dos filosofías de control con incertidumbre, conviene matizar que el control adaptativo, que actúa eficazmente ante incertidumbres en los parámetros inerciales, puede fracasar ante otros tipos de incertidumbres como interferencias externas o dinámicas no modeladas. En cambio, en tareas repetitivas, el error de seguimiento producido por un controlador robusto tiende a ser repetitivo y, por otra parte, dicho error tiende a decrecer con un controlador adaptativo. Por consiguiente, hace falta un conocimiento adecuado del tipo de incertidumbre y de la tarea a realizar por el manipulador para tener un criterio de elección de un tipo de control u otro.

REFERENCIAS

- [1] C. Abdallah, D. Dawson, P. Dorato, and M. Jamshidi «Survey of Robust Control for Rigid Robots». IEEE Control Systems, February 1991.
- [2] Mark W. Spong «Robust and Adaptive Motion Control of Manipulators» *Coordinated Science Laboratory*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [3] Mark W. Spong, M. Vidyasagar «Robot Dynamics and Control» *John Wiley & Sons, 1989*.
- [4] Jean-Jacques E. Slotine, «Putting Physics in Control- The Example of Robotics» IEEE Control Systems, December 1988.
- [5] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li «Applied Nonlinear Control» *Prentice Hall*. New Jersey 1991.