

Pemodelan Dan Identifikasi Sistem Nonlinier Dengan Estimasi Parameter Menggunakan Algoritma Genetik (*Genetic Algorithm*)

Ade Elbani

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik,
Universitas Tanjungpura Pontianak
e-mail :adeelbani@yahoo.com

Abstract– Penelitian ini akan menjelaskan suatu perubahan metode sistem identifikasi untuk sistem mechatronik yang mengandung beberapa elemen ketidaklinieran (*nonliier*). Pada penelitian ini, kejenuhan (*saturasi*) terdapat pada *power series* konverter, dan gesekan (*friction*) mekanis terdapat pada komponen-komponen nonlinier. Beberapa diantaranya sulit dideteksi dan atau diidentifikasi secara langsung. Pada metoda yang identifikasi ini akan bisa menentukan struktur elemen linier maupun nonlinier dari sistem secara bersama dengan *Algoritma Genetik*. Pada model polinomial dengan metoda ini, keteramatan variabel input/output menyatakan komponen-komponen linier, dan variabel *power series* dinyatakan sebagai fungsi nonlinier. Algoritma genetik digunakan untuk mengoptimalkan gabungan dari variabel-variabel ini (*linier dan nonlinier*). Tingkat efektivitas dari metode yang diusulkan diuji dengan percobaan menggunakan *2-mass resonant vibration system*.

Keywords– Sistem mechatronik, Friction, Identifikasi, *Algoritma Genetik*, *2-mass resonant vibration*.

1. Pendahuluan

Sistem *Mechatronics* (Mechanic dan elektronik) seperti misalnya Robot industri atau peralatan *NC_Controller*, terdapat berbagai macam ketidaklinieran. Misalnya *friction* (gesekan) pada sistem mekanik dan *tourque saturation* (kejenuhan) pada sistem elektronik, akan sering muncul. Pada umumnya ketidaklinieran akan menurunkan performansi kontrol. Untuk mengatasi problem seperti ini akan sangat efisien jika menerapkan metoda kompensasi dengan menggunakan *kontroller nonlinier*. Dengan menggunakan model identifikasi sistem akan diketahui kesulitan-kesulitan untuk merancang sistem kontrol secara keseluruhan dengan mengurangi kompensator. Perancangan ini membutuhkan identifikasi, yang selanjutnya akan didapat model yang akurat untuk kompensasi nonlinier.

Sistem nonlinier dapat dipisahkan menjadi “bagian element nonlinier” dan “bagian element linier”, yang biasa disebut sebagai *Block Oriented Model*. Salah satu contoh dari block oriented model adalah *Hammerstain Model*, yang mana unsur-unsur dari bagian linier dan nonlinier model diketahui. Sebagai contoh identifikasi sistem nonlinier menggunakan *Hammerstain model*[3], yakni penjelasan skema menggunakan *Neural Network (NN)* untuk bagian statik nonlinier dan metoda ARX

(*auto-regressive eXogeneous*) untuk bagian dinamik linier. Pada kasus ini, sinyal pengajar (*sinyal referensi*) untuk identifikasi nonlinier adalah sangat dibutuhkan. Hal ini disebabkan kesulitan mendeteksi sinyal nonlinier pada sistem mechatronic, yang selalu memberi respon kurang baik, ini merupakan kesulitan yang umumnya dialami pada identifikasi nonlinier.

Dengan asumsi tersebut model yang diusulkan akan digunakan untuk merancang *kontroller/kompensator*, pada penelitian ini akan difokuskan pada sistem identifikasi, dimana karakteristik komponen nonlinier dan struktur dinamik komponen nonlinier tersebut diketahui. Pada penulisan ini, identifikasi suatu sistem yang mana untuk mengidentifikasi element nonlinier dan element liniernya akan dilakukan secara bersama. Untuk menyatakan komponen-komponen nonlinier, fungsi nonlinier, *power series variable* digunakan teorema taylor (untuk linierisasi), dan untuk mendapatkan dinamika linier, digunakan variabel *time delay*. Dengan menggunakan *Algoritma Genetik*[4,5], sub-optimal model matematik yang menyatakan komponen-komponen linier dan nonlinier secara bersama, akan diperoleh pada proses identifikasi ini.

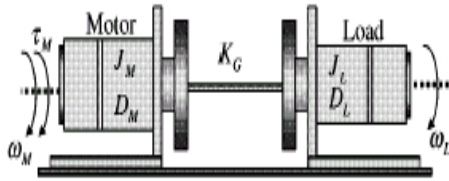
Pada paper ini, keefektivan (*effectiveness*) metoda yang diusulkan akan diuji dengan *2-mass Vibration resonant system* (seperti pada gambar 1) yang merupakan salah satu contoh dari sistem mechatronik. Sebagai komponen-komponen nonlinier sistem *friction* adalah untuk sistem mekanik, dan *tourque saturation* (*torsi saturasi*) untuk sistem elektronik.

2. Metoda identifikasi dengan Algoritma Genetik

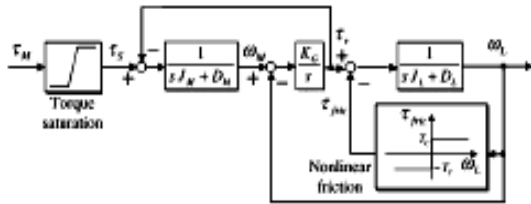
2.1 Target System

Pada gambar 1 ditunjukkan Motor listrik beserta beban (*2-mass resonant vibration system*) yang akan diidentifikasi, gambar 2 adalah blok diagramnya. Keterangan parameter yang akan digunakan gambar 1 adalah:

J_M = Momen inersia motor
 J_L = Momen inersia beban
 D_M = Koefisien *damping* motor
 D_L = Koefisien *damping* beban
 K_G = Konstanta torsional
 ω_M = Kecepatan sudut motor
 ω_L = Kecepatan sudut beban
 τ_M = Input (*tourque motor*)
 τ_S = *Tourque motor nyata*
 τ_{fric} = *Friction tourque*.



Gambar 1: 2-mass resonant vibration system



Gambar 2: Block diagram 2-mass resonant vibration system

2.2 Model Matematik elemen nonlinier

Fungsi transfer diskrit antara τ_s dengan ω_L (terlihat pada gambar 2), ditunjukkan pada persamaan (1) berikut:

$$\frac{\omega_L(z)}{\tau_s(z)} = \frac{c_{n0} + \sum_{i=1}^n c_{ni} z^{-i}}{c_{m0} + \sum_{j=1}^m c_{mj} z^{-j}} \quad (1)$$

Disini c_{xx} : Koefisien

n dan m : Maksimum orde power

Bentuk *polynomial* dari persamaan (1) adalah :

$$\omega_L(k) = f_{linier}(\tau_s(k), \dots, \tau_s(k-n), \omega_L(k-1), \dots, \omega_L(k-m)) \quad (2)$$

Pada gambar 2, torsi saturasi dan gesekan adalah komponen nonlinier. Dengan teorema Taylor, torsi saturasi τ_s ditunjukkan pada persamaan (3) berikut:

$$\tau_s(k) = c_0 + c_1 \tau_M(k) + c_2 \tau_M^2(k) + \dots + c_p \tau_M^p(k) \quad (3)$$

Fungsi nonlinier $f_{fric}(\cdot)$, yang menyatakan gesekan nonlinier (*nonlinier frection*), tergantung pada kecepatan angular beban ω_L , ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\omega_L(k) = f_{linier}(\tau_s(k), \dots, \tau_s(k-n), \omega_L(k-1), \dots, \omega_L(k-m), f_{fric}(\omega_L(k-1)), \dots, f_{fric}(\omega_L(k-m))) \quad (4)$$

Pensubstitusian pers (4) pada (2) memungkinkan untuk menyatakan system dengan elemen nonlinier sebagai *polynomial model matematik*. Dengan demikian, system ini bisa diidentifikasi secara menyeluruh dengan menggunakan input-output data tanpa mengidentifikasi element nonlinier τ_s , $f_{fric}(\cdot)$ secara langsung.

Pada identifikasi system target, hal ini sangat dibutuhkan untuk memilih kombinasi fower series, fungsi nonlinier dan variabel-variabel dengan time delay yang sesuai. Untuk mendapatkan identifikasi model matematik yang memuaskan, maka akan lebih efektif

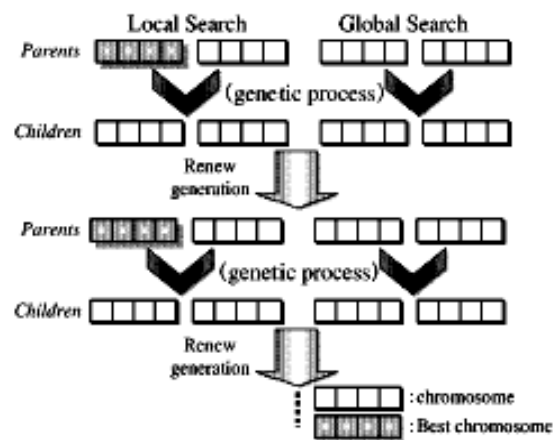
jika menggunakan Algoritma Genetik, dikarenakan hal tersebut dapat melakukan suatu kombinasi problem dengan optimasi.

2.3 Algorithma Genetik

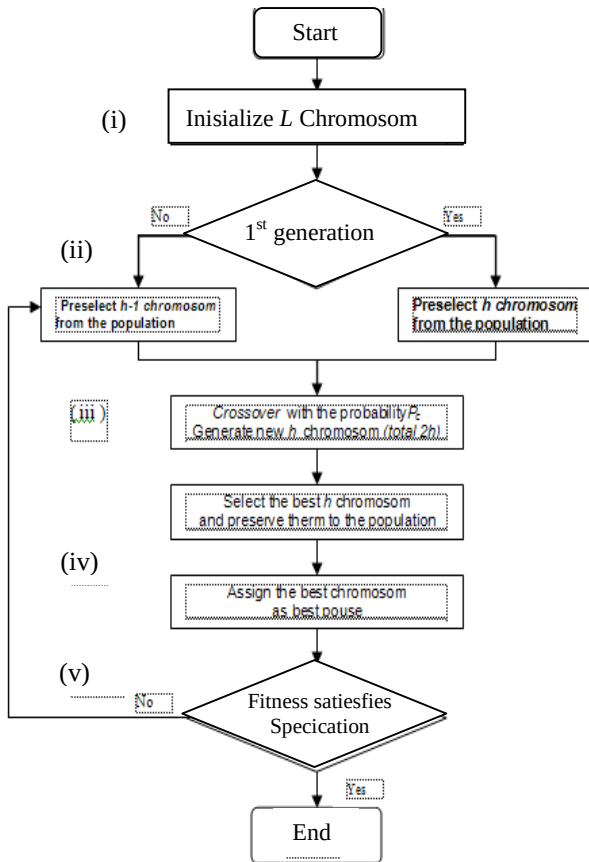
Pada penelitian ini, *sub-optimal model matematik* akan diperoleh dengan menggunakan Algoritma Genetik. Pada proses genetik, proses menjalani *local search* dan *global search* dilakukan secara serentak (bersamaan), berdasarkan pada metoda *preselection*[5]. Gambar 3 adalah outline dari proses genetik yang diusulkan. Untuk *local search*, *chromosome* yang terbaik pada setiap generasi dijadikan sebagai *best spouse* yakni sebagai *crossover*. Ini artinya cara mendapatkan harga chromosom sangatlah efisien dibandingkan menggunakan strategi genetik konvensional.

Prosedure identifikasi dengan Algorithma Genetik adalah sebagai berikut (gambar 4 menunjukkan *flowchart* nya) :

- (i) Inisialisasi $Crhomosom$ L sebagai populasi
- (ii) Pada iterasi pertama, *chromosom* h dipilih secara random, setelah generasi kedua, *chromosom* $(h-1)$ dipilih secara random.
- (iii) *Crossover* *chromosom* h pada setiap pasang dengan kemungkinan probabilitas P_c , dan generasi baru *chromosom* h .
- (iv) Hitung nilai *fitness* untuk semua *chromosom* $2h$ setelah mengkonversi ke model matematik.
- (v) Jika nilai *fitnes* memenuhi spesifikasi, proses identifikasi berakhir, jika tidak kembali ke langkah (ii).



Gambar 3: Outline Proses Genetik



Gambar 4: Aliran Proses Identifikasi menggunakan Algoritma Genetik.

2.4 Perancangan Chromosom

Chromosom yang diusulkan pada metode ini terlihat pada gambar (5). Setiap *locus* dari *chromosom* dinyatakan dengan kode biner ('0' dan '1'), bagian linier dan nonlinier dari variabel input τ_M dan variabel output ω_L adalah ditandai. Untuk besarnya gaya gesekan (*friction*) tergantung pada kecepatan ω_L , tanda fungsi $\text{sign}()$ dari ω_L digunakan untuk menyatakan *friction nonlinear* $f_{\text{fric}}()$ [7]. Pada gambar (5), k adalah bilangan data, n dan m adalah maksimum *time delay* untuk variabel input-output, dan p adalah masimum orde dari *power series*.

Setelah proses genetik dan mengkonversi dari *chromosom* ke model matematik, *fitness* dihitung pada langkah ke iv (lihat gambar 4). Pada proses tersebut, variabel input-output dari bagian linier *locus*nya adalah '1', hal ini sesuai dengan bagian nonlinier yang dikodekan. Pada pengkodean bagian nonlinier, kombinasi orde fower dengan time delay yang kecil sangat diharapkan, dan disatukan dengan semua variabel-variabel sedemikian hingga hasil kombinasinya baik.



Gambar 5: Pengkodean Chromosom

Model matematik $\hat{\omega}_L$ dari hasil pengkodean *chromosom* pada gambar (5), dinyatakan dengan persamaan (5). Pada proses *Algoritma Genetik*, parameter-parameter yang tidak diperlukan akan dihilangkan (*deleted*)

$$\hat{\omega}_L = c_0 + \sum_{i=0}^n c_{\pi} \tau_M(k-i) + \sum_{j=1}^m c_{\omega j} \hat{\omega}_L(k-j) + \sum_{l=2}^p \sum_{i=0}^n c_{li} \tau_M^l(k-i) + \sum_{j=1}^m c_{sj} \text{Sign}(\hat{\omega}_L(k-j)) \quad (5)$$

Coefisient c_{xx} diestimasi dengan metoda *Least Square* yakni menggunakan *more-penrose's pseudo invers matrix* [1]. Penjelasan tentang metoda *Least Square* tidak di bicarakan disini. *Fitness* yang dihasilkan dari model matematik, di validasi dengan metoda *AIC* (*Akaike's Information Criteria*), berikut:

$$AIC = N \log S + 2(l_{prm} + 1),$$

$$S = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\omega_L(k) - \hat{\omega}_L(k)) \quad (6)$$

S adalah integrasi *mean square error* antara output yang sebenarnya ω_L dan $\hat{\omega}_L$ yang di peroleh, $l_{prm} + 1$ merupakan bilangan parameter yang di gunakan pada model, N adalah jumlah data.

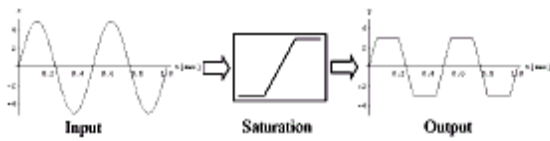
3. Pembuktian Metoda (Metoda Yang Diusulkan)

3.1 Eksperimen Dasar (Preliminary Experiment)

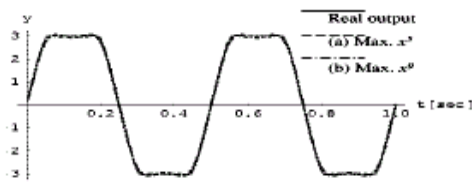
Eksperimen dasar adalah menentukan orde maksimum dari *power series* seperti di perlihatkan pada gambar 6, saturasi adalah sistem yang tidak di ketahui dari input output data yang diidentifikasi. Simulasi hasil identifikasi akan di uji pada kasus 3.2. mendatang. Pada gambar 7; (a) orde maksimum power adalah $5\{x^1, x^2, \dots, x^5\}$, (b) orde maksimum power adalah $10\{x^1, x^2, \dots, x^{10}\}$. Metode identifikasi dan evaluasi sama seperti seksi diatas.

Gambar (7) menunjukkan hasil identifikasi, di peroleh kombinasi *power series*, yang mana; (a) $\{x^1, x^3, x^5\}$ dengan $AIC = -1239,11$ dan (b) $\{x^1, x^3, x^5, x^7, x^9\}$ dengan $AIC = -1696,02$. Dari hasil AIC gambar

(7), jelas identifikasi pada orde 10 adalah yang paling akurat.



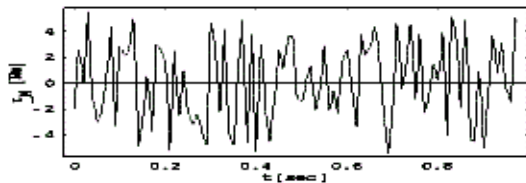
Gambar 6: Elemen Saturasi



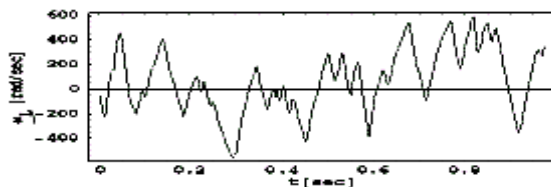
Gambar 7: Hasil preliminary experiment

3.2 Pengujian Metode

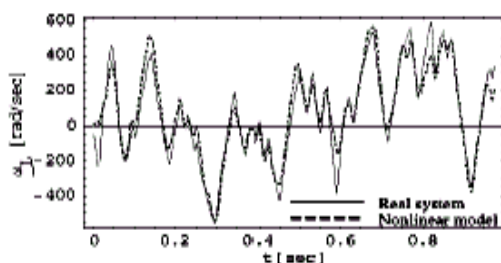
Untuk menguji keefektifan metode ini digunakan 2-mass resonant vibration sistem (seperti pada gambar 1). Parameter nominal ditunjukkan pada tabel 1. Harga nominal torsi saturasi 3,8 Nm. Pada gambar 8 dan 9 menunjukkan input-output data identifikasi. Disini interval sampling 9,5 msec, dan jumlah data 350.



Gambar 8: Input data indentifikasi



Gambar 9: Output data identifikasi



Gambar 10: Hasil identification

Parameter-parameter Algorithma Genetik adalah: probabilitas *crossover* $P_c=0,5$, *populasi* $L=200$, dan *generasi loop* =30. Yang dijalankan pada proses genetik hanya *crossover* bukan *mutasi*. Ini mencegah terjadinya gangguan pada nilai *chromosom* yang telah dijadikan sebagai *spouse*. Seperti yang telah disebutkan pada seksi terdahulu, orde maksimum power P di set pada 9, dan *maximum delay* n dan m diset pada 8.

Gambar 10 menunjukkan data time series yang didapat dari model matematik. Akurasi A_c diperoleh dari model matematik $\hat{\omega}_L(k)$ yaitu pada persamaan (7).

$$A_c = \sum_{k=1}^N \frac{(\omega_L(k) - \hat{\omega}_L(k))^2}{\omega_L^2(k)} \times 100\% \quad (7)$$

Pada kejadian gambar 10, akurasi $A_c=6,527\%$. Tabel 2 menunjukkan kombinasi variabel dan koefisien didalam persamaan (5). Dengan membandingkan orde fungsi transfer *linier* pada gambar (2), maksimum time delay yang ditunjukkan diperoleh harga yang besar.

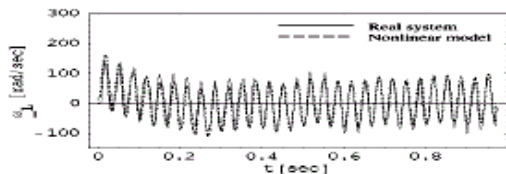
3.3 Kemampuan umum model identifikasi

Untuk pembuktian kemampuan umum dari model yang diidentifikasi, akan dibandingkan hasil (*respon*) dari sistem nyata (*real system*) dan model yang diidentifikasi. Pada gelombang sinus daerah linier, amplitudo maksimum tidak melebihi torsi saturasi, sedangkan daerah sinyal nonlinier, maksimum amplitudo melebihi nominal torsi saturasi, yang mana keduanya akan digunakan sebagai sinyal input. Sebagai input daerah linier, amplitudo maksimum dari sinyal torsi di set pada 1,5 Nm dan frekwensi 30 Hz., sedangkan sebagai input daerah nonlinier, amplitudo maksimum di set pada 6Nm, yang mana melebihi nominal torsi saturasi dan frekwensi yang di set 30 Hz.

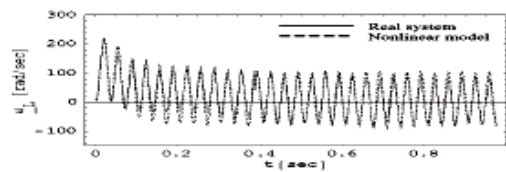
Gambar 11 menunjukkan data *output time series* dari sistem nyata dan model yang diidentifikasi sebagai pengujian pada daerah linier, gambar 12 menunjukkan daerah nonlinier. Akurasi A_c pada gambar 7 adalah 10,155% (linier), dan 9,298% pada gambar 12 (nonlinier). Sesungguhnya A_c menunjukkan harga yang besar yaitu 9 atau 10 %, disini harga-harga dapat di hitung dengan kenyataan yang ada atau dengan praktek, sebab harga tersebut adalah jumlah dari *peak error* data time series.

Selanjutnya *input step* di gunakan untuk kecepatan loop sistem dan di hubungkan pada block diagram yang ditunjukkan pada gambar 2. Ini disebabkan tidak mungkin untuk menjaga penambahan torsi yang konstan pada sistem yang nyata. Dengan memasukkan sinyal step kecepatan dengan amplitudo yang besar ke sistem dan model, torsi saturasi terjadi. Gambar 13 adalah data time series dari sistem nyata dan model yang diidentifikasi dalam daerah linier dimana saturasi torsi tidak terjadi. Gambar 14 adalah dalam daerah nonlinier di mana saturasi torsi terjadi. Akurasi A_c adalah 1,56 % dalam gambar (13) dari daerah linier, dan 1,558 % dalam gambar (14) dari daerah non linier. Walaupun akurasi A_c memeperlihatkan harga yang kecil yaitu 1,5 %, namun output dari model memperlihatkan

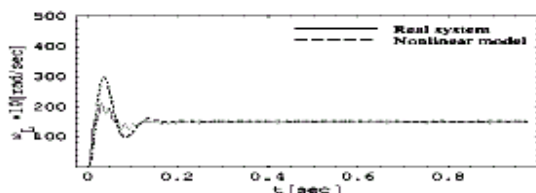
overshot yang lebih besar dari sistem nyata. Hal ini berarti sangat sulit untuk menghasilkan output yang sama dengan model yang diidentifikasi tersebut, karena karakteristik-karakteristik dari gesekan non linier akan selalu berubah, tergantung pada kondisi pengemudian (*driver*), dengan demikian penyempurnaan lebih lanjut dari metode yang diusulkan ini adalah penting.



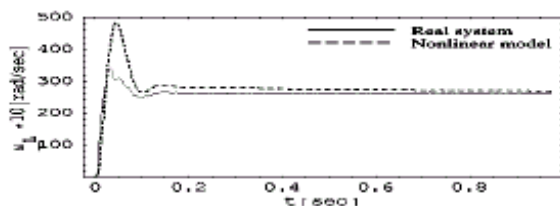
Gambar 11: Output data pada daerah linier



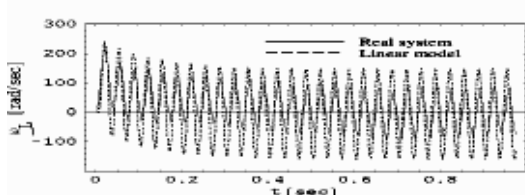
Gambar 12: Output data pada daerah nonlinier



Gambar 13: Output data pada daerah linier



Gambar 14: Output data pada daerah nonlinier



Gambar 15: Output data didalam daerah linier

Table 1: Parameters for 2-mass system

Moment of inertia(Motor)	J_M	9.30×10^{-5}	[kgm ²]
Damping coefficient(Motor)	D_M	4.66×10^{-4}	[kgm ² /s]
Moment inertia(Load)	J_L	8.43×10^{-5}	[kgm ²]
Damping coefficient(Load)	D_L	1.54×10^{-5}	[kgm ² /s]
Torsion constant	K_G	3.08	[Nm/rad]

Table 2: Coefficients of the identified mathematical model

Variable	Coefficient	Variable	Coefficient	Variable	Coefficient
$\tau_M(k-1)$	7.98086	$\tau_M(k-4)$	22.0473	$\tau_M(k-5)$	-12.4481
$\tau_M^2(k-1)$	-0.376538	$\tau_M^2(k-4)$	-0.830044	$\tau_M^2(k-5)$	-0.0390834
$\tau_M^3(k-1)$	-0.376538	$\tau_M^3(k-4)$	-0.830044	$\tau_M^3(k-5)$	-0.0390834
$\tau_M^4(k-1)$	0.3023296	$\tau_M^4(k-4)$	0.30105264	$\tau_M^4(k-5)$	8.1039×10^{-4}
$\hat{\omega}_L(k-1)$	1.16546	$\text{Sign}(\hat{\omega}_L(k-1))$	—	$\tau_M(k-6)$	-0.2246
$\hat{\omega}_L(k-4)$	-0.285292	$\text{Sign}(\hat{\omega}_L(k-4))$	2.82488	$\tau_M^2(k-6)$	0.0303113
$\hat{\omega}_L(k-7)$	0.3784792	$\text{Sign}(\hat{\omega}_L(k-7))$	—	$\tau_M^3(k-6)$	1.78235×10^{-5}

3.4 Membandingkan dengan model linier

Gambar 15 memperlihatkan output data time series model linier yang diidentifikasi dari sistem real, input yang sama dalam kasus gambar 12 di gunakan. Dengan membandingkan pada gambar 12, terlihat bahwa *error* nya besar, ini disebabkan karena tidak memperhatikan unsur-unsur nonlinier (pada gambar 15). Hal ini berarti metoda identifikasi sistem yang diajukan ini akan sangat *efektif* yakni dengan memasukkan unsur-unsur nonlinier nya.

4. Kesimpulan

Pada paper ini digunakan identifikasi sistem dengan menggunakan *algorithm genetika* untuk sistem mechatronics. Metoda yang diajukan efektif untuk sistem yang sulit di deteksi atau diidentifikasi elemen-elemen nonliniernya secara langsung. Untuk menunjukkan elemen-elemen non linier yang tidak teramati, metoda yang diajukan ini memperkenalkan *four-series* dari variabel-variabel dan fungsi-fungsi *nonlinier*, dimana variabel-variabel dari *time delay* di gunakan untuk menunjukkan dinamika-dinamika dari bagian linier. Dalam proses algoritma genetika, *sub-optimal model matematik* yang memperlihatkan sistem secara keseluruhan.

Untuk penelitian selanjutnya (*the future time*), di perlukan penyempurnaan dari beberapa metoda yang telah diajukan ini, misalnya menanggulangi dinamika-dinamika nonlinier yang akan membuat metoda ini lebih baik untuk menerapkan perancangan kontroller/kompensatornya.

Referensi

- [1] Syuichi Adachi, *System Identification Theory* (in Japanese) Corona 1993.
- [2] R. Haber, H. Unbehauen, *Structure Identification of nonlinear Dynamic System – A Survey on Input/output Approaches*, Automatica, Vol. 26, No. 4, pp.651-677 1990.
- [3] Masakatsu Oki, Yasuhide Kobayashi, Tsuyosi Okita, *Identification of a Hammerstein System by Neural Network*, IEEE Japan National Convention Record 1999, No. 614, Vol.3, pp.143 1999 (in Japanese).
- [4] Hiroaki Kitano, *Genetic Algorithm*, Sangyo-Tosyo 1993
- [5] David E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [6] Masatoshi Nakamura, Satoru Goto, Hiroaki, Furono, Nobuhiro Kyura, *A Method for Determining Saturation by Use of a Mathematical Model for Accurate Contour control of Mechatronic Servo System*, Journal of the

Japan Society for Precision Engineering, Vol.65. No.4, 1999 (in Japaness)

- [7] Ichoro Awaya, *Control of Vibration System with Friction*, Journal of The Robotic Society of Japan, Vol.13, No.8, pp.1078-1083
- [8] Giichiro Zuzuki, *Introduction to Statistical Analysis by Information Theory*, Kodansya 1995 (in Japaness)
- [9] Makoto Iwasaki, Hiroto Takei, Tomohiro Shibata, Nobuyuki Matsui, *Consideration to Dynamic Nonlinier Friction Using Neural Network*, IEEE Japan National Convention Records 1999, No.904. Vol.4. pp.279-280 1999 (in Japaness)

Biografi

Ade Elbani, lahir di Sanggau pada tanggal 22 Mei 1963. Menyelesaikan program Strata I (S1) di Universitas Gajah Mada Fakultas MIPA, Jurusan Fisika, pada tahun 1992 dan program Strata II (S2) di Institut Teknologi Bandung (ITB), Magister Teknik Program Instrumentasi dan Kontrol, Fakultas Teknologi Industri selesai pada tahun 2003. Sejak tahun 1995 sampai sekarang mengajar di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Tanjungpura. Penelitian yang diminati saat ini adalah : Sistem Pemodelan dan Kontrol.

