

## Sintesis Dimensi Lengan Robot 2 Link dengan Pendekatan *Robust Design*

**Moch. Syamsul Ma'arif**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya  
Jl. MT Haryono 167 Malang 65145  
E-mail : syamsulm@brawijaya.ac.id

### Abstrak

Sebuah lengan robot selalu dipersyaratkan mempunyai ketelitian posisi yang memadai. Ketelitian posisi sangat dipengaruhi oleh variasi selisih antara posisi ujung lengan sesungguhnya dan posisi ujung lengan nominal. Variasi bisa berasal dari desain dan proses manufaktur. Variasi yang berasal dari desain dapat ditanggulangi dengan membuat desain yang *robust*. Jika variasi-variasi ini diabaikan dalam proses desain maka akan berakibat dihasilkannya desain yang *non robust*. Desain *non robust* akan sangat mahal untuk diproduksi atau bahkan membuatnya gagal pada saat operasi. Oleh karena itu, suatu desain yang *robust* terhadap variasi ini sangat diperlukan. Sedangkan variasi yang berasal dari proses manufaktur ditanggulangi dengan mengurangi variasi pada material dan lingkungan operasi.

Dalam usaha untuk mendapatkan desain yang *robust*, maka metode yang dipakai adalah dengan melakukan dua tahapan yang saling independen dan komplementer yaitu tahap pertama berupa proses penghitungan dimensi mekanisme dengan memakai *robustness index* dan tahapan kedua adalah menghitung toleransi dimensi yang diberikan dengan memakai metode sintesis toleransi yang tidak dilakukan pada penelitian ini. Proses penghitungan dimensi mekanisme diawali dengan penentuan variabel *Robust Design*. Untuk penelitian ini variabel yang dipilih adalah *Design Variable (DV)* yang dinyatakan dalam  $x = [l_1, l_2]^T$ , dan *Performance Function* yang dinyatakan dalam  $f = [e_1^T \ e_i^T \ e_k^T]^T$ . Selanjutnya, memakai syarat batas  $|l_1 - l_2| \leq r$  dan  $l_1 - l_2 \geq R$  yang digabungkan dengan pemakaian *robustness index* 2 ( $RI_2 = \|J\|_2 = \sigma_{\max}$ ) didapatkan keluarga pasangan lengan manipulator  $(l_1, l_2)$  yang memenuhi kriteria *robust*. Pencarian pasangan lengan manipulator optimal dilakukan dengan memakai kriteria *dexterity* dan *dynamic manipulability ellipse*. Setelah  $l_1 = l_{1\text{ opt}}$  dan  $l_2 = l_{2\text{ opt}}$  diketahui maka dihitung torsi lengan manipulator dengan melakukan beberapa penyederhanaan.

Dari penelitian didapatkan kombinasi  $l_1 = 5.61$  dan  $l_2 = 3.97$  untuk kasus 1 dan  $l_1 = 5.85$  dan  $l_2 = 4.16$  untuk kasus 2. Torsi minimal didapat dengan memakai kriteria *dexterity*. Kesimpulan yang bisa diambil adalah penelitian ini menunjukkan bahwa metode *tolerance synthesis* merupakan metode yang efisien dalam mendesain lengan robot yang *robust*.

*Kata kunci:* robustness index, sintesis dimensi.

### PENDAHULUAN

Karakteristik desain sebuah produk yang bermutu sering dinyatakan dalam empat hal pokok yaitu kemampuan memenuhi kebutuhan fungsional, efisiensi dalam menggunakan energi, kehandalan, dan kemampurawatan yang baik (Batson : 2000). Lengan manipulator, sebagai salah satu desain rekayasa juga harus memenuhi keempat kriteria diatas. Karakteristik produk lengan manipulator, seperti produk yang lain, bisa menurun akibat terpengaruh oleh derau (*noise*) dalam operasinya. Derau ini berasal dari berbagai sumber semisal dari desain dan operasi manufaktur. Agar terbebas dari derau, metode *robust design* (metode Taguchi) banyak dipakai sebagai solusi dan terbukti mampu mengatasi gangguan akibat derau tersebut (Taylor : 1996).

Metode *robust design* dilakukan dengan memakai dasar pendekatan *parameter design* dalam usaha untuk mendapatkan rancangan produk dan proses optimal yang tidak sensitif (kebal) terhadap *noise*. Beberapa metode yang umum dipakai adalah metode pendekatan Taguchi, metode pendekatan *Dual Response*, dan metode pendekatan *Tolerance Analysis*. Dalam kasus optimisasi dimensi lengan manipulator *robust* bagi lengan manipulator, pendekatan *tolerance analysis* yang didasarkan atas *surface analysis* dipertimbangkan sebagai metode terbaik (Taylor : 1996). Alasannya adalah karena

metode ini sangat sesuai untuk menyelesaikan persoalan desain *robust* bagi sebuah persoalan (sistem) yang diketahui *performance function*-nya.

Beberapa penelitian, yang berusaha mendapatkan rancangan mekanisme yang *robust* dengan menggunakan metode *tolerance analysis*, mencoba untuk membuat pendekatan yang berbeda. Metode-metode seperti *tolerance analysis methods* untuk sistem nonlinier dengan berbasis pemrograman non linier (Lee : 1993), *direct linierization methods* yang diaplikasikan pada assembly mekanik 2D dan 3D (Chase et al : 1998), *deterministic methods* yang bertujuan mendapatkan dimensi nominal yang optimum (Parkinson : 2000), serta pemakaian *robustness index* (Caro : 2005 dan Zhu : 2001) merupakan contoh dari upaya tersebut. Dari beberapa metode di atas, metode *robustness index* dipandang memberikan kesesuaian kondisi yang lebih tinggi dibanding dengan metode lainnya dalam menyatakan *robustness* sebuah desain mekanis. Disamping itu, kemudahan dalam integrasi kriteria lain yang ditambahkan kemudian juga merupakan keuntungan tersendiri.

Beberapa penelitian di bidang ini sebelumnya, seperti yang diuraikan diatas, kebanyakan memakai kriteria geometri a.l *dexterity workspace* dalam algoritma penentuan dimensi optimal dari lengan manipulator. Selain mempertimbangkan geometri dapat juga ditambahkan kriteria lanjutan, dalam hal ini dipilih torsi motor, untuk mendapatkan dimensi manipulator yang optimal. Pemikiran ini mendasari penelitian ini yang dilakukan dengan tujuan menyintesis dimensi lengan manipulator yang *robust* terhadap *noise* dengan metode *tolerance analysis* dengan pendekatan *robustness index* dengan kriteria tambahan torsi manipulator. Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah ikut andil dalam pengembangan metode *robust design* terutama dalam sintesis dimensi lengan mekanis serta memberi alternatif bagi pengembangan metode perancangan *robust* dengan memperhatikan konsumsi energi manipulator yang optimal yang diwakili oleh torsi manipulator.

## METODOLOGI

### Perumusan Persoalan *Robust Design*

Variabel *robust design* yang akan dianalisis disini adalah :

1. *Design Variabel (DV)*

$$x = [l_1, l_2]^T \quad (1)$$

dengan  $l_1$  = panjang lengan 1.

$l_2$  = panjang lengan 2.

2. *Design Parameter (DP)*

$$p = \emptyset \quad (2)$$

dikarenakan tidak ada parameter desain yang mempengaruhi hasil.

3. *Performance Function*

$$f = [e_1^T, \dots, e_i^T, \dots, e_n^T]^T \quad (3)$$

dengan :  $e_i^T$  = koordinat kartesian *end-effector* E pada *pose* ke  $i$

### Pemilihan *robustness index* yang cocok

Dalam penentuan *robustness index* ini, dipakai dasar *Euclidean norm* matriks **J** karena lebih cocok untuk dipakai (Zhu : 2001) daripada menggunakan *Frobenius norm*. *Robustness index* yang bisa dipakai ada tiga macam yaitu :

- a. *Robustness index 1* (Al-Widyan : 2003 dan Ting : 1996)

$$RI_1 = \|J\|_2 \|J^{-1}\|_2 = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (4)$$

b. *Robustness index 2* (Caro : 2005)

$$RI_2 = \|J\|_2 = \sigma_{\max} \quad (5)$$

c. *Robustness index 3* (Caro : 2005)

$$RI_3 = \|J\|_2 + \|J\|_{Frob} \quad (6)$$

Dalam penelitian ini dipakai  $RI_2$  terutama karena indeks tersebut lebih cocok dipakai dalam kasus desain mekanisme dibanding  $RI_1$  (Caro : 2005).

### Optimisasi dimensi manipulator

Dalam tahap optimisasi dimensi manipulator ini, langkah-langkah berikut ini dilakukan dalam penelitian ini.

a. Persyaratan bagi lengan manipulator

Agar E (*end-effector*) dapat mencapai semua titik di  $S_T$ , maka syarat berikut harus terpenuhi oleh  $l_1$  dan  $l_2$ .

$$\begin{cases} |l_1 - l_2| \leq r \\ l_1 + l_2 \geq R \end{cases} \quad (7)$$

dengan  $r = \min_i d(A, P_i)$ ,  $R = \max_i d(A, P_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  dan  $d(A, P_i)$  merupakan jarak dari *base manipulator* ke  $P_i$ .

b. Memakai *robustness index* untuk mencari dimensi lengan manipulator

Setelah memakai prosedur pada tahap sebelumnya selanjutnya dipakai *robustness index 2* untuk menentukan keluarga dimensi manipulator yang memenuhi syarat *robustness*.  $RI_2$  kemudian dinyatakan dalam :

$$RI_2 = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \cos \theta_{2i} \right|} \quad (8)$$

atau

$$RI_2 = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right|} \quad (9)$$

dan

$$l_1^2 + l_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(A, P_i) \quad (10)$$

sehingga

$$l_1^2 + l_2^2 = C_{rob} \quad (11)$$

c. Pemakaian kriteria tambahan

Agar didapatkan nilai dimensi lengan manipulator optimal  $(l_{1opt} + l_{2opt})$  maka disarankan untuk memakai kriteria tambahan. Kriteria tambahan yang dipakai adalah :

- Dexterity manipulator yang dinyatakan dalam matriks Jacobian berikut ini :

$$J_k = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

- *dynamic manipulability ellipsoid* yang dinyatakan dalam :

$$(\dot{v} + J M_x^{-1} g)^T J^{-T} M^T M J^{-1} (\dot{v} + J M_x^{-1} g) = 1 \quad (13)$$

- Torsi manipulator yang dinyatakan dalam :

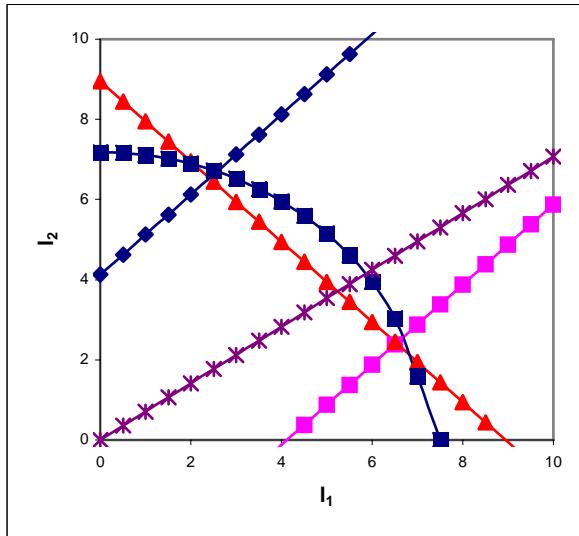
$$\tau = J^T(\theta) (M_x(\theta) \ddot{\chi} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta)) \quad (14)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebuah manipulator dengan dua derajat kebebasan yang terdiri dari dua *revolute joint* mempunyai daerah kerja ( $S_T$ ) yang diwakili oleh titik-titik  $P_1 (1, 4)$ ,  $P_2 (2, 8)$ ,  $P_3 (4, 8)$  dan  $P_4 (5, 4)$ .

### Penentuan Dimensi Manipulator 2R dengan Kriteria *Dexterity*

Dengan memakai  $RI_2$  sebesar 2 dan kriteria *Dexterity* maka *plotting* daerah yang memenuhi syarat dapat dilihat pada gambar 3 dibawah ini.



Gambar 1 Daerah yang Memenuhi Syarat *Robustness* dan *Dexterity*.

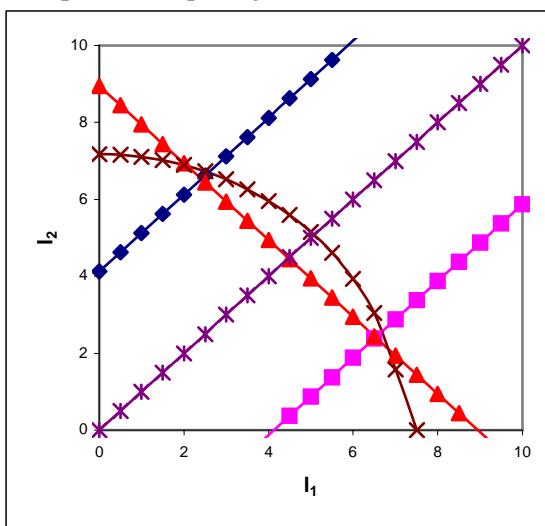
Dari grafik dapat diketahui bahwa :

$$l_1 = l_{1opt} = 5.85 \quad (15)$$

$$l_2 = l_{2opt} = 4.16 \quad (16)$$

### Penentuan Dimensi Manipulator 2R dengan Kriteria *Dexterity*

Dengan memakai  $RI_2$  sebesar 2 dan kriteria *dynamic manipulability ellipsoidal* maka *plotting* daerah yang memenuhi syarat dapat dilihat pada gambar 3 dibawah ini.



Gambar 2 Daerah yang Memenuhi Syarat *Robustness* dan *Manipulability Ellipsoids*

Dari grafik dapat diketahui bahwa :

$$l_1 = l_{1opt} = 5.074 \quad (17)$$

$$l_2 = l_{2opt} = 5.074 \quad (18)$$

### Penentuan Dimensi Manipulator 2R dengan Kriteria Torsi Manipulator

Jika dilakukan perhitungan torsi pada masing-masing lengan maka didapatkan nilai-nilai pada tabel 1 berikut ini.

Tabel 1 Torsi Manipulator

No.	$l_1$ (m)	$l_2$ (m)	$\tau_{tot}$ ( $10^3$ N/m $^2$ )	No.	$l_1$ (m)	$l_2$ (m)	$\tau_{tot}$ ( $10^3$ N/m $^2$ )
1.	1.900	6.920	11.523	27.	4.500	5.589	8.276
2.	2.000	6.891	11.373	28.	4.600	5.507	8.180
3.	2.100	6.861	11.232	29.	4.700	5.422	8.088
4.	2.200	6.830	11.096	30.	4.800	5.334	8.001
5.	2.300	6.797	10.961	31.	4.900	5.242	7.917
6.	2.400	6.762	10.828	32.	5.000	5.147	7.837
7.	2.500	6.726	10.695	33.	<b>5.074</b>	<b>5.074</b>	<b>7.781</b>
8.	2.600	6.688	10.563	34.	5.100	5.048	7.762
9.	2.700	6.648	10.431	35.	5.200	4.945	7.691
10.	2.800	6.607	10.299	36.	5.300	4.837	7.624
11.	2.900	6.564	10.168	37.	5.400	4.725	7.562
12.	3.000	6.518	10.038	38.	5.500	4.609	7.503
13.	3.100	6.471	9.908	39.	5.600	4.487	7.448
14.	3.200	6.423	9.779	40.	5.700	4.359	7.395
15.	3.300	6.372	9.652	41.	5.800	4.225	7.345
16.	3.400	6.319	9.526	42.	<b>5.850</b>	<b>4.160</b>	<b>7.320</b>
17.	3.500	6.264	9.401	43.	5.900	4.084	7.296
18.	3.600	6.207	9.277	44.	6.000	3.936	7.245
19.	3.700	6.148	9.156	45.	6.100	3.779	7.191
20.	3.800	6.087	9.037	46.	6.200	3.612	7.130
21.	3.900	6.023	8.919	47.	6.300	3.435	7.056
22.	4.000	5.957	8.805	48.	6.400	3.245	6.960
23.	4.100	5.889	8.693	49.	6.500	3.040	6.828
24.	4.200	5.818	8.584	50.	6.600	2.816	6.632
25.	4.300	5.745	8.478	51.	6.700	2.569	6.319
26.	4.400	5.668	8.375	52.	6.800	2.291	5.758
				53.	<b>6.900</b>	<b>1.970</b>	<b>4.442</b>

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa dengan semakin pendek  $l_2$  maka torsi yang dibutuhkan manipulator cenderung lebih kecil.

### KESIMPULAN

Kesimpulan yang bisa diambil adalah penelitian ini adalah metode yang dikembangkan (metode *tolerance synthesis*) merupakan metode yang efisien dalam mendesain lengan robot yang *robust*. Juga dari analisis data diketahui bahwa kriteria *dexterity* memberikan hasil yang lebih baik, dalam hal torsi manipulator, dibandingkan dengan kriteria *dynamic manipulability ellipsoid*.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara dengan memakai Dana Pengembangan Pendidikan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun anggaran 2006 dengan nomor kontrak 11/J.10.1.31/PG/2006 tanggal 17 April 2006.

### DAFTAR PUSTAKA

- Al-Widyan, K., dan Angeles, J., (2003). *Recent Advance in Integrated Design and Manufacturing in Mecanical Engineering*. Kluwer Academic Publiser, New York.
- Batson, Robert G. dan Elam, Matthew E. (2000). *Robust Design : An Experiment-based Approach to Design for Reliability*. Department of Industrial Engineering, The University of Alabama.
- Caro, Stephane, et. al. (2005). *Tolerance Synthesis of Mechanism : A Robust Design Approach*. Transactions of the ASME. 127, pp 86 – 94.
- Chase, K., Gao, J., Magleby, S.P. dan Sorensen, C.D., (1996). *Including Geometric Features Variations in Tolerance Analysis of Mecanical Assembly*. IEE Trans., 28, pp. 795-807.
- Craig, J.J., (1989)., Introduction to Robotics : Mechanics and Control, Addison-Wesley Publising Company.
- Lee, W.J., Woo, T.C., dan Chou, S., (1993). *Tolerance Synthesis for Nonlinier Systems Based on Non Linier Programming*. IEE Trans., 25(1), pp. 51-61.
- Parkinson, D.B, (2000). *The Application of a Robust Design Methods to Tolerancing*, ASME J. Mech. Des, 22, pp 149 – 154.
- Taylor, Wayne A. (1996). *Comparing Three Approaches to Robust Design : Taguchi Versus Response Versus Tolerance Analysis*. Proceeding at Fall Technical Conference. pp 1 –10.
- Ting, K.L, dan Loung, . (1996), *Performance Quality and Tolerance Sensitivityof Mechanism*. ASME J. Mech. Des, 118, pp 144 – 150.
- Zhu, J., dan Ting, K.L, (2001), *Performance Distribution Analysis and Robust Design*. ASME J. Mech, Des, 123, pp 11 –17.