5

Control de robots manipuladores

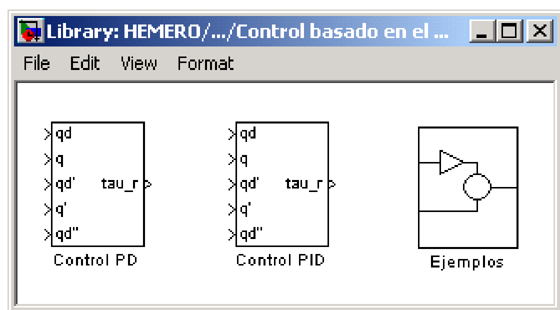
Introducción

En este capítulo se presentan una serie de bloques que permiten simular diversos esquemas de control que se presentan en el Capítulo 8 de Ollero [4]. En concreto se dispone de bloques para simular la técnica del par computado, el control adaptativo y el control con aprendizaje.

Además de la descripción de los bloques necesarios para simular estas técnicas, también se dispone al menos de un ejemplo completo de la implementación de cada una de ellas.

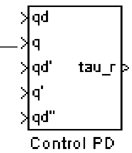
Control mediante la técnica del par computado

Existen dos bloques para el control mediante el par computado ("Control PD" y "Control PID"):



Dichos bloques se describen en las siguientes páginas. Asimismo, existen una serie de ejemplos de implementaciones completas de la técnica del par computado mediante bloques de HEMERO.

Control PD



Propósito

Calcular el término τ_r que forma parte del par de control asociado a la técnica del par computado usando un PD.

Descripción

Tomando como entradas los vectores columna q, q' (posiciones y velocidades articulares), qd, qd' y qd'' (posiciones, velocidades y aceleraciones articulares deseadas), este bloque calcula el par τ_r asociado a la técnica del par computado con controlador PD:

$$\tau_r = \theta''_d + K_v e' + K_p e \tag{5.1}$$

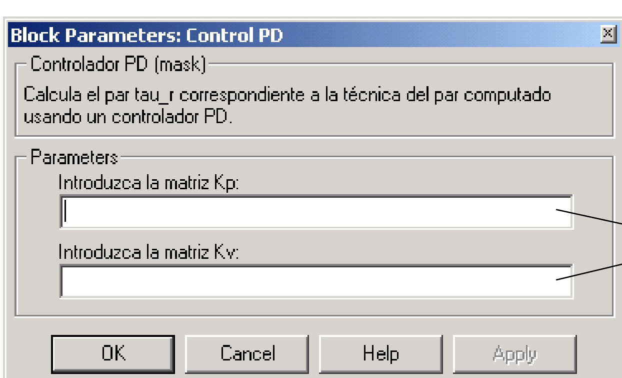
donde e, e' son vectores de n errores de posición y velocidad respectivamente:

$$e = \theta_d - \theta \quad ; \quad e' = \theta'_d - \theta' \tag{5.2}$$

y K_p , K_v son las matrices diagonales nxn:

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{p1} & & \\ & k_{p2} & \\ \dots & \dots & \dots \\ & & k_{pn} \end{bmatrix} \quad ; \quad K_v = \begin{bmatrix} k_{v1} & & \\ & k_{v2} & \\ \dots & \dots & \dots \\ & & k_{vn} \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

Parámetros



Matrices correspondientes al control PD

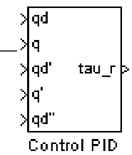
Ejemplos

Ver Ejemplos 8.1, 8.2 y 8.4 de Ollero [4].

Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Control PID



Propósito

Calcular el término τ_r que forma parte del par de control asociado a la técnica del par computado usando un PID.

Descripción

Tomando como entradas los vectores columna q, q' (posiciones y velocidades articulares), qd, qd' y qd'' (posiciones, velocidades y aceleraciones articulares deseadas), este bloque calcula el par τ_r asociado a la técnica del par computado con controlador PID:

$$\tau_r = \theta''_d + K_v e' + K_p e + K_i \int_0^t e\,dt \tag{5.4}$$

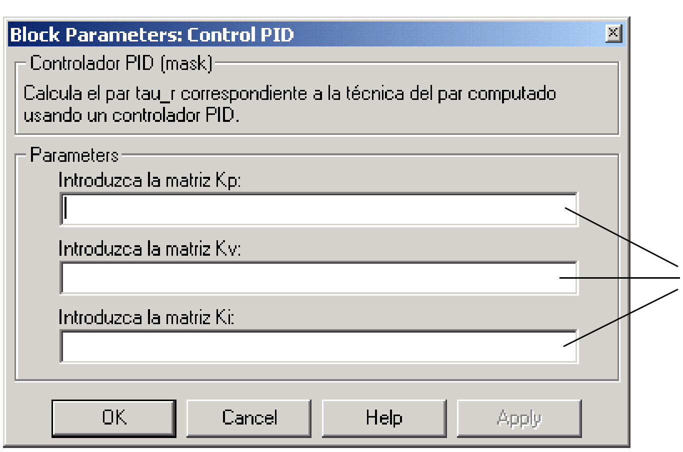
donde e, e' son vectores de n errores de posición y velocidad respectivamente:

$$e = \theta_d - \theta \;\; ; \;\; e' = \theta'_d - \theta' \tag{5.5}$$

y K_p, K_v, K_i son las matrices diagonales nxn:

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{p1} & & \\ & k_{p2} & \\ \dots & \dots & \dots \\ & & k_{pn} \end{bmatrix} ; K_v = \begin{bmatrix} k_{v1} & & \\ & k_{v2} & \\ \dots & \dots & \dots \\ & & k_{vn} \end{bmatrix} ; K_i = \begin{bmatrix} k_{i1} & & \\ & k_{i2} & \\ \dots & \dots & \dots \\ & & k_{in} \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

Parámetros



Matrices correspondientes al control PID

Ejemplos

Ver Ejemplos 8.3 y 8.5 de Ollero [4].

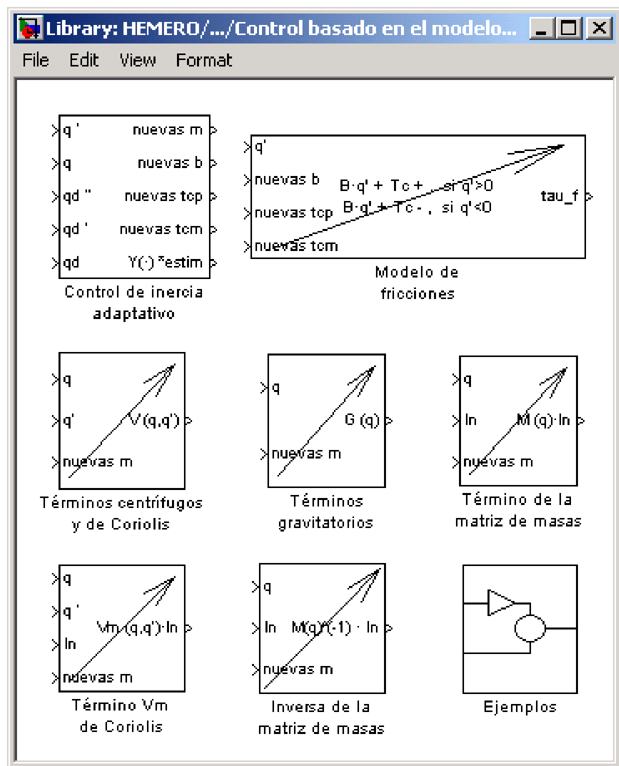
Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Control adaptativo

Se han desarrollado una serie de bloques que permiten la simulación de la técnica de control de inercia adaptativo (Slotine y Li [5]) que se presenta en el Capítulo 8 de Ollero [4]. Los bloques que permiten calcular los términos de la dinámica del brazo robótico al variar alguno de sus parámetros se pueden emplear para simular otras técnicas de control adaptativo.

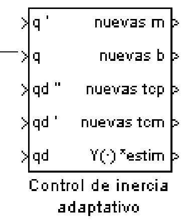
Los bloques disponibles son los siguientes:



Hay que tener en cuenta que cuando se calcula la estimación de las masas en cada instante, dicha estimación no afecta a la estimación de los momentos de inercia. Es decir, solamente se modifica la sexta columna de las matriz de parámetros cinemáticos y dinámicos (ver sección dyn del Capítulo 4 del manual).

La mayoría de los bloques que se presentan a continuación son análogos a los descritos en el Capítulo 4 del manual, con la única salvedad de que existen entradas adicionales para poder modificar en cada instante la estimación de las masas y de las fricciones.

Control de inercia adaptativo



Propósito

Calcular la estimación de ciertos parámetros del manipulador según las ecuaciones del esquema de control de inercia adaptativo.

Descripción

Devuelve la estimación de las masas y las fricciones de un determinado manipulador a partir de las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares deseadas (`qd`, `qd'` y `qd''`), y de las posiciones y velocidades articulares instantáneas (`q` y `q'`). Asimismo, devuelve el término:

$$Y(\;)\varphi = \hat{M}(q)(\Lambda e' + q''_d) + \hat{V}_m(q, q')(\Lambda e + q'_d) + \hat{G}(q) + \hat{F}(q') \tag{5.7}$$

donde e, e' son vectores de n errores de posición y velocidad respectivamente, y Λ es una matriz diagonal definida positiva de dimensiones nxn, siendo n es el número de articulaciones del manipulador.

Las estimaciones de masas y fricciones pueden servir como entradas al resto de los bloques que se describen en esta sección. Dichas estimaciones se calculan integrando la expresión:

$$\varphi' = \Gamma Y^T(\;)(\Lambda e + e') \tag{5.8}$$

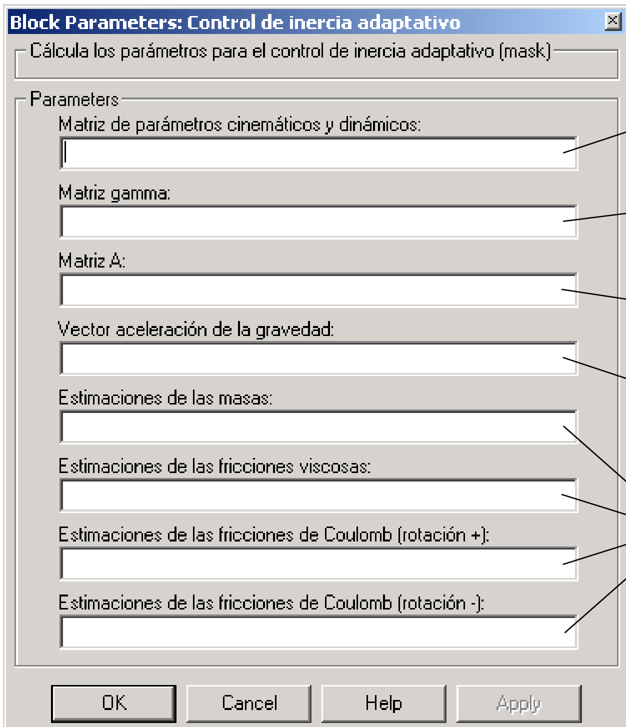
donde φ' es la derivada respecto al tiempo de las estimaciones de los parámetros (vector de dimensiones rx1), Γ es una matriz diagonal definida positiva de dimensiones rxr y $Y(\;)$ es una matriz de funciones temporales conocidas de dimensiones nxr, siendo r el número de parámetros que se están estimando.

Por otro lado, la salida `Y(·)*estim`, puede servir para simular el esquema de control de inercia adaptativo (ver Ejemplo 8.8 de Ollero [4]). En dicho esquema, el par de control que se aplica, viene dado por:

$$\tau = Y(\;)\varphi + K_v e' + K_v \Lambda e \tag{5.9}$$

donde K_v es una matriz de ganancias.

Parámetros



Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn` del Capítulo 4

Matriz Γ para el cálculo de las estimaciones de los parámetros. Sus dimensiones son rxr

Matriz Λ para el cálculo de la señal de control. Sus dimensiones son nxn

Se introduciría [0 0 -9.81] para el caso en que la aceleración fuera en la dirección y sentido del vector -Z.

Vectores con las estimaciones iniciales para los parámetros correspondientes

Precauciones

Se debe tener en cuenta que este bloque emplea las variables globales denominadas DYN_ESTIM y ES_VM.

Ejemplos

Ver Ejemplo 8.8 de Ollero [4].

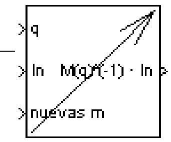
Referencias

Lewis, F.L., C.T. Abdallah, D.M. Dawson, *Control of robot manipulators*, Macmillan Publishing Company, 1993.

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Slotine, J., Li, W., Adaptive manipulator control: a case study. IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 33, pp. 995-1003, 1988.

Inversa de la matriz de masas



Inversa de la matriz de masas

Propósito

Calcular el producto de la inversa de la matriz de masas del manipulador por un vector columna (`In`) que se le pasa como entrada. Dispone de una entrada para proporcionarle las estimaciones de las masas en cada instante.

Descripción

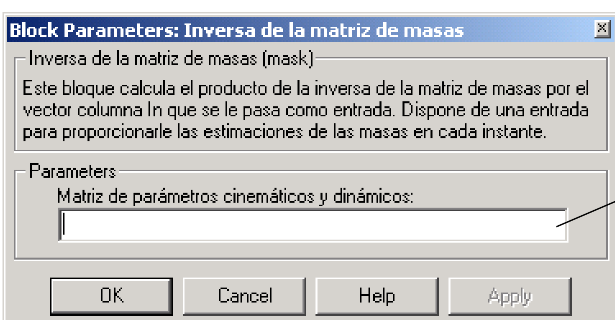
Este bloque se encarga de obtener el resultado del producto:

$$M^{-1}(q) \cdot In \tag{5.10}$$

donde `In` es un vector columna cualquiera que se le da como entrada. La otra entrada del bloque es evidentemente un vector columna con las posiciones articulares. A la salida, el resultado es un vector columna también.

Dispone de una entrada denominada `nuevas m`, que permite modificar la estimación de las masas del manipulador en cada instante.

Parámetros


Block Parameters: Inversa de la matriz de masas

Inversa de la matriz de masas (mask)

Este bloque calcula el producto de la inversa de la matriz de masas por el vector columna In que se le pasa como entrada. Dispone de una entrada para proporcionarle las estimaciones de las masas en cada instante.

Parameters

Matriz de parámetros cinemáticos y dinámicos:

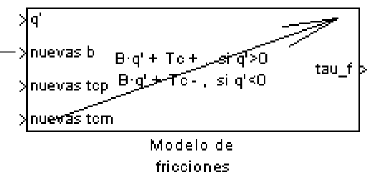
OK Cancel Help Apply

Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn`.

Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Modelo de fricciones



Propósito

Calcular el par correspondiente a las fricciones viscosa y de Coulomb empleando cierto modelo para las mismas. Dispone de entradas para modificar las estimaciones de las fricciones en cada instante

Descripción

Devuelve el par (vector columna `tau_f`) que contiene las fricciones a partir del vector columna de velocidades articulares (`q'`) que se le pase.

El modelo que se emplea es:

$$F_i(q'_i) = \begin{cases} G_i^2 B_i q'_i + G_i \tau_i^- & , q'_i < 0 \\ G_i^2 B_i q'_i + G_i \tau_i^+ & , q'_i > 0 \end{cases} \tag{5.11}$$

donde el subíndice i se refiere a la articulación i-ésima. Los parámetros que aparecen en este modelo se detallan a continuación.

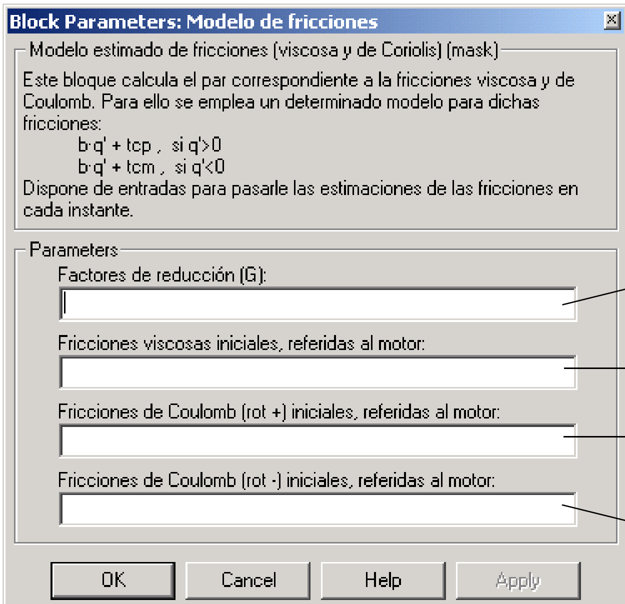
Dispone de tres entradas denominadas `nuevas b`, `nuevas tcp` y `nuevas tcm`, que permiten modificar en cada instante las estimaciones de las fricciones viscosas y de las fricciones de Coulomb para rotación positiva y negativa respectivamente.

Parámetros

Todos los parámetros que se solicitan en el cuadro de diálogo que se muestra a continuación son vectores con un número de elementos igual al número de articulaciones del manipulador.

Cada elemento de dichos vectores hace referencia a la correspondiente articulación del manipulador. Así por ejemplo, el segundo elemento del vector de fricciones viscosas, es la fricción viscosa de la segunda articulación del manipulador.

Los parámetros de fricción han de estar referidos al motor, por lo que el cuadro de diálogo solicita también el parámetro de reducción G con la finalidad de poder referir los valores de fricción a los enlaces.



G es velocidad de la articulación/velocidad del enlace

Son los elementos B_i del modelo

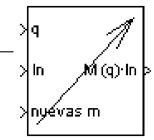
Son los elementos τ_i^- del modelo

Son los elementos τ_i^+ del modelo

Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Término de la matriz de masas



Término de la matriz de masas

Propósito

Calcular el par asociado a la matriz de masas. Dispone de una entrada para modificar la estimación de las masas en cada instante.

Descripción

Calcula el producto de la matriz de masas por el vector de entrada `In`. En la otra entrada hay que introducir el vector de posiciones articulares `q`. Si el vector In es el vector de aceleraciones articulares, entonces a la salida del bloque se tiene el par asociado a la matriz de masas.:

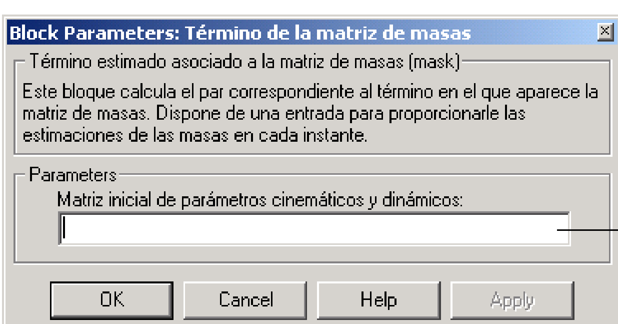
$$M(q) \cdot q" \tag{5.12}$$

Para un manipulador con n articulaciones la matriz de masas tiene dimensiones nxn y es simétrica.

Hay que recordar que si se introducen parámetros dinámicos relativos a la inercia del motor, entonces dicha inercia, referida al cuadro de referencia del enlace, aparecerá en la diagonal de la matriz M.

Se dispone de una entrada (`nuevas m`) para modificar en cada instante la estimación de las masas del manipulador.

Parámetros



Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn`.

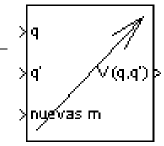
Ejemplos

Ver Ejemplo 8.8 de Ollero [4].

Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Términos centrífugos y de Coriolis



Términos centrífugos y de Coriolis

Propósito

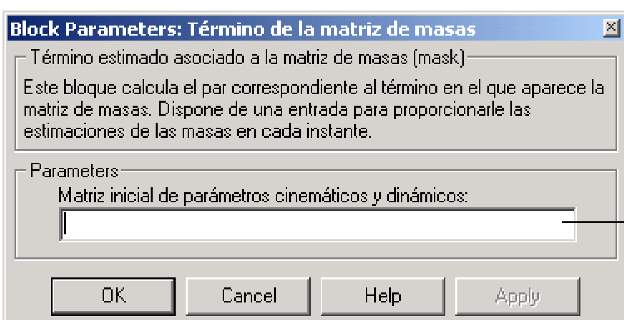
Calcular el par correspondiente a los términos centrífugos y de Coriolis. Se dispone de una entrada para modificar en cada instante la estimación de las masas.

Descripción

Devuelve un vector columna con el par que corresponde a los términos centrífugos y de Coriolis para el estado definido por los vectores columna `q` y `q'`, que son respectivamente las posiciones y velocidades articulares.

Se dispone de una entrada adicional (`nuevas m`) para la introducción de las estimaciones de las masas en cada instante.

Parámetros



Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn`.

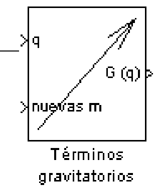
Ejemplos

Ver Ejemplo 8.8 de Ollero [4].

Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Términos gravitatorios



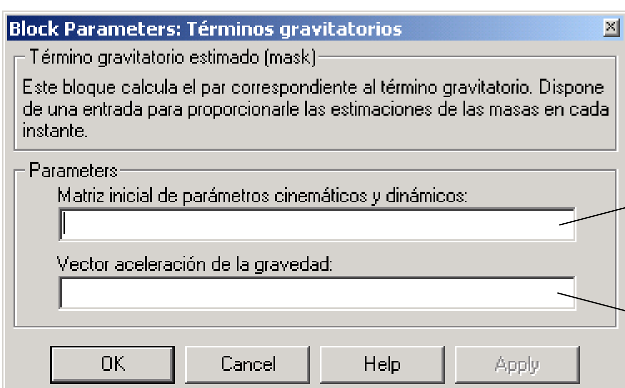
Propósito

Calcular el par debido a los términos gravitatorios. Dispone de una entrada para ir pasándole las estimaciones de las masas en cada momento.

Descripción

Devuelve un vector columna con el par que corresponde al término gravitatorio para el estado definido por el vector columna `q` de variables articulares. La entrada denominada `nuevas m` sirve para pasarle la estimación de las masas en cada momento.

Parámetros



Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn`.

Se introduciría [0 0 -9.81] para el caso en que la aceleración fuera en la dirección y sentido del vector -Z.

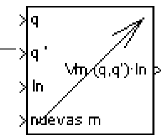
Ejemplos

Ver Ejemplo 8.8 de Ollero [4].

Referencias

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Término Vm de Coriolis



Término Vm de Coriolis

Propósito

Calcular el producto de un vector por el término V_m de Coriolis. Tiene una entrada para pasarle las estimaciones de las masas en cada instante.

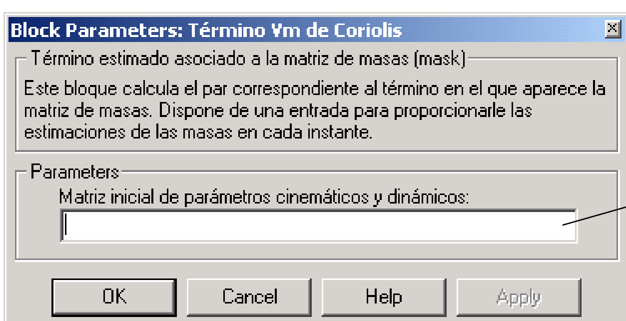
Descripción

Calcula el producto del término V_m de Coriolis por el vector de entrada `In`. En la otras entradas hay que introducir los vectores con las posiciones y las velocidades articulares (`q` y `q'` respectivamente). Si el vector In es el vector de velocidades articulares, entonces a la salida del bloque se tiene el par asociado al término centrífugo y de Coriolis:

$$V(q, q') = V_m(q, q')q' \tag{5.13}$$

La entrada `nuevas m` permite pasarle las estimaciones de las masas en cada instante.

Parámetros



Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn`.

Algoritmo

El término V_m se calcula mediante la fórmula:

$$V_m(q, q') = \frac{1}{2}(M' + U^T - U) \tag{5.14}$$

donde:

$$M'(q) = (q' \otimes I_n)\frac{\partial M}{\partial q}; \quad U(q, q') = (I_n \otimes q'^T)\frac{\partial M}{\partial q} \tag{5.15}$$

siendo $\otimes$ el producto de Kronecker [1] y $\dfrac{\partial M}{\partial q} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial M}{\partial q_1} \\ \dots \\ \dfrac{\partial M}{\partial q_n} \end{bmatrix}$.

Precauciones

Se debe tener en cuenta que este bloque emplea una variable global denominada ES_VM.

Referencias

Lewis, F.L., C.T. Abdallah, D.M. Dawson, *Control of robot manipulators*, Macmillan Publishing Company, 1993.

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Control con aprendizaje

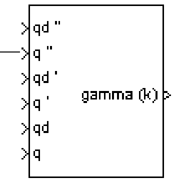
Se dispone de un bloque para la implementación del esquema de control con aprendizaje que aparece descrito en Craig [2].

La implementación del esquema de aprendizaje no es del todo intuitiva, por lo que se ruega al lector que preste especial atención a la descripción de este bloque. Se emplea un fichero denominado `'itera.mat'` para almacenar los resultados de cada iteración y así poder emplearlos en los cálculos de la siguiente iteración.

El breve ejemplo que acompaña a la descripción de este bloque resulta muy ilustrativo a efectos de comprender su uso.

A continuación se pasa a describir brevemente dicho bloque con objeto de poner de manifiesto cual es su utilidad en dicho esquema.

Par realimentado aprendido



Par realimentado aprendido

Propósito

Calcular un par mediante aprendizaje en repeticiones sucesivas del mismo movimiento. Dicho par hay que sumarlo al par de control

Descripción

Este bloque calcula, mediante repeticiones sucesivas del mismo movimiento, el par γ_k, que aparece en la ley de control (Craig [2]):

$$\tau = \hat{M}(q)[q''_d + K_v e' + K_p e] + \hat{V}(q, q') + \hat{G}(q) + \hat{\gamma}_k \qquad (5.16)$$

Dicho par viene dado por la ecuación:

$$\hat{\gamma}_k = \hat{M} D_k \qquad (5.17)$$

donde $\hat{D}_k$ se calcula en iteraciones sucesivas a partir de la expresión:

$$\hat{D}_{(k+1)} = \hat{D}_k + P * e_k \qquad (5.18)$$

siendo:

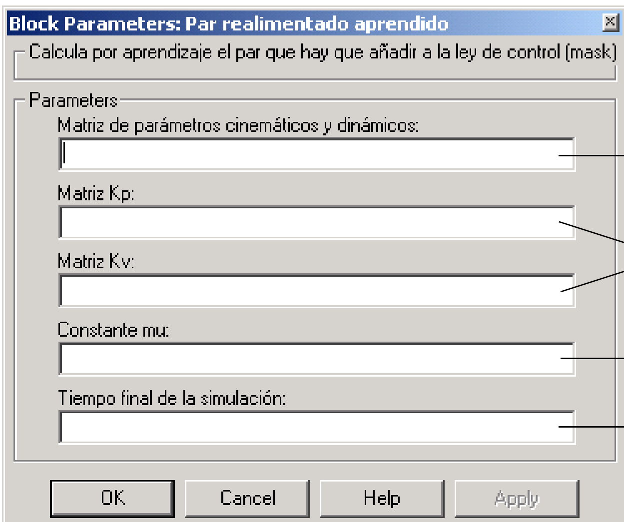
$$P(s) = s^2 + (K_v - \mu)s + (K_p - \mu) \qquad (5.19)$$

Como entradas se necesitan las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares actuales y deseadas.

Tras cada iteración hay que guardar el espacio de trabajo en un fichero con el nombre `'itera.mat'` en el directorio de trabajo. Es necesario que el fichero tenga ese nombre, ya que el bloque Simulink intenta abrir dicho fichero para cargar los resultados de la iteración anterior.

Por tanto, cuando se quiera empezar desde la primera iteración de nuevo será necesario borrar el archivo `'itera.mat'` del directorio de trabajo.

Parámetros



Esta matriz debe tener el formato que se indica en el apartado `dyn`.

Matrices K_p y K_v en la fórmula de $P(s)$

Constante μ en la fórmula de $P(s)$

Duración de la simulación (se supone que empieza en t = 0.

Precauciones

Se debe tener en cuenta que este bloque emplea las variables globales denominadas TIEMPO, D_K, E, E_D y E_DD.

Hay que elegir las constantes de tal modo que se verifique:

$$0 < \mu < \frac{\frac{k_v^2}{2} - 2}{\sqrt{\frac{k_v^2}{4} - 1}} \tag{5.20}$$

Ejemplos

Ver Ejemplo 8.9 de Ollero [4].

Ejemplo H.5.1 (archivo `ejh51.mdl`)

Para simular tres iteraciones del método de control con aprendizaje implementado en el archivo , serían necesarias las siguientes líneas:

```
clear all
sim('ejh51')
save it1
save itera
sim('ejh51')
save it2
save itera
sim('ejh51')
```

```
save it3
save itera
```

Después de ejecutar estas líneas, se tendrían tres ficheros denominados `it1.mat`, `it2.mat` e `it3.mat` con los resultados de cada una de las iteraciones. Si se quisiera empezar a simular de nuevo desde la primera iteración, sería necesario borrar el archivo `itera.mat`.

Referencias

Craig, J.J., *Adaptive control of mechanical manipulators*. Addison Wesley, 1988.

Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

Ejemplos

Ejemplo H.5.2 (archivo `ejh52.mdl`): Ver Ejemplo 8.1 en Ollero [4].

Ejemplo H.5.3 (archivos `ejh53.mdl`): Ver Ejemplo 8.2 en Ollero [4].

Ejemplo H.5.4 (archivo `ejh54.mdl`): Ver Ejemplo 8.3 en Ollero [4].

Ejemplo H.5.5 (archivo `ejh55.mdl`): Ver Ejemplo 8.8 en Ollero [4].

Referencias

[1] Brewer, J. W., *Kronecker products and matrix calculus in matrix theory*, IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-25, nº 9, pp. 772-781, Sept. 1978.

[2] Craig, J.J., *Adaptive control of mechanical manipulators*. Addison Wesley, 1988.

[3] Craig, J.J., *Introduction to robotics*. Addison Wesley, segunda ed., 1989.

[4] Ollero, A., *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu editores, 2001.

[5] Slotine, J., Li, W., *Adaptive manipulator control: a case study*, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 33, pp. 995-1003, 1988.