

OPTIMALISASI UKURAN MANIPULABILITAS ROBOT STANFORD MENGUNAKAN METODE *PSEUDO-INVERSE*

Gina Fahrina¹⁾, Elang Derdian Marindani²⁾, Muhammad Saleh³⁾

Control Systems Laboratory, Engineering Faculty, Tanjungpura University
e-mail: ginafahrina@gmail.com¹⁾, elangdm@yahoo.co.id²⁾, msaleh_teuntan@yahoo.com³⁾

ABSTRACT

Robot is one of the most important element in the industrial world which has been growing very rapidly. Stanford robot arm is one of robot that use in industry, it has five degrees of freedom (DOF). Movement of the robot arm in his workspace called manipulability or manipulability measure. More the optimal manipulability measure manipulator, the more movement of the robotic arm will be more flexible in his workspace. The purpose of this research are to get knowledge and learn how to solve inverse kinematics using the Pseudo-Inverse at Stanford robot and to compare the characteristic of redundant and nonredundant manipulability measure optimization at Stanford robot arm. This simulations are used to determine manipulability measure optimization by using Matlab 7.6 software. This research produced that the maximum value of the redundancy manipulability measure is 7,391, while the value manipulability measure without redundancy was only 4,207. Simulations with redundancy manipulability measure value is high than the value of manipulability measure without redundancy. It means that manipulability measure at Stanford robot that use the redundancy is more optimal than the Stanford robot that does not use redundancy. Thus proved that for optimize manipulability measure is use redundancy.

Keywords: degree of freedom, manipulability measure, pseudo-inverse, optimization, redundancy

1. Pendahuluan

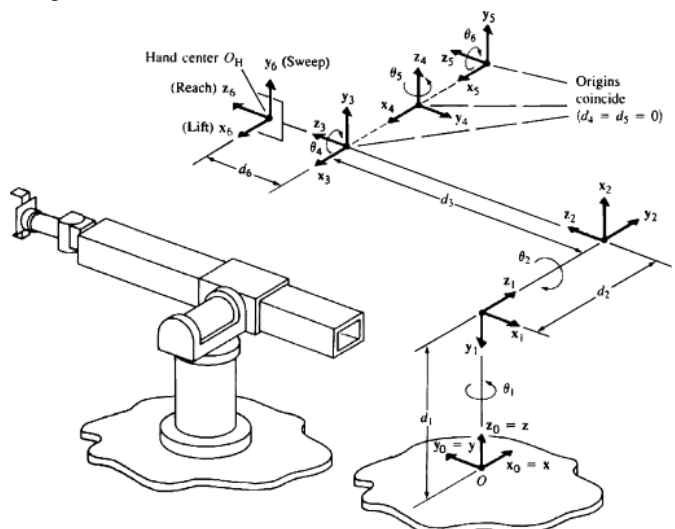
Robot merupakan salah satu elemen penting pada dunia industri yang mengalami perkembangan sangat pesat. Robot pertama kali diperkenalkan pada dunia tahun 1940-an ketika *Argonne National Laboratories* di *Oak Ridge*, Amerika memperkenalkan sebuah mekanisme robotika yang dinamai *master-slave* manipulator. Hingga kini, robot telah mengalami banyak sekali perubahan bentuk dan fungsi.

Alasan menggunakan robot yaitu meningkatkan kualitas produksi, serta meningkatkan efisiensi dalam sebuah proses pengerjaan. Robot lengan banyak digunakan di industri yaitu karena keandalannya dalam membantu proses produksi. Robot Stanford adalah salah satu yang digunakan pada industri. Robot ini memiliki lima derajat kebebasan (DOF).

Pada penelitian sebelumnya, robot yang digunakan yaitu manipulator planar dengan ruang kerja dua dimensi. Sedangkan pada penelitian ini robot Stanford yang digunakan menggunakan ruang kerja tiga dimensi, sehingga lebih kompleks dalam penyelesaian invers kinematiknya. Selain itu, gerakan robot Stanford akan lebih baik karena gerakannya dilihat dari tiga dimensi. Lintasan yang digunakan pada penelitian ini pun menggunakan lintasan lingkaran. Lintasan lingkaran erupakan lintasan yang kompleks karena telah mencakup beberapa lintasan lain seperti lintasan titik, sinusoidal, maupun lintasan garis. Lingkaran memiliki tingkat kesulitan tinggi dalam pergerakan robot mencapai lingkaran tersebut. Untuk itu diperlukan analisa agar robot Stanford mampu mencapai lintasan lingkaran sehingga pergerakan robot akan semakin fleksibel di dalam ruang kerjanya (*workspace*).

2. Kinematika Robot Stanford

Robot Stanford merupakan manipulator bergerak pada tiga dimensi x, y dan z. Robot Stanford memiliki lima derajat kebebasan dengan dua sendi revolute di dasar, bersama prisma dan bola pergelangan tangan. Hal ini sangat mirip dengan robot lengan siku, dengan siku diganti oleh sendi prismatic. Gambar 1 adalah gambar fisik dari robot Stanford.



Gambar 1 Robot Stanford

Berdasarkan Gambar 1 tersebut, robot Stanford ini memiliki enam DOF dengan lima joint. Pergerakan robot ini dimulai dari kondisi awal robot. Konfigurasi robot Stanford yang diusulkan Antti J. Koivo (1989:52) yaitu dengan matriks *Denavit-Hartenberg* dari koordinat dari titik nol hingga pada koordinat akhir robot lengan, yaitu pada ujung *end effector*nya. Matriks *Denavit-Hartenberg* ini mengacu pada Tabel 1

Tabel 1 Parameter Untuk Robot Stanford Variabel : $\theta_i, i = 1, 2, 4, 5, 6$ dan d_3

link i =	d_i	a_i	θ_i
1	d_1	-90°	θ_1
2	d_2	90°	θ_2
3	d_3	0	-90°
4	0	-90°	θ_4
5	0	90°	θ_5
6	d_6	0	θ_6

3. Manipulabilitas

Yoshikawa (1984, 1985) mengusulkan suatu ukuran berlanjut yang mengevaluasi mutu kinematik dari mekanisme robotika yang dikenal dengan ukuran manipulabilitas (*Measure of Manipulability / MOM*). MOM mengambil suatu nilai skalar nonnegatif berlanjut dan menjadi sama dengan nol jika dan hanya jika tingkat manipulabilitas menjadi lebih kecil dari m (dimensi dari matriks *Jacobian*), ukuran ini dapat diperlakukan sebagai jarak dari singularitas. MOM telah digunakan untuk analisa kinematika, desain dan kendali dari mekanisme robotika.

Definisi MOM diberikan sebagai berikut dengan suatu nilai skalar w diberikan oleh persamaan berikut:

$$w(\theta) = \sqrt{\det(J(\theta)J^T(\theta))} \quad (1)$$

dengan w ukuran manipulabilitas
 J matriks *Jacobian*
 J^T transpose matriks *Jacobian*

4. Metode *Pseudo-Inverse*

Metode yang digunakan untuk menyelesaikan *inverse kinematic* yang paling sering digunakan yaitu *Moore-Penrose inverse* atau lebih sering disebut dengan *pseudo-inverse* dengan simbol matriks J^+ .

Pseudo-inverse merupakan invers matriks seperti objek dari matriks yang didefinisikan untuk matriks kompleks, bahkan untuk bentuk matriks yang tidak persegi. Untuk setiap matriks yang kompleks, lebih banyak kemungkinan didefinisikan menjadi sebuah *pseudo-inverse*.

Matriks *Jacobian* merupakan matriks tidak persegi, maka penyelesaian suatu invers konvensional tidak ada. Sebagai gantinya, digunakanlah *pseudo-inverse* J^+ .

Suatu matriks dikalikan dengan matriks *transpose* dirinya sendiri akan menjadi suatu matriks $n \times n$ maka, *pseudo-inverse* ditulis pada persamaan (2):

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T = J^T (J J^T)^{-1} \quad (2)$$

5. Parameter Robot Stanford

Manipulabilitas merupakan kemampuan pergerakan manipulator untuk beroperasi pada posisi dan orientasi *end-effector* manipulator. Ukuran manipulabilitas merupakan ukuran kemampuan manipulator untuk dapat bergerak bebas pada daerah kerjanya (*workspace*). Dengan mengoptimalkan ukuran manipulabilitas, maka konfigurasi singular dapat dihindari.

Redundansi pada manipulator *redundant* digunakan untuk optimalisasi ukuran manipulabilitas. Optimalisasi ukuran manipulabilitas dapat diartikan juga dengan memaksimalkan ukuran tersebut. Jadi dengan memasukkan redundansi ke dalam persamaan invers kinematiknya akan dapat meningkatkan ukuran manipulabilitas manipulator tersebut.

Lintasan yang akan digunakan adalah berbentuk lingkaran. Data-data parameter awal dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter Awal Robot Stanford untuk Lintasan Berbentuk Lingkaran

Link	Panjang Link	Sudut Joint	
	(Meter)	(Radian)	(Derajat)
1	0,5	$\pi/6$	30
2	0,5	$\pi/2$	90
3	1,5	$-\pi/2$	-90
4	0	$-\pi/2$	-90
5	0	$\pi/6$	30
6	1,5	$\pi/4$	45

Berdasarkan data dari Tabel 2, maka diperoleh posisi awal robot Stanford dengan menggunakan matriks DH, yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} x_0 &= 0 \\ x_1 &= 0 \\ x_2 &= -0.25 \\ x_3 &= 1.0490 \\ x_4 &= 1.0490 \\ x_5 &= 1.0490 \\ x_6 &= 1.7990 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_0 &= 0 \\ y_1 &= 0 \\ y_2 &= 0.4330 \\ y_3 &= 1.1830 \\ y_4 &= 1.1830 \\ y_5 &= 1.1830 \\ y_6 &= 2.4821 \\ z_0 &= 0 \end{aligned}$$

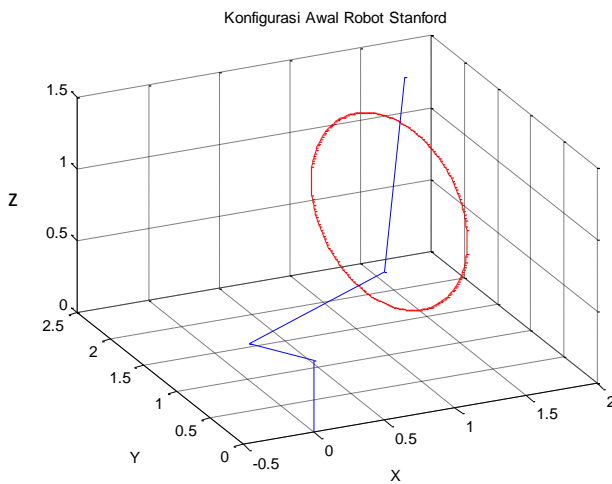
$$\begin{aligned} z_1 &= 0.5 \\ z_2 &= 0.5 \\ z_3 &= 0.5 \\ z_4 &= 0.5 \\ z_5 &= 0.5 \\ z_6 &= 1.2500 \end{aligned}$$

Berdasarkan koordinat *cartesian* tersebut, posisi konfigurasi robot Stanford terlihat pada Gambar 2. Sedangkan persamaan untuk lintasan lingkarannya yaitu adalah :

$$X_d = (x, y, z) \text{ dengan : } \begin{aligned} x &= 0.5 (2 - \cos(\pi t)) \\ y &= 0.5 (2 - \sin(\pi t)) \\ z &= 0.5 (2 - \sin(\pi t)) \end{aligned}$$

Sehingga $\dot{X}_d = (\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d)$ yaitu :

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= 0.5 \pi (\sin(\pi t)) \\ \dot{y}_d &= -0.5 \pi (\cos(\pi t)) \\ \dot{z}_d &= -0.5 \pi (\cos(\pi t)) \end{aligned}$$



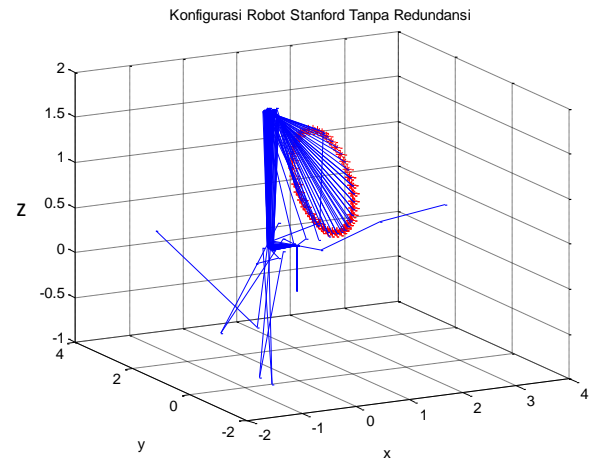
Gambar 2 Konfigurasi Awal Robot Stanford dengan Lintasan Lingkaran

6. Simulasi dan Analisis

Untuk simulasi robot Stanford, diharapkan *end-effector* dapat bergerak pada lintasan yang berbentuk lingkaran baik yang tanpa redundansi maupun dengan redundansi. Hasil simulasi ini akan menampilkan konfigurasi gerakan dari robot Stanford dalam bentuk *stick picture*. Pergerakan robot Stanford berupa perubahan konfigurasi dari setiap *link* robot pada setiap gerakannya dalam menyelesaikan lintasan berbentuk lingkaran. Dari hasil konfigurasi ini dihasilkan perubahan besar sudut *joint*, kecepatan sudut *joint*, *norm error* yang terjadi serta ukuran manipulabilitas.

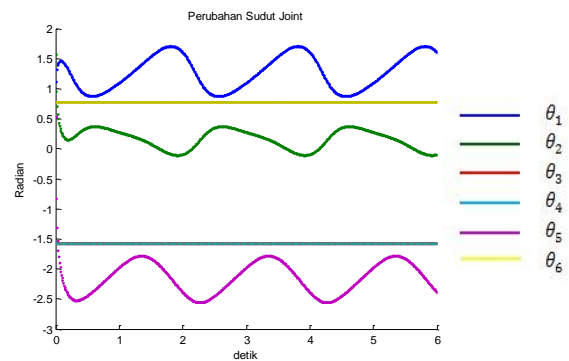
Simulasi pertama, yaitu simulasi tanpa redundansi yang dihasilkan pada Gambar 3 yaitu menggunakan parameter waktu interval (t) selama 3 detik, waktu sampling (Δt) sebesar 0,05 detik, dengan matriks *Gain*

$$(K) = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

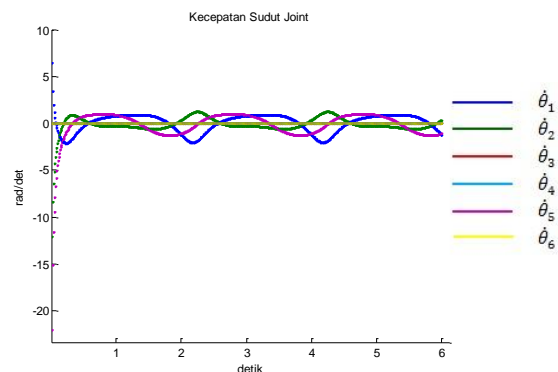


Gambar 3 *Stick Picture* Tanpa Redundansi Tampak Tiga Dimensi

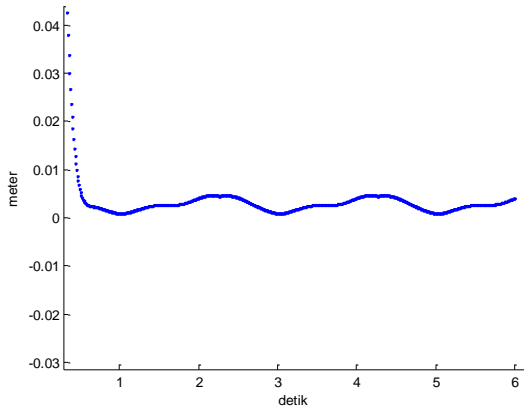
Pada kondisi awal, robot Stanford masih di luar lintasan. Kemudian robot pada detik ke 0.34 mulai mencapai lintasan lingkaran. Mulai dari detik ke 0.35 hingga detik ke 2.5 robot Stanford melintasi lingkaran. Begitupun dengan kondisi selanjutnya hingga waktu interval yang digunakan pada pengujian. Jika digunakan waktu interval yang lama, robot Stanford akan terus melintasi lingkaran hingga terjadi pengulangan terus menerus. Kemudian dilihat perubahan sudut *joint*, kecepatan sudut *joint*, *norm error* dan ukuran manipulabilitas dengan waktu sampling lebih rapat yaitu 0.01.



Gambar 4 Perubahan Sudut *Joint* Tanpa Redundansi

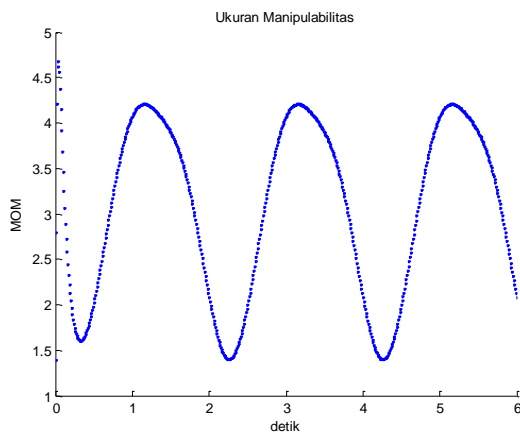


Gambar 5 Kecepatan Sudut *Joint* Tanpa Redundansi



Gambar 6 Norm Error Tanpa Redundansi

Terlihat bahwa *norm error* tersebut tidak nol. Namun nilai *norm error* tersebut hampir mendekati nol sehingga tingkat kesalahan yang terjadi sangat kecil. Siklus ini terlihat berulang hingga interval 6 detik dan akan terus berulang jika interval yang digunakan lebih lama.

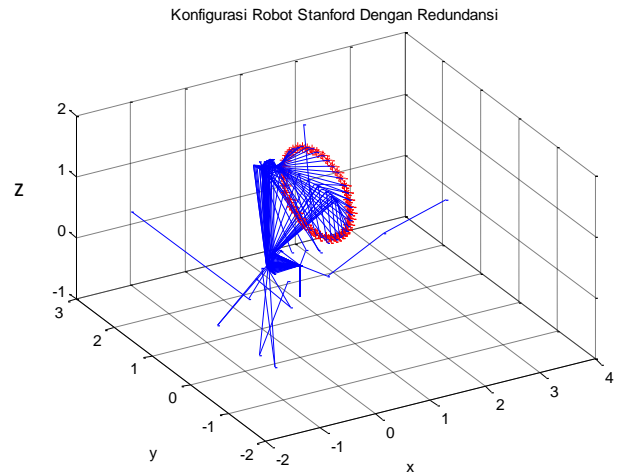


Gambar 7 Ukuran Manipulabilitas Tanpa Redundansi

Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa pada 0 detik ukuran manipulabilitas yaitu mencapai 4.337. Kemudian nilai ini menurun hingga pada 0.35 detik yaitu ukuran manipulabilitasnya yaitu 1.613. Nilai maksimum dari ukuran manipulabilitas tanpa redundansi yaitu 4.207.

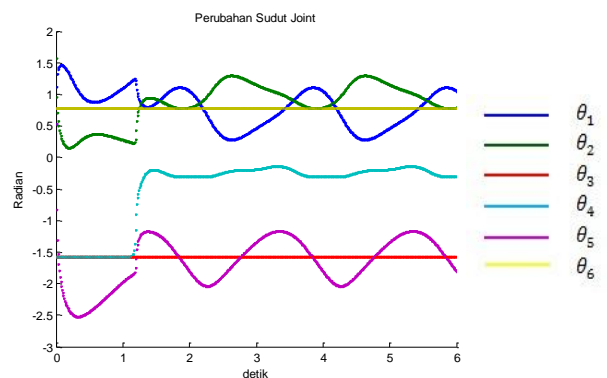
Simulasi selanjutnya yaitu simulasi dengan redundansi. Simulasi ini menggunakan parameter waktu interval selama 3 detik, waktu sampling sebesar 0,05 detik, dengan matriks *Gain K* =

$$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \text{ dan nilai } k_a = 10.$$

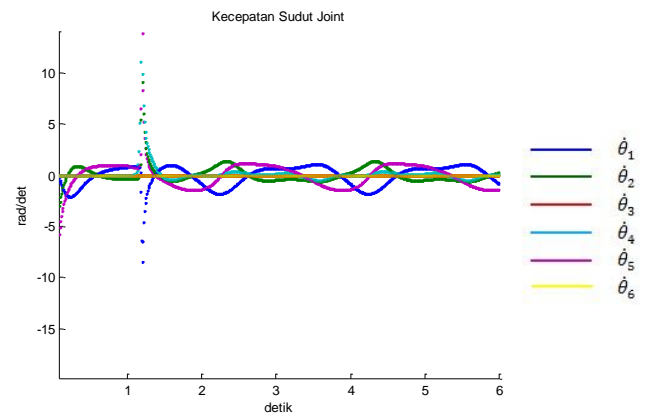


Gambar 8 Stick Picture dengan Redundansi Tampak Tiga Dimensi

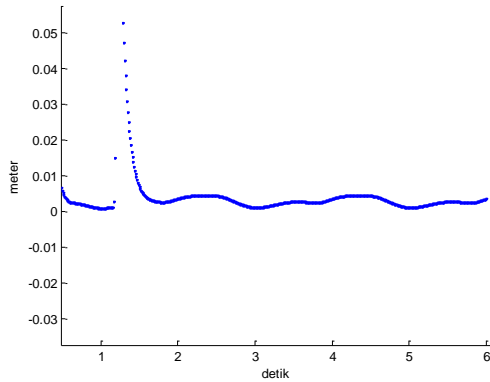
Pada kondisi awal, robot Stanford masih di luar lintasan. Kemudian robot pada detik ke 0.25 mulai mencapai lintasan lingkaran. Namun pada detik ke 1.17 terjadi sedikit *error*, sehingga sedikit keluar dari lintasan lingkaran. Hal ini terjadi karena terdapat satu *link* translasi yang tidak dimaksimalkan sehingga terjadi lonjakan pada saat robot mencapai lintasan. Hal tersebut hanya berlangsung 0.24 detik. Pada detik ke 1.41 robot Stanford dapat melintasi lingkaran kembali.



Gambar 9 Perubahan Sudut *Joint* dengan Redundansi

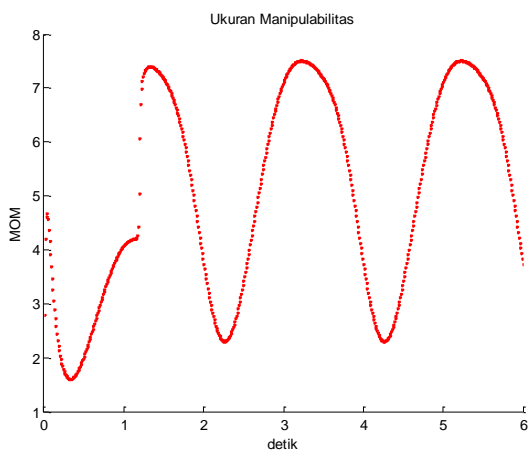


Gambar 10 Kecepatan Sudut *Joint* dengan Redundansi



Gambar 11 Norm Error dengan Redundansi

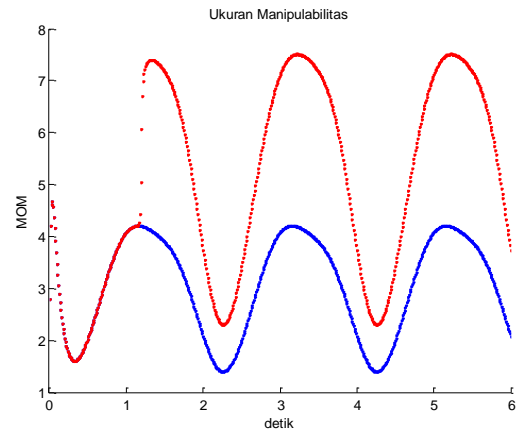
Dengan pembesaran yang dilakukan, terlihat bahwa *norm error* tersebut tidak nol. Namun nilai *norm error* tersebut hampir mendekati nol sehingga tingkat kesalahan yang terjadi sangat kecil.



Gambar 12 Ukuran Manipulabilitas dengan Redundansi

Terlihat bahwa pada 0 detik ukuran manipulabilitasnya yaitu mencapai 4.675. Kemudian nilai ini menurun hingga pada 0.35 detik yaitu ukuran manipulabilitasnya yaitu 1.613. Nilai maksimum dari ukuran manipulabilitas dengan redundansi yaitu 7.391. Setelah melihat hasil dari kedua simulasi yaitu tanpa redundansi dan dengan redundansi, dapat terlihat perbandingan di antara keduanya.

Nilai ϕ yang merupakan redundansi membuat pergerakan robot lebih mudah dan efisien, sehingga lebih mudah mencapai lintasan lingkaran. Selain itu, dilihat pula perbandingan ukuran manipulabilitas dari kedua kondisi yaitu tanpa redundansi dan dengan redundansi. Hasil plot dari perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Perbandingan Ukuran Manipulabilitas Robot Tanpa Redundansi dan dengan Redundansi

Dari hasil simulasi pada Gambar 13 terlihat bahwa ukuran manipulabilitas robot yang menggunakan redundansi nilai ukurannya pada 0 detik yaitu 4.675. Sedangkan yang tidak menggunakan redundansi ukuran manipulabilitasnya pada 0 detik yaitu 4.337. Nilai ukuran manipulabilitas maksimum dengan redundansi mencapai 7.391. Sedangkan nilai ukuran manipulabilitas tanpa redundansi yaitu hanya 4.207. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada robot yang menggunakan redundansi nilai ukuran manipulabilitasnya lebih besar dibandingkan dengan nilai ukuran manipulabilitas tanpa redundansi. Ini berarti bahwa ukuran manipulabilitas pada robot Stanford yang menggunakan redundansi lebih optimal dibandingkan dengan robot Stanford yang tidak menggunakan redundansi. Sehingga terbukti bahwa untuk mengoptimalkan ukuran manipulabilitas yaitu menggunakan redundansi.

7. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis hasil simulasi, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaruh pemanfaatan redundansi pada penyelesaian invers kinematik robot Stanford dapat mengoptimalkan ukuran manipulabilitas robot tersebut.
2. Nilai *gain* K yang paling baik yang digunakan pada simulasi tanpa redundansi dan dengan redundansi yaitu 10. Sedangkan nilai k_a yang digunakan pada simulasi dengan redundansi yaitu 10.
3. Nilai maksimum ukuran manipulabilitas dengan redundansi yaitu 7.391. Sedangkan nilai ukuran manipulabilitas tanpa redundansi yaitu hanya 4.207. Simulasi yang menggunakan redundansi nilai ukuran manipulabilitasnya lebih besar dibandingkan dengan nilai ukuran manipulabilitas tanpa redundansi. Ini berarti bahwa ukuran manipulabilitas pada robot Stanford yang menggunakan redundansi lebih optimal

dibandingkan dengan robot Stanford yang tidak menggunakan redundansi. Sehingga terbukti bahwa untuk mengoptimalkan ukuran manipulabilitas yaitu menggunakan redundansi.

4. Dengan mengoptimalkan ukuran manipulabilitas, maka kemampuan robot untuk bergerak bebas pada daerah kerjanya akan semakin besar, sehingga gerakan robot akan lebih efektif.

Referensi

- [1] Dwi SS, Taufiq. 2010. *Buku Pintar Robotika : Bagaimana Merancang dan Membuat Robot Sendiri*. Yogyakarta : Penerbit Andi.
- [2] Fu, K.S. 1987. *ROBOTICS : Control, Sensing, Vision, and Intelligence*. New York : McGraw-Hill, Inc.
- [3] Koivo, Antti J. 1989. *Fundamentals For Control Of Robotic Manipulators*. Singapura : John Wiley & Sons Inc.
- [4] Kucuk, Serdar dan Bingul, Zafer . 2006. *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*. Jerman : Pro Literatur Verlag.
- [5] Marindani, Elang D. 2011. *Jurnal : Pengaruh Pembatasan Sudut Joint Terhadap Kinerja Manipulator Planar*. Pontianak : Jurnal Elkha Universitas Tanjungpura.
- [6] Martins, Allan De M. ; Dias, Anfranserai M. ; Alsina, Pablo J. 2006. Comments on Manipulability Measure in Redundant Planar Manipulators. [Robotics Symposium, 2006. LARS '06. IEEE 3rd Latin Americano on 26-27 Oct. 2006](#), pp. 169 – 173.
- [7] Murray, Richard M. ; Zexiang Li, S. Shankar Sastry. 1994. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press.
- [8] Pitowarno, Endra. 2006. *Robotika : Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*. Yogyakarta : Penerbit Andi.
- [9] Sciavicco, Lorenzo dan Siciliano, Bruno. 1996. *Modelling and Control of Robot Manipulator*. Newyork : McGraw Hill International Edition, Electrical Engineering Series.

Biografi

¹ **Gina Fahrina** lahir di Jakarta, Indonesia pada tanggal 9 September 1989, mendapatkan gelar S.T. (Sarjana) tahun 2013 dari Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.

² **Elang Derdian Marindani** lahir di Merauke, Indonesia pada tanggal 1 Maret 1972. Menerima gelar S.T di bidang Teknik Kendali pada Tahun 1997 di Universitas Tanjungpura dan M.T. (Master) di bidang Teknik Sistem Pengaturan dari Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya tahun 2003 dan merupakan dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak dengan bidang keahlian Robotika dan Kendali

Logika Fuzzy. Menjabat sebagai Kepala Lab. Kendali Digital dan Komputasi.

² **Muhammad Saleh** lahir di Pontianak pada tanggal 16 Juni 1967. Menerima gelar S.T di bidang Teknik Kendali pada Tahun 1993 di Universitas Tanjungpura dan M.T. (Master) di bidang Teknik Kendali dari Institut Teknologi Bandung tahun 1999 dan merupakan dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak dengan bidang keahlian Sistem Kendali.