Sistema de Control Inteligente Adaptable

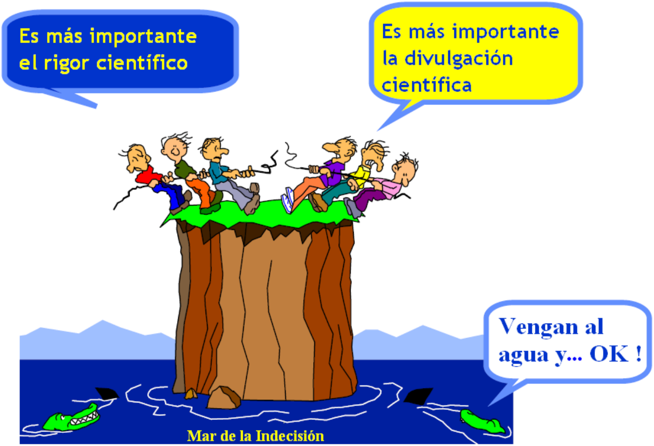
Virgilio López Morales

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-CITIS, México.

Seminario CITIS, 6 de marzo, 2009

Los grandes desafíos del SIGLO XXI

... y en consenso?...



... y en consenso?...

... y en consenso?...

... Resultado?

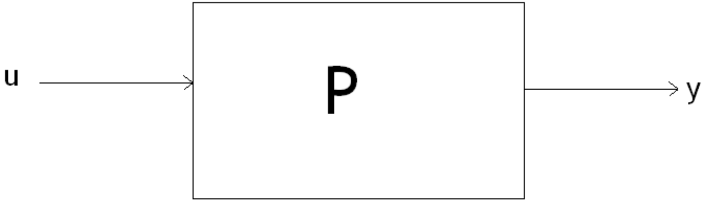
- Introducción
- Estado del Arte sobre Estimación de parámetros de una planta
- Modelo Inteligente (difuso) T-S
- Estimador de Parámetros del Modelo Difuso T-S
- Ejemplo de diseño de un controlador difuso adaptable
- Conclusiones
- Algo en mente ?

Porqué control inteligente adaptable?

- Cuanto más detalles matemáticos del modelo de un sistema, menos se parece al mundo real! (A. Einstein). $\therefore$ expandir las herramientas de modelado de sistemas $\Longrightarrow$ Modelado con un Sistema Inteligente
- Los sistemas controlados (plantas) en el mundo real están expuestos a la influencia del medio o del tiempo $\Longrightarrow$ Adaptación del controlador.
- Desarrollo de nuevas herramientas de análisis de sistemas para el desarrollo de un nuevo enfoque de control $\Longrightarrow$ Conjunción de la teoría de control y ciencias computacionales $\subseteq$ SoftComputing

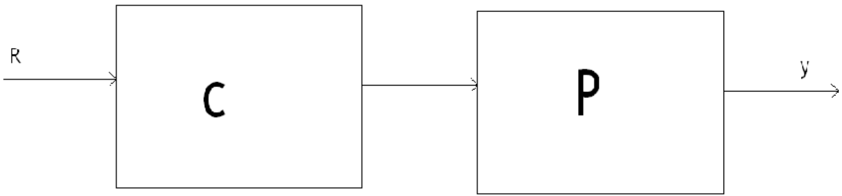
1. Sistema (o planta)
2. Controlador
3. Lazo cerrado
4. Modelo difuso T-S
5. Variación de parámetros y/o perturbaciones
6. Método de Lyapunov

Sistema (o planta)

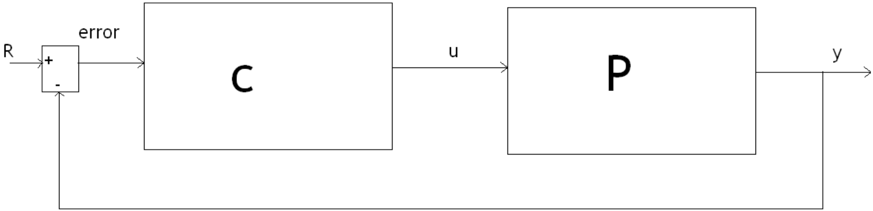


Lineal: $y_1 + y_2 = P(u_1 + u_2) = P(u_1) + P(u_2)$, Ej. V=RI
No lineal: $y = f(u) \Longrightarrow y1 + y2 \neq f(1) + f(2)$, Ej. $y = sen(u)$,
$\therefore y_1 + y_2 \neq sen(u1 + u2) \neq sen(u1) + sen(u2)$.

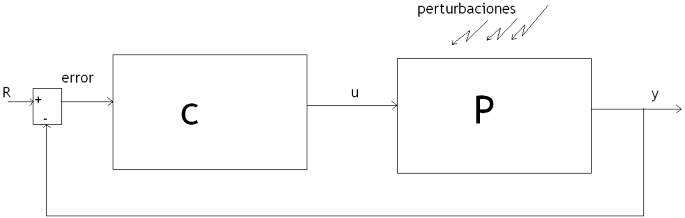
Controlador



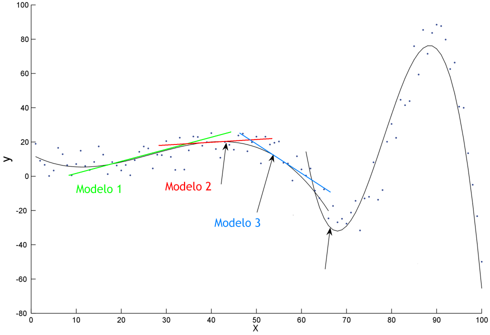
Control en lazo cerrado



Variaciones de parámetros y/o perturbaciones



Modelo Difuso T-S de un sistema no lineal



Si $20 < X < 35$ Entonces Usar-modelo-1(lineal)
Si $40 < X < 50$ Entonces Usar-modelo-2 (lineal)...

Método de Lyapunov

Sea el sistema $\frac{dx}{dt} = f(x)$ con $f(0) = 0$.
Si puede encontrar una función V(x) definida positiva en una región (es decir que $V(0) = 0$ y que $V(x) > 0$ en una $U \subset R^n$), y que su derivada con respecto al tiempo sea menor que cero (negativa), entonces la solución del sistema en el origen es estable.

1. En el Controlador Adaptable Directo el sistema difuso es el controlador
2. En el Controlador Adaptable Indirecto el sistema difuso es un modelo aproximado de la planta (modelo difuso) $\therefore$ el controlador se construye suponiendo que el modelo difuso representa la planta.
   El problema es que las plantas varían sus parámetros o sufren perturbaciones!
   $\therefore$ Es muy importante la estimación de parámetros para 2.

Algoritmos de estimación fuera de línea

- Estimación de parámetros de los modelos difusos a partir de mediciones de Entrada-Salida (Modelos de relación, Modelos con base a aproximaciones)
- Modelos Difusos Cualitativos.
- Redes Neuronales

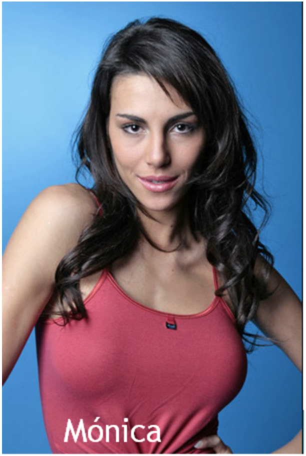
Pero es necesario tiempo real !
En ésta plática se revisa una metodología para un estimador de parámetros en línea de un modelo difuso T-S.

Caso utópico

Modelo de Jesús:
$J = a_1 * Egoista + a_2 * Centrado + a_3 * Servicial + a_4 * Inteligencia$
donde $a_1 = 0.6,\ a_2 = 0.3,\ a_3 = 0.1,\ a_4 = 0.7$

Modelo de Mary:
$M = b_1 * Egoista + b_2 * Centrado + b_3 * Servicial + b_4 * Inteligencia$
donde $b_1 = 0.1,\ b_2 = 0.4,\ b_3 = 0.5,\ b_4 = 0.8$

Variación en los Parámetros cambian la dinámica de una planta !
pero además hay PERTURBACIONES por ejemplo.



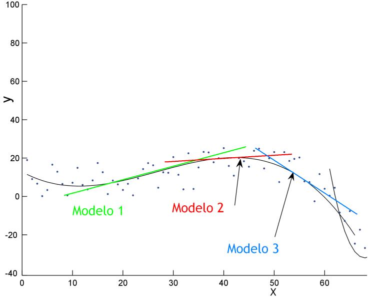
Brad

Y CAMBIABAN SUS COMPORTAMIENTOS REPENTINAMENTE !!

Observaciones

1. Las plantas a controlar además de estar expuestas a perturbaciones, tienen parámetros que normalmente varían en función de variables del entorno (humedad, temperatura, tiempo,radiación solar, concentraciones diferentes, etc.) $\therefore$ Controlador adaptable
2. Los modelos que se proponen para una planta debería de ser no solamente analíticos sino además, integrar información lingüística valiosa de los expertos $\therefore$ Modelos difusos
3. La estimación de parámetros de la planta, debería ser en línea para la utilización en áreas donde se requiere tiempo real.

$$R^i : \text{Si } x_1 \textit{ está } M_1^i \text{ y } \cdots \text{ y } x_n \textit{ está } M_n^i \text{ Entonces } \frac{d\ x}{dt} = A_i x + B_i u$$



$\therefore$ Modelo Final

$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x)\{A_i x + B_i u\}}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x)}$ donde $w_i(x)$ es el grado en que el i-ésimo modelo está participando.

Truco: modificar el modelo difuso de la Planta

$\dot{x} = A_s \cdot x + \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)((A_i - A_s) \cdot x + B_i \cdot u)}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)}$

Estimador $\dot{\hat{x}} = A_s \cdot \hat{x} + \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)((\hat{A}_i - A_s) \cdot x + \hat{B}_i \cdot u)}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)}$

Para poder medir si funciona bien el estimador $\hat{x}$ del estado x defina

$\varepsilon = x - \hat{x}$ es decir $\dot{\varepsilon} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = A_s \cdot \varepsilon - \frac{\sum w_i \tilde{A}_i}{\sum w_i} x - \frac{\sum w_i \tilde{B}_i}{\sum w_i} u$

donde

$\tilde{A}_i = \hat{A}_i - A_i,\ \tilde{B}_i = \hat{B}_i - B_i$

Ahora bien, lo que se requiere es que $\varepsilon = 0$ es decir que $\tilde{A}_i \to 0, \tilde{B}_i \to 0$ Estimador OK!

Propongamos entonces una función V(x)
$V = \varepsilon^T P \varepsilon + \sum_{i=1}^{l} \text{tr}(\frac{\tilde{A}_i^T P \tilde{A}_i}{r_{1i}}) + \sum_{i=1}^{l} \text{tr}(\frac{\tilde{B}_i^T P \tilde{B}_i}{r_{2i}})$
donde tr es la traza, $r_{1i}, r_{2i} > 0$ son escalares, y $P = P^T$.

Obtenga

$$\dot{V} = \dot{\varepsilon}^T P\varepsilon + \varepsilon^T P\dot{\varepsilon} + \sum_{i=1}^N \mathrm{tr}\left(\frac{\dot{\tilde{A}}_i^T P\tilde{A}_i}{r_{1i}} + \frac{\tilde{A}_i^T P\frac{\dot{\tilde{A}}_i^T P\tilde{A}_i}{r_{1i}}\tilde{A}_i}{r_{1i}}\right) + \sum_{i=1}^N \mathrm{tr}\left(\frac{\dot{\tilde{B}}_i^T P\tilde{B}_i}{r_{2i}} + \frac{\tilde{B}_i^T P\dot{\tilde{B}}_i}{r_{2i}}\right)$$

donde

$$\dot{\varepsilon}^T P\varepsilon + \varepsilon^T P\dot{\varepsilon} =$$
$$\varepsilon^T(A_s^T P + PA_s)\varepsilon - 2\varepsilon^T P\left(\sum w_i\tilde{A}_i / \sum w_i\right)x - 2\varepsilon^T P\left(\sum w_i\tilde{B}_i / \sum w_i\right)u$$

Utilizando las propiedades de la Traza, se tiene:
$\dot{V} = -\varepsilon^T P\varepsilon + 2\mathrm{tr}(\sum \frac{\tilde{A}_i^T PF_i}{r_{1i}} - \frac{w_i \tilde{A}_i^T}{\sum w_i} P\varepsilon x^T + \sum \frac{\tilde{B}_i^T PG_i}{r_{2i}} - \frac{w_i \tilde{B}_i^T}{\sum w_i} P\varepsilon u^T)$
Note que la elección obvia para hacer $\dot{V}$ negativa es

$$\sum \frac{\tilde{A}_i^T PF_i}{r_{1i}} = \frac{w_i \tilde{A}_i^T}{\sum w_i} P\varepsilon x^T, \text{ y } \sum \frac{\tilde{B}_i^T PG_i}{r_{2i}} = \frac{w_i \tilde{B}_i^T}{\sum w_i} P\varepsilon u^T$$

Es decir que

$$\dot{\hat{A}}_i = F_i = r_{1i} \frac{w_i}{\sum w_i} \varepsilon x^T, \text{ y } \dot{\hat{B}}_i = G_i = r_{2i} \frac{w_i}{\sum w_i} \varepsilon u^T$$

Dada una planta representada por

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)\{A_i x + B_i u\}}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)}$$

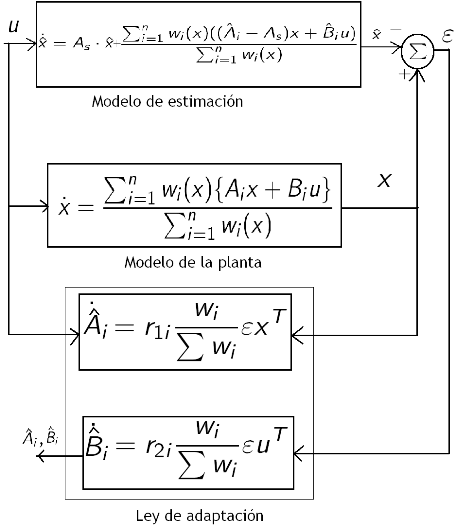
El modelo de estimación

$$\dot{\hat{x}} = A_s \cdot \hat{x} + \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)((\hat{A}_i - A_s)x + \hat{B}_i u)}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)}$$

en conjunto con la ley adaptable

$$\dot{\hat{A}}_i = F_i = r_{1i}\frac{w_i}{\sum w_i}\varepsilon x^T, \text{ y } \dot{\hat{B}}_i = G_i = r_{2i}\frac{w_i}{\sum w_i}\varepsilon u^T$$

garantizan que $|\varepsilon(t)| \longrightarrow 0$ conforme $t \longrightarrow 0$


u
$\dot{\hat{x}} = A_s \cdot \hat{x} + \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)((\hat{A}_i - A_s)x + \hat{B}_i u)}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)}$
$\hat{x}$
$-$
$\sum$
ε
$+$
Modelo de estimación
$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)\{A_i x + B_i u\}}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x)}$
x
Modelo de la planta
$\dot{\hat{A}}_i = r_{1i} \frac{w_i}{\sum w_i} \varepsilon x^T$
$\hat{A}_i, \hat{B}_i$
$\dot{\hat{B}}_i = r_{2i} \frac{w_i}{\sum w_i} \varepsilon u^T$
Ley de adaptación

Sistema SISO No lineal representado por

R^i : Si x_1 *está* M_1^i y $\dot{x}$ *está* M_2^i y $\cdots$ y x^{n-1} *está* M_n^i Entonces

$\dot{x} = A_i x + B_i u \;\; i = 1, 2, \cdots, l$

donde

$x^T = [x^{(n-1)}, x^{(n-2)}, \cdots, \dot{x}, x] = [x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1]$ y la entrada $u \in R^1$ se pueden medir.

Además

$$A_i = \begin{bmatrix} a_n^i & a_{n-1}^i & \cdots & a_2^i & a_1^i \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} b_i \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Las reglas difusas T-S pueden ser inferidas de la sig. forma

$$x^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x)\{a_i^T x + b_i u\}}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x)} = \sum_{i=1}^{l} h_i(x)\{a_i^T x + b_i u\}$$

donde

$$h_i(x) = (w_i(x)/\sum_{i=1}^{r} w_i(x)).$$

Para la planta no lineal representada por el modelo difuso existe un controlador (C.W.Park, H.K.Kang, Y.Yee and M.Park, Proc. I.E.E.C.T. 2002) de la sig. forma:

$$u = \frac{a_d^T \cdot x - \sum_{i=1}^{r} w_i(x) a_i^T \cdot x}{\sum_{i=1}^{r} w_i(x) b_i} = \frac{\sum_{i=1}^{r} w_i(x)(a_d^T - a_i^T) \cdot x}{\sum_{i=1}^{r} w_i(x) b_i}$$

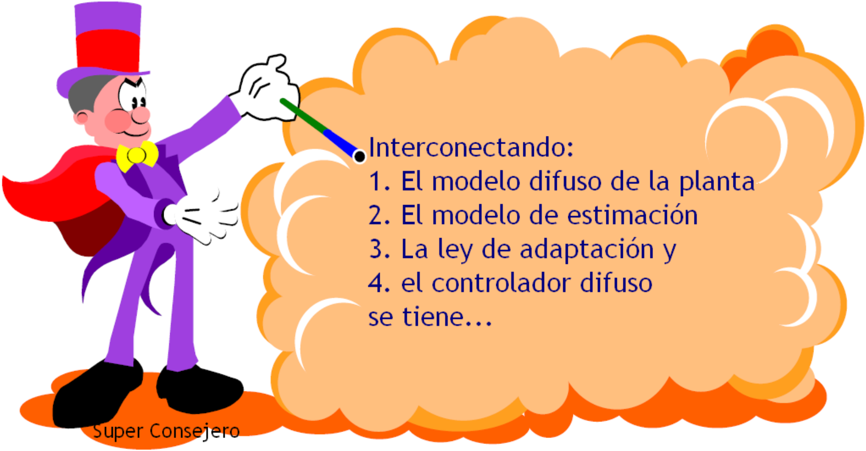
$a_d \in R^n$ es elegida t.q.

$$x^{(n)} = a_d^T \cdot x$$

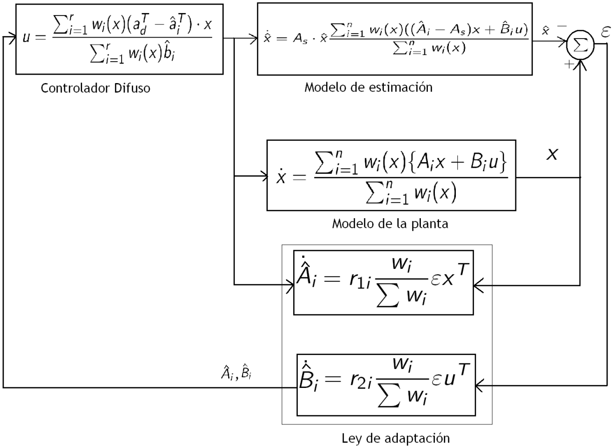
es asintóticamente estable.

Ley de controlador por retro de estado con estimador propuesto

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{r} w_i(x)(a_d^T - \hat{a}_i^T) \cdot x}{\sum_{i=1}^{r} w_i(x)\hat{b}_i}$$


Interconectando:
1. El modelo difuso de la planta
2. El modelo de estimación
3. La ley de adaptación y
4. el controlador difuso
se tiene...
Super Consejero

Estructura de control completa

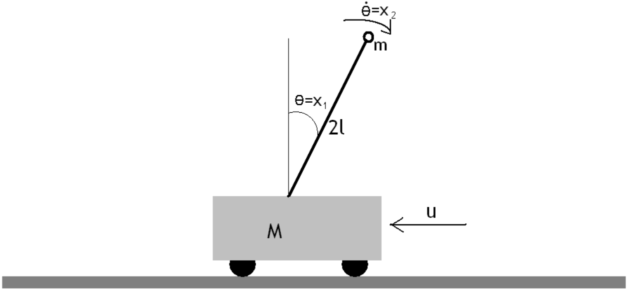


1. Al problema de que los sistemas a controlar están expuestos a perturbaciones, y tienen parámetros que normalmente varían en función de variables del entorno aplicamos un Controlador adaptable

2. El modelo que se propone para una planta integra información lingüística dado que esta expresado como un Modelo difuso

3. La estimación de parámetros del sistema se realiza a través de una ley de adaptación en línea para la utilización en áreas donde se requiere tiempo real.

4. Este conjunto de técnicas (SoftComputing) sintetizan un Sistema de control inteligente adaptable.



$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\frac{gsin(x_1)-amlx_2^2(2x_1)}{2-acos(x_1)u}}{\frac{4l}{3-amlcos^2(x_1)}}$$

Regla 1: Si x *está* cerca de 0 Entonces $\ddot{x} = a_1^T x + b_1 u$,
Regla 2: Si x *está* cerca de $\pm\frac{\pi}{2}$ Entonces $\ddot{x} = a_2^T x + b_2 u$,

SIMULACIÓN IN SITU


... Preguntas? ...