

IDENTIFIKASI DINAMIKA SISTEM MENGGUNAKAN NEUROFUZZY

Dewanto R. A., Asep S., Aradea

Jurusan Teknik Informatika STMIK-DCI Tasikmalaya

E-mail: dewanto_ra@stmik-dci.ac.id, URL: <http://www.stmik-dci.ac.id>

Abstrak

Salah satu cara untuk dapat melakukan analisis atau pengendalian terhadap sebuah sistem adalah dengan mengetahui dinamika sistem. Salah satu wujud dinamika sistem adalah model matematis, dengan model ini dapat diturunkan perilaku dari sistem. Seiring dengan kerumitan sistem, penurunan model semakin rumit jika dituntut akurasi yang tinggi. Kemampuan pendekatan fungsi dan belajar dari logika fuzzy dan jaringan neural akan digunakan untuk melakukan proses penurunan model matematis yang merupakan dinamika sebuah sistem.

Kata Kunci: Identifikasi, Jaringan neural, Logika fuzzy

PENDAHULUAN

Penurunan dinamika sistem merupakan salah satu perkembangan dalam dunia sistem kendali. Pengetahuan dinamika sistem memberikan manfaat diantaranya adalah dapat menganalisis perilaku sistem dan menentukan kaidah kendali yang akan diterapkan.

Proses identifikasi didefinisikan sebagai proses penentuan model dari sebuah sistem dinamik dari pengukuran input-output. Pengetahuan tentang model adalah sangat penting untuk disain dan implementasi sistem kendali.

Dengan dapat diturunkannya model dinamik dari sebuah proses, maka akan memberikan kemudahan dalam menentukan kaidah kendali yang dipergunakan untuk membawa proses tersebut ke performansi yang dikehendaki.

Beberapa metoda identifikasi telah berkembang. Salah satu teori yang berkembang adalah penggunaan konsep dalam Intelegensia Komputasional. Konsep ini muncul dari kenyataan bahwa permasalahan yang kompleks memerlukan sistem yang cerdas dalam menggabungkan pengetahuan, teknik dan metoda dari berbagai sumber. Sistem cerdas ini diharapkan memiliki kemampuan seperti manusia, beradaptasi dan belajar lebih baik dari perubahan lingkungan dan menjelaskan dasar pengambilan keputusan.

Salah satu konsep yang berkembang adalah neuro-fuzzy (gabungan antara logika fuzzy dengan neural network). Sistem neuro-fuzzy adalah sistem kendali berbasis fuzzy yang menggunakan algoritma belajar yang diturunkan dari teori neural network untuk menentukan parameter-parameter dari fuzzy (set fuzzy dan kaidah fuzzy). Dalam makalah ini akan dibahas penggunaan neurofuzzy untuk melakukan identifikasi terhadap sebuah proses.

NEUROFUZZY

Sistem neuro-fuzzy menggabungkan prinsip belajar dari neural network untuk adaptasi fungsi

keanggotaan dari fuzzy. Prinsip belajar yang digunakan adalah menggunakan backpropagation dengan tiga lapis neural network. Bobot jaringan direpresentasikan sebagai fungsi keanggotaan set fuzzy. Selanjutnya error dari sistem dipropagasikan balik untuk mencari bobot jaringan yang artinya mencari parameter fungsi keanggotaan dari set fuzzy yang optimal.

Penerapan kombinasi antara teori neural network dengan konsep fuzzy pada prinsipnya adalah usaha mengeliminasi kekurangan konsep yang satu dengan kelebihan yang dimiliki konsep yang lain. Dalam hal ini kemampuan adaptasi dan belajar dari neural network dimanfaatkan oleh fuzzy untuk melakukan tuning terhadap parameter fuzzy (kekurangan fuzzy yang tidak memiliki kemampuan belajar).

Struktur neurofuzzy adalah menempatkan parameter fuzzy yaitu:

- Parameter fungsi keanggotaan (center, simpangan dll),
- Jumlah basis kaidah.

ke dalam bobot jaringan neural. Proses belajar neural selanjutnya akan melakukan perubahan terhadap bobot.

PROSES IDENTIFIKASI

Kemampuan identifikasi dari neurofuzzy didasarkan pada dua karakteristiknya yaitu:

- Kemampuan aproksimasi fungsi oleh logika fuzzy,
- Kemampuan proses belajar oleh jaringan neural

Dua kemampuan tersebut memberikan gambaran bahwa neurofuzzy dapat mendekati dinamika sistem dan melakukan proses belajar untuk meminimisasi error aproksimasi.

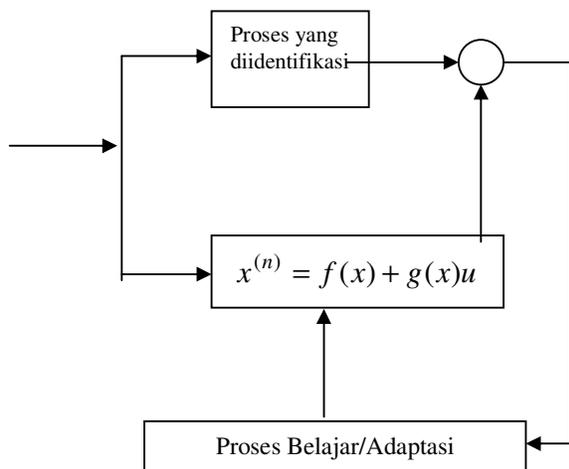
Dalam makalah ini proses identifikasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

Dinamika proses didekati dengan bentuk affine berikut:

$$x^{(n)} = f(x) + g(x)u$$

$f(x)$ dan $g(x)$ tidak diketahui. Neurofuzzy akan melakukan proses identifikasi terhadap fungsi $f(x)$ dan $g(x)$. Dua fungsi tersebut didekati dengan fungsi pemetaan fuzzy. Dalam fungsi pemetaan tersebut terdapat beberapa parameter. Parameter tersebut akan dilakukan perubahan selama proses belajar.

Proses identifikasi dilakukan dengan konfigurasi berikut:



Gambar Konfigurasi Proses Identifikasi

Output proses yang diidentifikasi dibandingkan dengan output hasil identifikasi. Perbandingan tersebut menghasilkan error yang dipergunakan oleh neurofuzzy untuk mengubah parameter fuzzynya. Perubahan parameter fuzzy selanjutnya merubah fungsi $f(x)$ dan $g(x)$. Proses belajar berlangsung terus sampai didapatkan error minimum. Tahapan tersebut diterapkan untuk melakukan identifikasi terhadap sebuah proses/plant.

Secara lebih lengkap proses identifikasi dilakukan dengan proses matematis sebagai berikut:

Perilaku plant/proses dinyatakan oleh persamaan dinamika nonlinier berikut:

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})u$$

$$y = x \quad (1)$$

Dengan $f(x)$ dan $g(x)$ adalah fungsi yang tidak diketahui dan $g(x) \neq 0$. Sistem ini adalah bentuk normal. Selanjutnya dirancang sebuah sinyal kendali $u = u(x|\theta)$ dengan θ adalah parameter yang diubah dengan batasan:

- Sistem closed-loop stabil global dengan batasan:

$x(t)$, $\theta(t)$ dan $u(x|\theta)$ terbatas, $|x(t)| \leq M_x < \infty$,
 $|\theta(t)| \leq M_\theta < \infty$, $|u(x|\theta)| \leq M_u < \infty$ dan $t \geq 0$
 dengan M_x, M_θ dan M_u diberikan.

- Tracking error ($e = y_m - y$) menuju ke nilai nol.

Definisikan persamaan berikut:

$$e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$$

$$k = (k_n, \dots, k_1)^T \in R$$

dengan k adalah koefisien polinomial

$$h(s) = s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n$$

dimana akar-akar persamaan tersebut berada di sebelah kiri sumbu vertikal. Jika fungsi $f(x)$ dan $g(x)$ diketahui maka dapat disusun sinyal kendali sebagai berikut:

$$u = \frac{1}{g(x)} [-f(x) + y_m^{(n)} + k^T e]$$

Substitusi ke persamaan 1 akan diperoleh polinomial dalam e berikut:

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0$$

Dengan kondisi nilai k maka akan diperoleh $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ yang merupakan tujuan kendali. Permasalahan berikutnya adalah bagaimana menentukan harga u . Solusi yang diusulkan adalah sebagai berikut:

Pertama-tama fungsi f dan g untuk plant di atas diganti dengan fungsi Neurofuzzy berikut:

$$\hat{f}(x) = f(x|\theta_f) \quad \hat{g}(x) = g(x|\theta_g)$$

Sehingga kendali dapat dituliskan sebagai:

$$u_1 = \frac{1}{\hat{g}(x)} [-\hat{f}(x) + y_m^{(n)} + k^T e] \quad (2)$$

Fungsi neurofuzzy diturunkan dari kaidah dan set fuzzy yang digunakan yaitu fungsi pemetaan antara input output logika fuzzy. Fungsi ini ditentukan dari fungsi keanggotaan dari fuzzifier, inference engine dan defuzzifier yang digunakan.

Selanjutnya diturunkan algoritma kendali dari sistem neurofuzzy. Substitusi u ke persamaan dinamika sistem

$$x^{(n)} = f(x) + g(x)u$$

menghasilkan persamaan error sebagai berikut:

$$e^{(n)} = -k^T e + [\hat{f}(x) - f(x)] + [\hat{g}(x) - g(x)]u_1 \quad (3)$$

Definisikan matrik dan vektor sebagai berikut:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \cdot & -k_1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Maka persamaan 3 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{e} = \Lambda e + \mathbf{b} \{ [\hat{f}(x) - f(x)] + [\hat{g}(x) - g(x)] \mathbf{u}_1 \} \quad (5)$$

Didefinisikan parameter fuzzy θ^* sebagai parameter optimal yaitu kondisi pada saat f dan g mendekati nilai yang sebenarnya. Sehingga dapat dituliskan:

$$\hat{f}^* = \hat{f}(\theta^*) \quad \hat{g}^* = \hat{g}(\theta^*)$$

Definisikan kesalahan pendekatan

$$\mathbf{w} = [\hat{f}^*(x) - f(x)] + [\hat{g}^*(x) - g(x)] \mathbf{u}_1 \quad (6)$$

Dengan deret Taylor dapat diturunkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \hat{f}(x) - \hat{f}^*(x) &= \theta_f - \theta_f^* \left[\frac{\partial \hat{f}}{\partial \theta_f} \right] + \text{h.o.t} \\ \hat{g}(x) - \hat{g}^*(x) &= \theta_g - \theta_g^* \left[\frac{\partial \hat{g}}{\partial \theta_g} \right] + \text{h.o.t} \quad (7) \end{aligned}$$

dimana h.o.t adalah suku-suku berorde tinggi.

Persamaan error dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{e} = \Lambda e + \mathbf{b} \left\{ (\theta_f - \theta_f^*)^T \left[\frac{\partial \hat{f}}{\partial \theta_f} \right] + (\theta_g - \theta_g^*)^T \left[\frac{\partial \hat{g}}{\partial \theta_g} \right] \mathbf{u}_1 + v \right\} \quad (8)$$

dengan $v = w + \text{h.o.t}$

Proses berikutnya adalah menentukan proses belajar sehingga didapat tracking error e dan parameter error $\theta - \theta^*$ minimum. Formulasikan fungsi Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\gamma_1} (\theta_f - \theta_f^*)^T (\theta_f - \theta_f^*) + \frac{1}{2\gamma_2} (\theta_g - \theta_g^*)^T (\theta_g - \theta_g^*) \quad (9)$$

dimana γ_1 dan γ_2 adalah konstanta positif. Selanjutnya asumsikan terdapat matrik P dan Q definit positif yang memenuhi persamaan Lyapunov.

$$\Lambda^T P + P \Lambda = -Q$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P \mathbf{b} w + \frac{1}{\gamma_1} (\theta_f - \theta_f^*)^T (\dot{\theta}_f + \gamma_1 e^T P \mathbf{b} \left[\frac{\partial \hat{f}}{\partial \theta_f} \right]) \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (\theta_g - \theta_g^*)^T (\dot{\theta}_g + \gamma_2 e^T P \mathbf{b} \left[\frac{\partial \hat{g}}{\partial \theta_g} \right] \mathbf{u}_1) \quad (10) \end{aligned}$$

Minimisasi e dan $\theta - \theta^*$ dapat dilakukan dengan meminimisasi V dan $dV/dt < 0$ yaitu dengan cara membuat algoritma proses belajar (adaptasi bobot) sedemikian sehingga nilai V minimum dan $dV/dt < 0$. Dalam kasus proses belajar jaringan neural diterapkan pada neurofuzzy, maka persamaan umum berikut dapat digunakan:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \eta \mathbf{h}(\mathbf{w}(n), \mathbf{x}(n))$$

Dengan h adalah sebuah fungsi yang ditentukan oleh struktur jaringan neural yang

$$\dot{\theta}_f = -\gamma_1 e^T P \mathbf{b} \left[\frac{\partial \hat{f}}{\partial \theta_f} \right]$$

digunakan. Dengan mengatur h dapat diperoleh fungsi Lyapunov dan turunannya sesuai dengan yang diharapkan (V minimum dan $dV/dt < 0$). Dari uraian tersebut dapat diperoleh sistem kendali yang terdiri dari sinyal kendali $u(x|\theta)$ dan perubahan parameter. Dengan proses belajar tersebut maka akan diperoleh proses identifikasi dengan cara membuat error minimal (atau memenuhi batasan toleransi kesalahan yang ditentukan).

SIMULASI PROSES IDENTIFIKASI

Simulasi dilakukan untuk menguji kualitas identifikasi oleh neurofuzzy. Simulasi dilakukan untuk mengetahui dinamika inverted pendulum. Simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab. Plant ini adalah sebuah batang (dengan panjang dan berat tertentu) dipasang di atas sebuah kotak yang dapat bergerak horisontal. Batang dipasang tegak dan dapat bergerak bebas. Tujuan kendali adalah membuat batang tetap berdiri tegak dengan cara menggerakkan kotak secara horisontal. Simulasi dilakukan dengan membuat inverted pendulum mengikuti jejak yang dikehendaki. Selama proses tersebut dilakukan identifikasi terhadap fungsi $f(x)$ dan $g(x)$ sampai diperoleh error minimum.

Dalam pengujian dilakukan proses sebagai berikut:

- Perancangan Sistem Identifikasi Neurofuzzy
Sistem Identifikasi menggunakan persamaan dinamika bentuk affine berikut:

$f(x)$ dan $g(x)$ didefinisikan sebagai fungsi pemetaan

$$\mathbf{x}^{(n)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u}$$

fuzzy. Fungsi pemetaan diturunkan berdasarkan

konfigurasi fuzzy yang dipakai. Untuk konfigurasi berikut:

- Fungsi Keanggotaan: fungsi gaussian (gaussian function)
- Inferensi: operasi product
- Defuzzifikasi: weighted average (WA)

Diperoleh fungsi:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}^i \left[\prod_{j=1}^n \exp\left(-\frac{(x_j - \bar{x}_j^i)^2}{(\sigma_j^i)^2}\right) \right]}{\sum_{i=1}^M \left[\prod_{j=1}^n \exp\left(-\frac{(x_j - \bar{x}_j^i)^2}{(\sigma_j^i)^2}\right) \right]}$$

dengan σ, x^1 dan y^1 adalah parameter fuzzy (deviasi, center dari fungsi keanggotaan fuzzifier dan center dari fungsi keanggotaan defuzzifier). $g(x)$ mempunyai bentuk atau formula yang sama dengan $f(x)$.

Proses belajar atau fungsi adaptasi diturunkan sesuai dengan struktur jaringan neural yang dipakai. Salah satu konfigurasi neurofuzzy memiliki fungsi adaptasi berikut:

dengan θ adalah vektor yang berisi tiga parameter fuzzy di atas. Proses adaptasi/belajar dilakukan sampai diperoleh fungsi $f(x)$ dan $g(x)$ hasil aproksimasi memiliki selisih (error) yang kecil dengan fungsi sebenarnya. Kondisi ini diperoleh dengan melihat error dari respon keluarannya.

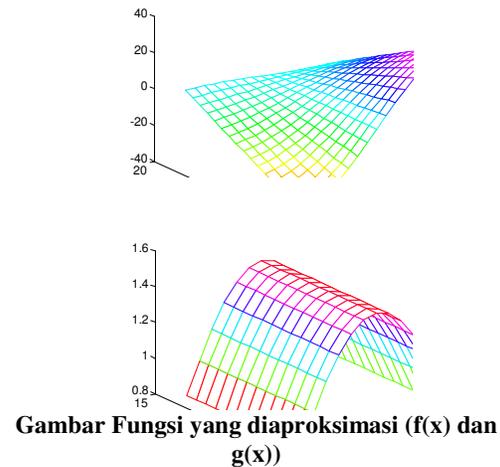
b. Proses Simulasi

Simulasi dengan menggunakan inverted pendulum yang memiliki persamaan dinamik berikut:

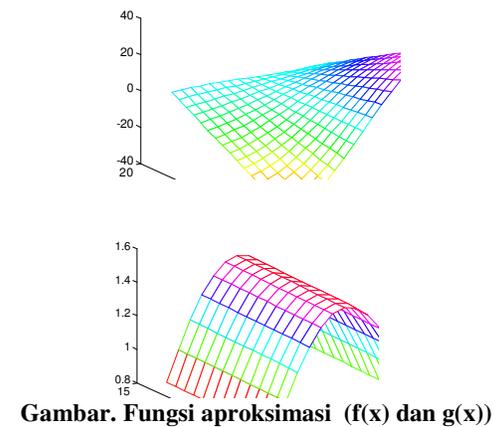
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - (m l^2 \cos x_1 \sin x_1) / (m_c + m)}{l(4/3 - m \cos^2 x_1 / (m_c + m))} + \frac{\cos x_1 / (m_c + m)}{l(4/3 - m \cos^2 x_1 / (m_c + m))} u \end{aligned}$$

Dari persamaan dinamik tersebut diketahui $f(x)$ dan $g(x)$ sebenarnya. Kemudian pengujian identifikasi dilakukan dengan menjalankan blok diagram di atas. Proses yang terjadi adalah sebuah proses belajar/adaptasi yang melakukan perubahan - perubahan harga σ, x^1 dan y^1 sampai didapat error aproksimasi (Error aproksimasi adalah $e_f = f(x) - f(x)$ dan $e_g = g(x) - g(x)$) minimum.

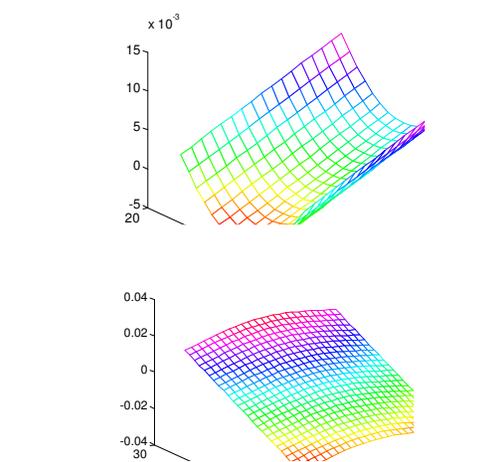
Hasil simulasi yang didapatkan setelah 5000 proses iterasi adalah sebagai berikut:



Gambar Fungsi yang diaproksimasi (f(x) dan g(x))



Gambar. Fungsi aproksimasi (f(x) dan g(x))



Gambar. Error Aproksimasi (e_f dan e_g)

Keenam gambar tersebut merupakan hasil dari aproksimasi fungsi dinamik proses/plant oleh neurofuzzy. Sumbu x dan y menyatakan state plant (dalam hal ini state dari inverted pendulum). Sumbu x adalah sudut (dalam satuan radian) dan

sumbu y adalah kecepatan sudut (dalam satuan radian /detik).

Hasil pendekatan fungsi diperoleh keberhasilan neurofuzzy dalam mendekati dinamika plant. Hal ini dibuktikan dari error yang dihasilkan adalah kecil. Penurunan selanjutnya dapat diperoleh fungsi matematis $f(x)$ dan $g(x)$ hasil aproksimasi. Hasil aproksimasi dengan neurofuzzy menunjukkan nilai error aproksimasi yang kecil sehingga neurofuzzy dapat berperan untuk melakukan identifikasi terhadap plant/proses.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Isidori, *Non Linear Control System*, Springer Velg, 1989.
- [2] C Fan Ling, *Advanced Control System*, Prentice Hall, 1996.
- [3] D Nauck dan R Kruse, *Designing Neuro-Fuzzy Systems Through Backpropagation*, Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [4] D. Nauck: *Neuro-Fuzzy Systems: Review and Prospects* Proc. Fifth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'97), Aachen, Sep. 8-11, 1997, pp. 1044-1053.
- [5] D.Nauck/Klawonn/Kruse: *Combining Neural Networks and Fuzzy Controllers*. FLAI'93 in Linz/Austria, 1993.
- [6] D.Nauck/Kruse: *A fuzzy neural network learning fuzzy control rules and membership functions by fuzzy error backpropagation*. IEEE-ICNN in San Francisco, 1993.
- [7] D.Nauck/Kruse: *A neural fuzzy controller learning by fuzzy error propagation*. NAFIPS '92, Puerto Vallarta, Mexico, 1992.
- [8] D.Nauck: *Beyond Neuro-Fuzzy: Perspectives and Directions*. Third European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'95) in Aachen.
- [9] J. Nie dan D.Linkens, *Fuzzy-Neural Control*, Prentice Hall Inc, 1995.
- [10] J.J Slotine dan W. Li, *Applied Non-Linear Control*, Prentice Hall Inc, 1991.
- [11] J.S.R Jang dkk, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall Inc, 1997.
- [12] K Watanabe, *A Fuzzy-Gaussian Neural Network and Its Application to Mobile Robot Control*, IEEE trans. Control System Tech, 1996.
- [13] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall International, 1997.
- [14] Kruse/Nauck: *Learning Methods for Fuzzy Systems*. Third German GI-Workshop "Fuzzy-Neuro-Systeme'95", Darmstadt, Germany, November 15 - 17, 1995.
- [15] L.M Fu, *Neural Network in Computer Intelligence*, McGraw Hill, 1994.
- [16] L.X Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall Inc, 1997.
- [17] L.X Wang, *Adaptive Fuzzy System and Control*, Prentice Hall Inc, 1994.
- [18] S. Haykin, *Neural Network*, Macmillan Publishing Co, 1994.
- [19] T.Ojala, *Neuro-fuzzy System in Control*, Master Thesis, Tampere University, 1995.