

IDENTIFICAÇÃO DO MODELO NÃO LINEAR DO MOVIMENTO DO COMPLEXO CANELA-PÉ UTILIZANDO O MODELO FUZZY TAKAGI-SUGENO.

ANDERSON R. BIAZETO¹, APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO², EDVALDO ASSUNÇÃO², MARCELO C. M. TEIXEIRA², MARCELO AUGUSTO SANCHES^{2,3}, MARCIO ROBERTO COVACIC¹, MARCOS V. N. JUNQUEIRA², RENAN F. KOZAN², RUBERLEI GAINO¹

1. *Laboratório de Controle Avançado, Robótica e Engenharia Biomédica, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina (UEL), centro de tecnologia e urbanismo.*
Cx. Postal 10.011 | CEP 86.057-970. Rodovia Celso Garcia Cid / PR445 km 380/ Londrina - PR
E-mails: anderson_biazeto@hotmail.com, marciocovacic@uel.br, rgaino@uel.br.
2. *Laboratório de Pesquisa em Controle, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" Campus Ilha Solteira.*
CEP 15.385-000. Avenida Brasil, 56/ Ilha Solteira - SP
E-mails: aac@dee.feis.unesp.br, edvaldo@dee.feis.unesp.br, marcelo@dee.feis.unesp.br, marcosvnj@yahoo.com.br, renankozan@hotmail.com.
3. *UNITOLEDO: Campus Universitário. CEP 16015-560. R. Francisco Braga, 414. Araçatuba – SP.*
E-mails: sanches840@yahoo.com.br

Abstract— In this paper will be presented the results the identification of the movement with nonlinear model of the complex cinnamon-foot, using the Takagi-Sugeno fuzzy model. We identified the angular position of the leg by electrical stimulation. The data set used for identification was obtained in real experiments conducted in healthy people and paraplegic male. A fuzzy identification aims to provide the design equation for the regulator.

Keywords— Non-linear systems identification, Mamdani Fuzzy, Least squares, Biomedical engineering, fuzzy control.

Resumo— Neste trabalho será apresentado os resultados na identificação do modelo não linear do movimento do complexo canela-pé, utilizando o modelo fuzzy Takagi-Sugeno. Foi identificada a posição angular da perna mediante uma estimulação elétrica. O conjunto de dados utilizados para a identificação foi obtido em experimentos reais realizados em pessoas hígidas e paraplégicos do sexo masculino. A identificação fuzzy tem o intuito de fornecer o equacionamento para projeto do regulador.

Palavras-chave— Identificação de sistemas não lineares, fuzzy Mamdani, mínimos quadrados, engenharia biomédica, controle fuzzy.

1 Introdução

A Estimulação Elétrica Funcional tem sido utilizada na restauração de movimentos em pacientes paraplégicos, tetraplégicos e hemiplégicos. Em Teixeira *et al.* (2006), Gaino *et al.* (2007), Gaino (2009), e Gaino *et al.* (2011) e foram realizados, pela primeira vez, estudos e simulações da posição da perna de pacientes paraplégicos, utilizando modelos *fuzzy* Takagi-Sugeno (T-S), definido em Takagi e Sugeno (1985), Tanaka *et al.* (1998) e Teixeira (1999). Neste trabalho foi proposto um algoritmo para a identificação do modelo do movimento do complexo canela-pé, utilizando o modelo fuzzy Takagi-Sugeno, expressando o modelo não linear original em expressões lineares do tipo fuzzy.

No modelo a ser identificado, em Ferrarin e Pedotti (2000), foram relacionados pulsos de estímulo elétrico aplicado ao paciente com posição angular do complexo canela-pé. Os dados de entrada e saída foram obtidos em pesquisas realizadas em pessoas hígidas, por Kozan (2012), e em pacientes paraplégicos, Sanches (2013).

O modelo não linear identificado pode ser aplicado na técnica de controle paralelo distribuído com rastreamento. Esta técnica força a saída do sistema não linear modelado com o sistema T-S para seguir um sinal de referência, Lilly (2010). A referência é o ângulo de posição da perna.

No Brasil, poucos trabalhos exploraram a identificação do modelo do movimento da perna de pacientes paraplégicos utilizando fuzzy Takagi-Sugeno.

2 Modelo Fuzzy

O modelo fuzzy consiste basicamente no fato de traduzir em termos matemáticos informações imprecisas expressas por um conjunto de regras linguísticas. Este conjunto de regras é da forma SE ENTÃO (IF THEN), Zadeh (1965). Estas regras linguísticas são representadas por funções de pertinência. É possível representar um sistema não-linear como uma combinação de determinado números de modelos locais invariantes no tempo, Taniguchi, et al. (2001) e Tanaka *et al.* (1998). O modelo global é uma combinação fuzzy dos modelos locais. As funções de

pertinência podem assumir diferentes formas, tais como triangular, trapezoidal, sinusoidal, gaussiana entre outras.

2.1 Equacionamento fuzzy Mamdani

As regras do modelo fuzzy Mamdani, podem ser representadas da forma:

$$\text{Se } (x_1 \text{ é } \tilde{A}_1^j \text{ E } x_2 \text{ é } \tilde{A}_2^k \text{ E } \dots, x_n \text{ é } \tilde{A}_n^l), \quad (1)$$

Então: $y_q \text{ é } B_q^p$

sendo x_1, x_2, \dots, x_n são as múltiplas entradas o sistema, $\tilde{A}_1^j, \tilde{A}_2^k, \dots, \tilde{A}_n^l$ as variáveis premissas, ou seja, as funções de pertinência, onde $(j, k, \dots, l; p, q)$ são as regras, por fim y_q a saída e B_q^p as regras linguísticas para a saída, Passino e Yurkovich (1998).

A Equação (1) representa todo o conjunto de regras linguísticas, as quais devem ser especificadas por um especialista.

O modelo fuzzy Mamdani necessita de uma “defuzzificação”, ou seja, traduzir o valor linguístico gerado na saída para valores numéricos para a variável se saída.

Utilizando a técnica de “defuzzificação” centro da média, descrito em Passino e Yurkovich (1998) e Passino (2005), onde a saída é calculada utilizando os centros das funções de pertinência de saída, b_i^q , associado ao conjunto fuzzy B_q^i para a i^{th} regra $(j, k, \dots, l; p, q)$, dada por:

$$y_q^f = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^q \sup_{y_q} \{\mu_{B_q^i}(y_q)\}}{\sum_{i=1}^R \sup_{y_q} \{\mu_{B_q^i}(y_q)\}}. \quad (2)$$

Fazendo $\sup_{y_q} \{\mu_{B_q^i}(y_q)\} = \mu_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ podemos definir, para o modelo fuzzy Mamdani a função $f(x|\theta)$ como sendo:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)}. \quad (3)$$

A função de pertinência pode ser calculada como sendo:

$$\mu_i = \prod_{j=1}^n \omega(x), \quad (4)$$

sendo $\omega(x)$ a representação da função de pertinência, neste caso a função gaussiana, dado por:

$$\omega(x) = \exp\left(-0.5 \left(\frac{x_j - c_j^i}{\sigma_j^i}\right)^2\right). \quad (5)$$

Para um universo fuzzy j de entrada e i regras, onde c_j^i representa os centros da função de pertinência,

substituindo as Equações (4) e (5) em (3) tem-se a forma representativa do sistema fuzzy Mamdani.

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \prod_{j=1}^n \exp\left(-0.5 \left(\frac{x_j - c_j^i}{\sigma_j^i}\right)^2\right)}{\sum_{i=1}^R \prod_{j=1}^n \exp\left(-0.5 \left(\frac{x_j - c_j^i}{\sigma_j^i}\right)^2\right)}. \quad (6)$$

2.2 Equacionamento fuzzy Takagi-Sugeno (T-S)

O fuzzy T-S é um caso específico do modelo fuzzy Mamdani. As regras do modelo fuzzy Takagi-Sugeno, podem ser expressas por:

$$\text{Se } (x_1 \text{ é } \tilde{A}_1^j \text{ E } x_2 \text{ é } \tilde{A}_2^k \text{ E } \dots, x_n \text{ é } \tilde{A}_n^l),$$

Então: $b_i = g_i(\cdot)$

sendo segundo Passino e Yurkovich (1998) $g_i(\cdot)$ definida como sendo:

$$g_i(x) = a_{i,0} + a_{i,1}x_1 + \dots + a_{i,n}x_n, \quad (7)$$

onde a_{ij} são números reais. O sistema fuzzy Takagi-Sugeno realiza interpolação não linear entre mapeamento linear. Readequando a Equação (3) para o sistema fuzzy Takagi-Sugeno, tem-se:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R g_i(x) \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)}. \quad (8)$$

Para o sistema não linear, a representação *Fuzzy* Takagi-Sugeno utiliza um conjunto de implicações *Fuzzy*, as quais caracterizam relações locais do espaço de estados.

Cada implicação *Fuzzy* é dada por um modelo de um sistema linear obtendo um modelo *Fuzzy* global do sistema a partir das combinações *Fuzzy* dos modelos do sistema linear, Taniguchi, et al. (2001) e Tanaka et al. (1998). A representação da planta dinâmica através dos modelos lineares locais é dada por:

$$\dot{x}_i = A_i x(t) + B_i u(t), y(t) = C_i x(t), \quad (9)$$

sendo $i = 1, \dots, R$ representa o número de regras do sistema fuzzy, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ é o vetor de estados com dimensão n , $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$ é o vetor de entrada com dimensão m , $y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_q(t)]^T$ é o vetor de saída de dimensão q e as matrizes de estado e entrada, A_i e B_i , respectivamente, ambos de dimensão $n \times m$. $z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t)]^T$ são as entradas do sistema fuzzy. Pode-se adotar $z(t) = [x(t), u(t)]$.

Aplicando a Equação (9) nas regras SE ENTÃO, para a i^{th} regra, a funções de saída são dadas por:

se: (z_1 é $\tilde{A}_1^j E$, z_2 é $\tilde{A}_2^k E$, ..., z_p é \tilde{A}_p^l),

Então: $\dot{x}_i = A_i x(t) + B_i u(t)$.

Aplicando a Equação (9) na Equação (8) tem-se:

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^R (A_i x(t) + B_i u(t)) \mu_i(z(t))}{\sum_{i=1}^R \mu_i(z(t))}. \quad (10)$$

Sendo:

$$\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_R]^T = \frac{1}{\sum_{i=1}^R \mu_i} [\mu_1, \dots, \mu_R]. \quad (11)$$

Aplicando a Equação (11) na (10) obtêm-se:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \left(\sum_{i=1}^R A_i \alpha_i(z(t)) \right) x(t) \\ &\quad + \left(\sum_{i=1}^R B_i \alpha_i(z(t)) \right) u(t) \quad (12) \\ &= A \alpha x(t) + B \alpha u(t) \end{aligned}$$

Considerando um sistema não forçado como tendo o efeito nulo da entrada, $u(t) = 0$, portanto o comportamento do sistema pode ser descrito por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{\left(\sum_{i=1}^R A_i \mu_i(z(t)) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(z(t))} \quad (13) \\ \dot{x}(t) &= \left(\sum_{i=1}^R \alpha_i(z(t)) A_i x(t) \right). \end{aligned}$$

A saída do sistema é dada por:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{\left(\sum_{i=1}^R C_i \mu_i(z(t)) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(z(t))} \quad (14) \\ y(t) &= \left(\sum_{i=1}^R \alpha_i(z(t)) C_i x(t) \right). \end{aligned}$$

3 Modelo para identificação do movimento da perna do paciente

3.1 Modelo da articulação do joelho

O modelo do movimento do paciente paraplégico proposto por Ferrarin e Pedotti (2000), Figura 1, mostra que o movimento é composto pela coxa e o complexo perna-pé do paciente. A estimulação elétrica é realizada no músculo quadríceps, contraindo-o visando um movimento angular do joelho.

As componentes do modelo mecânico da Figura 1, de acordo com Ferrarin e Pedotti (2000) estão descritas a seguir:

- M_a é o torque ativo produzido pela eletroestimulação no quadríceps;
- θ é o ângulo comum do joelho (ângulo entre a perna e a coxa no plano sagital);
- θ_v é o ângulo da perna em relação ao eixo vertical no plano sagital;

- l é a distância do joelho ao centro de massa do complexo canela-pé;
- mg é o peso do sistema canela-pé, ou seja, a massa multiplicada pela ação da gravidade.

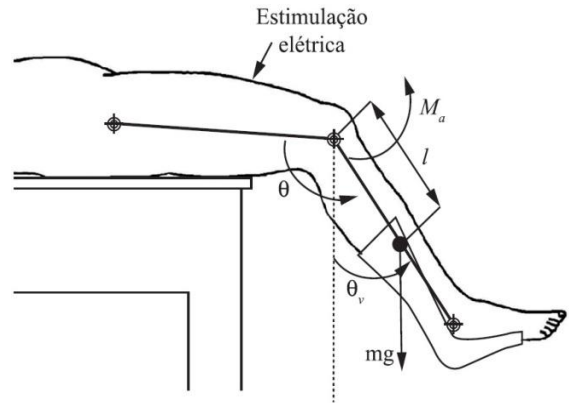


Figura 1. Complexo canela-tornozelo, Ferrarin e Pedotti (2000).

O modelo básico que expressa o movimento do complexo em estudo, segundo Ferrarin e Pedotti (2000) é dado pela equação diferencial ordinária de segunda ordem não linear descrita em (15):

$$\begin{aligned} J \ddot{\theta}_g &= -mglsen(\theta_g) + M_s + B \dot{\theta}_g + M_a, \quad (15) \\ M_s &= -\lambda e^{-E\theta}(\theta - \omega), \end{aligned}$$

sendo:

- J é o momento de inércia do complexo canela-pé;
- $\dot{\theta}_g$ é a velocidade angular comum do joelho;
- $\ddot{\theta}_g$ é a aceleração angular da canela;
- M_s é o torque devido ao componente de rigidez;
- B é o coeficiente de atrito viscoso;
- λ e E são coeficientes do termo exponencial;
- ω é o ângulo elástico de repouso do joelho.

Segundo Ferrarin e Pedotti (2000) o torque ativo produzido pela eletroestimulação é proporcional à largura de pulso do sinal da estimulação elétrica, sendo representados pela função de transferência na Equação 16:

$$H(s) = \frac{M_a(s)}{P(s)} = \frac{G}{1 + s\tau}, \quad (16)$$

sendo os valores de τ e G apresentados em Ferrarin e Pedotti (2000).

Para a simulação foram adotadas algumas medidas antropométricas em Ferrarin e Pedotti (2000), apresentadas na Tabela 1.

3.2 Modelo para identificação fuzzy Mamdani

Expandindo a Equação (3) tem-se

$$f(x|\tilde{\theta}) = \frac{b_1\mu_1(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)} + \frac{b_2\mu_2(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)} + \dots + \frac{b_R\mu_R(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)}.$$

Definindo $\xi(x)$ como sendo

$$\xi(x) = \frac{\mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)}. \quad (17)$$

Substituindo a Equação (17) na Equação (3) tem-se:

$$f(x|\tilde{\theta}) = b_1\xi_1(x) + b_2\xi_2(x) + \dots + b_R\xi_R(x), \quad (18)$$

e definindo os vetores $\tilde{\theta}$ e $\xi(x)$ como sendo:

$$\tilde{\theta} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_R]', \quad (19)$$

$$\xi(x) = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_R]. \quad (20)$$

Substituindo as Equações (19) e (20) na Equação (18), tem-se:

$$f(x|\tilde{\theta}) = \tilde{\theta}^T \xi(x). \quad (21)$$

A Equação (21) representa o sistema fuzzy Mamdani.

Tabela 1. Informações dos voluntários da pesquisa.

Parâmetros	Valores
τ	0,951s
B	0,27 N.m. $\frac{s}{rad}$
ω	2,918 rad
λ	41,208 N. $\frac{m}{rad}$
E	2,024 rad $^{-1}$
J	0,362 kg.m 2
m	4,37 kg
l	23,8cm

Utilizando o estimador de mínimos quadrados, o vetor θ será estimado de tal forma a minimizar o erro entre saída original e estimada, de tal forma que:

$$\tilde{\theta} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T Y, \quad (22)$$

sendo $\varphi = \xi(x)^T$, $(\varphi^T \varphi)^{-1}$ uma matriz pseudoinversa e Y a matriz de dados de saída.

O conjunto de pares de dados de entrada e saída do sistema pode ser representado por (x^i, y^i) , onde $x^i \in X, y^i \in Y$.

Os dados de entrada e saída formam um conjunto MISO (Multiple Input and Single Output) sendo a entrada dada por um vetor de dados de tensão e outro de tempo, formando $x = [x_1^1 \ x_2^1 \ x_3^1 \ \dots \ x_n^1, \ x_1^2 \ x_2^2 \ x_3^2 \ \dots \ x_n^2]^T$.

Foi identificada a posição angular (θ_θ) da perna no paciente em função do estímulo elétrico de entrada. A entrada do sistema MISO será da forma:

$$X = [\vartheta \ t]^T,$$

sendo $\vartheta = [\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_M]$ e $t = [t_1, t_2, \dots, t_M]$ são os vetores de entrada de estímulo elétrico e tempo respectivamente. A taxa de amostragem foi de 20kHz, com $M = 101610$.

Já a saída singular é a posição angular da perna do paciente dado pela Equação (23):

$$Y = \theta_\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T. \quad (23)$$

Foram utilizadas 8 regras para a identificação, gerando assim a matriz de centros da função de pertinência:

$$c_j^i = [c_1^1 \ c_1^2 \ \dots \ c_1^8, \ c_2^1 \ c_2^2 \ \dots \ c_2^8]. \quad (24)$$

3.3 Modelo para identificação fuzzy Takagi-Sugeno

Expandido a Equação (8) obtêm-se:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R a_{i,0} \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)} + \frac{\sum_{i=1}^R a_{i,1} x_1 \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^R a_{i,n} x_n \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)}. \quad (25)$$

Redefinindo os vetores θ e $\alpha(x)$ como sendo:

$$\tilde{\theta} = [a_{1,0}, a_{2,0}, \dots, a_{R,0}, a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{R,1}, \dots, a_{1,n}, a_{2,n}, \dots, a_{R,n}]', \quad (26)$$

$$\alpha(x) = [\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_R(x), x_1 \alpha_1(x), x_1 \alpha_2(x), \dots, x_1 \alpha_R(x), \dots, x_n \alpha_1(x), x_n \alpha_2(x), \dots, x_n \alpha_R(x)]'. \quad (27)$$

Substituindo as Equações (26) e (27) na Equação (25) tem-se:

$$f(x|\tilde{\theta}) = \tilde{\theta}^T \alpha(x). \quad (28)$$

Portanto o método de mínimos quadrados é aplicado no modelo fuzzy Takagi-Sugeno da mesma maneira do aplicado no fuzzy Mamdani.

O conjunto de dados de entrada e saída é o mesmo utilizado no modelo fuzzy Mamdani.

Foram utilizadas 13 regras para a identificação, gerando assim a matriz de centros da função de pertinência:

$$c_j^i = [c_1^1 \ c_1^2 \ \dots \ c_1^{13}, \quad c_2^1 \ c_2^2 \ \dots \ c_2^{13}].$$

A identificação foi feita em ambiente MATLAB[®], sendo a entrada do sistema $z = \mathbf{X} = [\boldsymbol{\theta} \ \mathbf{t}]^T$ e a saída $\mathbf{Y} = \boldsymbol{\theta}_g = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T$ a Equação (28) assume:

$$\boldsymbol{\theta}_g = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T$$

$$= \begin{bmatrix} a_{1,0} \\ \vdots \\ a_{13,0} \\ a_{1,1} \\ \vdots \\ a_{13,1} \\ a_{1,2} \\ \vdots \\ a_{13,2} \\ \vdots \\ x_1 \alpha_{13}(x), x_2 \alpha_1(x), x_2 \alpha_2(x), \dots, x_2 \alpha_{13}(x) \end{bmatrix} [\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_{13}(x), x_1 \alpha_1(x), x_1 \alpha_2(x), \dots, x_1 \alpha_{13}(x), x_2 \alpha_1(x), x_2 \alpha_2(x), \dots, x_2 \alpha_{13}(x)].$$

4 Resultados

A identificação foi feita em ambiente MATLAB[®], utilizando informações de entrada e saída obtidas em pesquisas realizadas em pessoas hígdas e pacientes paraplégicos, com autorização do comitê de ética e submetida ao sistema Plataforma Brasil, sob o número CAAE 00977212.1.10015402, Kozan (2012), Sanches (2013)

A Tabela 2 apresenta as características dos indivíduos hígdos envolvidos na pesquisa.

Tabela 2. Informações dos voluntários da pesquisa.

Voluntário	Sexo	Idade (anos)	Massa Corporal (kg)	Altura (m)	Prática de atividade Física
1	M	27	78	1,78	Todos os dias
2	M	21	76	1,74	Sedentário
3	M	33	65	1,75	2 vezes por dia

Fonte: Kozan, (2012)

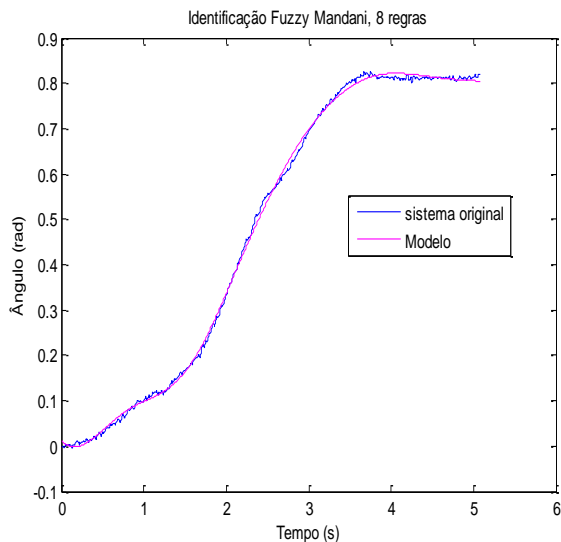


Figura 2. Identificação fuzzy Mamdani com 8 regras.

Os resultados obtidos fazendo a identificação do modelo do movimento da perna do paciente hígdio com os dados gerados pela pesquisa de Kozan (2012), Sanches (2013), para um ângulo de 45° (0,78 rad) e taxa de amostragem de 20 kHz, estão dispostos nas Figuras 2 e 3.

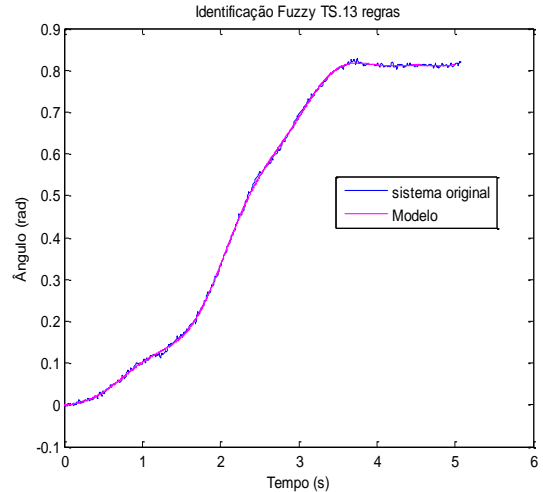


Figura 3. Identificação fuzzy Takagi-Sugeno com 13 regras.

A identificação do modelo utilizando fuzzy Takagi-Sugeno, Figura 3, obteve melhor resposta quando comparado com o modelo fuzzy Mamdani, Figura 2. Na identificação fuzzy Takagi-Sugeno foram utilizadas 13 regras para que a melhor resposta. Já na identificação utilizando o modelo fuzzy Mamdani, oito regras foram suficientes para a identificação.

Comparando os erros de identificação dos dois métodos, Figuras 4 e 5, pode-se observar que a identificação fuzzy Takagi-Sugeno obteve um menor erro, haja vista a informação da média quadrática do erro para ambos os casos. No caso, para a identificação fuzzy Takagi-Sugeno a média quadrática do erro calculado foi de 0,0042556. Já na identificação fuzzy Mamdani a média quadrática do erro calculada foi de 0,0084535.

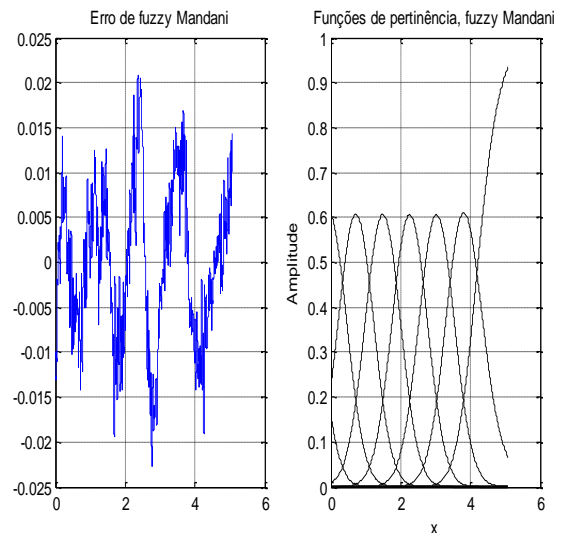


Figura 4. Erro de estimação e funções de pertinência na identificação fuzzy Mamdani com 8 regras.

5 Conclusão

Com a identificação do modelo não linear do movimento do complexo canela-pé utilizando fuzzy Takagi-Sugeno pretende-se utilizá-lo para projetar um controlador paralelo distribuído com rastreamento, para o movimento do membro inferior.

Dos métodos utilizados para a identificação, o fuzzy Takagi-Sugeno obteve um resultado interessante, haja vista a não linearidade e alta complexidade do movimento em questão. Se comparado com a identificação feita pelo método fuzzy Mamdani, a modelo fuzzy Takagi-Sugeno obteve maior fidelidade na identificação. O número de regras utilizadas foi diferente, pois dependeram das características dos métodos. A identificação foi realizada com vetores de dados de comprimento igual a 101610 elementos, para taxa de amostragem de 20 kHz.

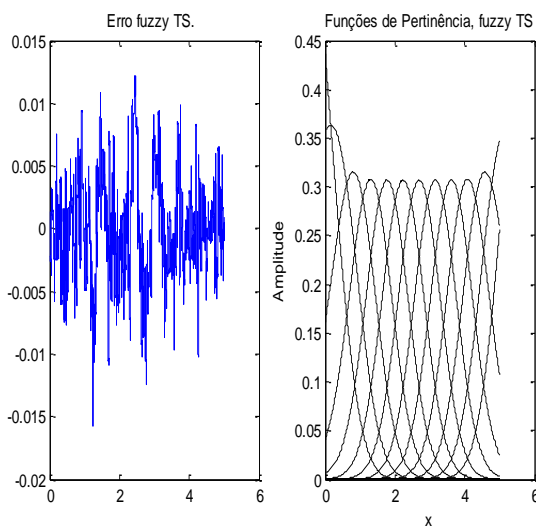


Figura 5. Erro de estimação e funções de pertinência na identificação fuzzy Takagi-Sugeno com 13 regras.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES, do CNPq e da Fundação Araucária. Agradecemos aos colaboradores da UNESP – Campus Ilha Solteira e do laboratório de controle da UEL.

Referências Bibliográficas

Covacic, M.; Assunção, E.; TEIXEIRA, M. C. M.; Carim, R.; Carvalho, A. A.; Gaino, R. Sistemas ERP com compensadores dinâmicos para controle da posição angular da perna de pacientes paraplégicos. Congresso brasileiro de automática, 2010, Bonito. Anais... Bonito: SBA, 2010. p. 1700-1707.

Ferrarin, M.; pedotti, A. The relationship between electrical stimulus and joint torque: a dynamic model. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, San Diego, v. 8, n. 3, p. 342–352, 2000.

Gaino, R.; Teixeira, M. C. M.; Carvalho, A. A.; Assunção, E.; Silva, T. I. Reguladores e observadores fuzzy takagi-sugeno para variar o ângulo da articulação do joelho de um paciente paraplégico. In: simposio brasileiro de automação inteligente, 8, 2007, Florianópolis. Anais... Florianópolis: SBA, 2007.

Gaino, Ruberlei. Controle de Movimentos de Pacientes paraplégicos utilizando modelos Fuzzy Takagi-Sugeno. Tese de doutorado. UNESP, 2009.

Gaino R.; Teixeira M. C. M.; Carvalho A. A. ; Assunção, E.; Rodrigo C.; SANCHES M. A. A.; Covacic M. Realimentação derivativa e modelo Fuzzy Takagi-Sugeno para controle da articulação do joelho de pacientes paraplégicos com o uso de acelerômetros. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, Rio de Janeiro, v. 27, p. 67-78, 2011.

Kozan, Renam F. Controle da posição da perna de pessoas hígidas utilizando um controlador PID. Tese de mestrado. UNESP, 2012.

Lilly, Jhon H., Fuzzy Control and Identification. 1º ed. New Jersey: Editora Jonh Wiley & Sons, 2010.

Passino, Kevin M; Yurkovich, Stephen. FUZZY CONTROL. 1ª ed. Menlo Park, CA. Editora Prentice-Hall, 1998.

Passino, Kevin M. Biomimicry for optimization, control and automation. 1ª ed. Berlim. Editora Springer, 2005.

Sanches, Marcelo A. A. Sistema eletrônico para geração e avaliação de movimentos em paraplégicos. Tese de doutorado. UNESP, 2013.

Tanaka, K.; Ikeda, T.; Wang, O. H. Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, New York, v. 6, n. 2, p. 250–265, 1998.

Taniguchi, T.; Tanaka, K.; Ohatake, H.; Wang, H. O. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of takagi-sugeno fuzzy systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, New York, v. 9, n. 4, p. 525-537, 2001.

Takagi, T.; Sugeno, M. Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control. IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics, New York, v. 15, p. 116–132, 1985.

Teixeira, M. C. M.; Assunção, E.; Cardim, R.; Covacic, M. R. Realimentação da derivada de estados a partir do projeto com realimentação de estados. In: Congresso brasileiro de automática, CBA, 16, 2006, Salvador. Anais... Salvador: [s.n.], 2006. p. 726–731.

Teixeira, M. C. M.; Zak, S. H. Stabilizing controller design for uncertain non-linear systems using fuzzy models. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, New York, v. 7, n. 2, p. 133–142, 1999.

Zadeh, L.A. Fuzzy Sets. Information and Control, New York, Volume 8, Issue 3, p. 338-353, 1965.