

PERANCANGAN ARM MANIPULATOR 4 DOF DENGAN MENGGUNAKAN PENGENDALIAN CARTESIAN SPACE-TRAJECTORY PLANNING

Muhammad Fathul Faris, Aris Triwiyatno, and Iwan Setiawan

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

Abstrak

Robot adalah sebuah alat mekanik yang dapat melakukan tugas fisik, baik menggunakan pengawasan dan kontrol manusia, ataupun menggunakan program yang telah didefinisikan terlebih dulu (kecerdasan buatan). Salah satu bentuk robot yang sering dipakai adalah bentuk robot lengan *anthropomorphic*, karena mempunyai keunggulan fleksibilitas daerah kerja dalam 2 dimensi ruang sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan di sebagian besar robot industri. Dalam penelitian ini dirancang *arm manipulator* dengan 4 derajat kebebasan (DOF) dengan pengendalian *Cartesian Space-Trajectory Planning*, dengan masukan berupa koordinat *cartesian* dan keluaran berupa sudut dari *joint*/lengan-lengan robot. Dengan menggunakan algoritma *Trajectory Planning* robot lengan dapat mengikuti lintasan berupa lintasan garis lurus yang diberikan dalam daerah kerjanya.

Kata Kunci: Arm Manipulator, Derajat Kebebasan, Trajectory Planning

Abstract

The robot is a mechanical device that can perform physical tasks, using either human supervision and control, or use a program that has been defined in advance (artificial intelligence). One form of the robot is often used is a form of anthropomorphic robot arm, because it has the advantage of flexibility of labor in two-dimensional region of space so it is suitable to be applied in most industrial robots. This research is accomplished by designing control of robot arm manipulators with 4 degrees of freedom (DOF) using Cartesian Space Trajectory Planning method with input and output in the form of Cartesian coordinates and the output are in the form of joint angle. By using of Trajectory Planning algorithm manipulator can follow the trajectory of the robot arm in the form of a straight line trajectory given in the area of work.

Keywords: Arm Manipulator, Degrees of Freedom, Trajectory Planning,

1. Pendahuluan

Robot manipulator lengan saat ini telah banyak diaplikasikan dalam dunia industri, seperti pada robot las (*welding robot*), robot pemegang (*handling robot*), robot pelubang/pemotong (*punching robot*), robot mesin perkakas (*tools machine robot*), dan lain sebagainya. Salah satu bentuk robot yang sering dipakai adalah bentuk robot lengan *anthropomorphic*. Bentuk robot lengan ini mempunyai keunggulan fleksibilitas daerah kerja dalam 3 dimensi ruang sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan di sebagian besar robot industri^[1].

Pada umumnya struktur robot lengan ini terdiri atas *mainframe* yang disebut lengan (*arm*) dan pergelangan (*wrist*). Lengan tersusun atas serangkaian *link*, dimana *link* yang satu dengan *link* yang lainnya dihubungkan

dengan *joint*. Dengan adanya *joint* yang menghubungkan dua *link* dan *joint* membentuk satu derajat kebebasan. *Joint* tersebut dapat berupa *revolute joint* (gerak berputar) atau *prismatic joint* (gerak bergeser). Sedangkan pada pergelangan tangan, dipasang *end effector* yang dapat berupa *grripper*, *welding touch*, *welding gun*, *cutter*/pahat yang bisa dipakai untuk proses *milling* atau peralatan lainnya^[2].

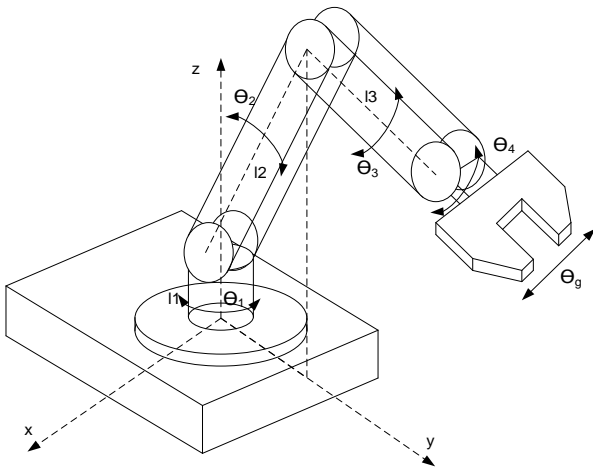
Untuk dapat menjalankan tugasnya, diperlukan suatu sistem perencanaan pergerakan manipulator dari kondisi awal sampai kondisi akhir sesuai dengan tugas yang telah diberikan. Terdapat beberapa metode algoritma yang telah dikemukakan oleh beberapa ahli dalam merencanakan pergerakan manipulator untuk menyelesaikan tugas yang telah diberikan.

Dalam tulisan ini pengendalian pergerakan robot lengan *anthropomorphic* menggunakan algoritma *trajectory planning*. Untuk dapat membuat sistemnya, akan dibahas mengenai kinematika robot lengan *anthropomorphic* dalam koordinat 3 dimensi. Selanjutnya robot lengan ini diharapkan dapat menjalankan tugas yang diberikan untuk mengikuti lintasan yang berada dalam koordinat ruang 3 dimensi yang berada di dalam daerah kerjanya.

2. Metode

2.1 Perancangan Model Lengan Robot

Lengan robot memiliki spesifikasi panjang *link* 1(L1) 2,5 cm, *link* 2(L2) 25 cm, *link* 3(L3) 14 cm, dan jarak ujung *end effector* dari posisi joint 4 sejauh 8,5 cm, sehingga total panjang bentangan lengan *horizontal* adalah 47, 5 cm dan 50 cm untuk bentangan *vertikal*. Gambar 1 menunjukkan model robot yang digunakan

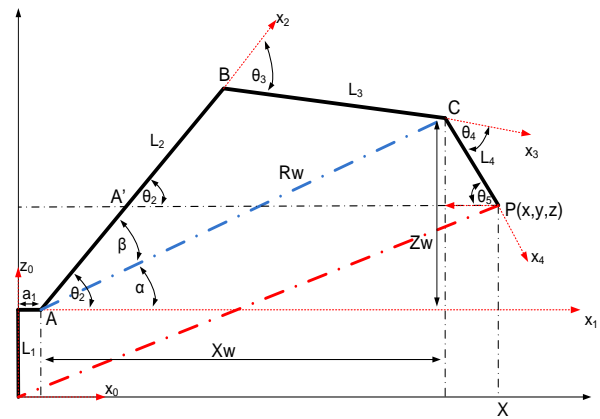


Gambar 1. Model lengan robot *anthromorphic* dengan empat derajat kebebasan ditambah satu derajat pada *gripper*.

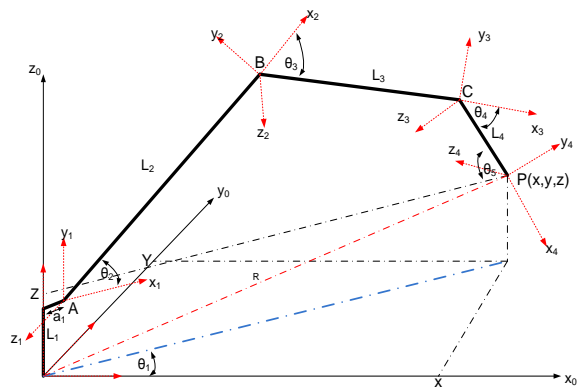
Untuk tiap-tiap *joint* pada lengan robot didesain dengan jangkauan sudut masing-masing. Untuk *joint* 1 (θ_1) sebesar 180° , *joint* 2 (θ_2) sebesar 180° , *joint* 3 (θ_3) sebesar 135° , *joint* 4(θ_4) sebesar 90° , dan *joint* 5(θ_5) sebesar 180° . Untuk *joint* 5 sebagai *end effector* perubahan sudut akan diubah menjadi perubahan kedudukan (*translasi*) dari jari/*jaw gripper*.

2.1.1 Kinematika Maju

Untuk mendapatkan persamaan kinematika maju dari *arm manipulator* digunakan metode Denavit-Hatnberg Dari data model yang ada didapat parameter dari robot yang di tampilkan pada Gambar 2



(a)



(b)

Gambar 2. *Anthromorphic arm* : (a) skematik lengan; (b) parameter D-H

Dari Gambar 2 dapat diambil parameter-parameter pada Tabel 1

Tabel 1. Parameter D-H

Joint/ Sendi i	Sudut α_i	Link a_i	Link d_i	Sudut θ_i
1	90°	0,2 cm	2,5 cm	θ_1
2	0°	25 cm	0 cm	θ_2
3	0°	14 cm	0 cm	θ_3
4	0°	8,5 cm	0 cm	θ_4
5	90°	0 cm	0 cm	θ_5

Dengan parameter D-H yang ada maka matrik A dari setiap *joint* dapat dibentuk seperti pada Persamaan 1-5

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 2,5C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 2,5S_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 25C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & 25S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 14C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & 14S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 8,5C_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & 8,5S_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Kemudian untuk mendapatkan matriks T, matriks Persamaan 1-5 dimasukkan ke dalam Persamaan 6

$${}^0A_n = \begin{bmatrix} {}^0R_n & {}^0P_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Sehingga didapatkan

$$A_5^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 \quad (7)$$

$$A_5^0 = \begin{bmatrix} R_5^0 & P_5^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_5^0 = \begin{bmatrix} C_1(C_5C_{234} - S_5S_{234}) & S_1 & C_1(C_5S_{234} - S_5C_{234}) \\ S_1(C_5C_{234} - S_5S_{234}) & -C_1 & S_1(C_5S_{234} - S_5C_{234}) \\ C_5S_{234} - S_5C_{234} & 0 & (S_5S_{234} - C_5C_{234}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_5^0 = \begin{bmatrix} C_1(a_1 + 25C_2 + 14C_{23} + 8,5C_{234}) \\ C_1(a_1 + 25C_2 + 14C_{23} + 8,5C_{234}) \\ 2,5 + 25S_2 + 14S_{23} + 8,5S_{234} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.1.2 Kinematika balik

Dengan melihat model geometri pada Gambar 2 maka dapat ditentukan θ_1 pada Persamaan 11.

$$\tan \theta_1 = \frac{Y}{X} \rightarrow \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (11)$$

Kemudian untuk menentukan besar sudut θ_3 maka digunakan segitiga ABC. Xw menyatakan panjang bahu ke pergelangan sepanjang sumbu x1, Zw menyatakan tinggi dari pergelangan dilihat dari sumbu y1, sedangkan Rw menyatakan jarak titik bahu ke titik pergelangan.

$$Xw = \sqrt{X^2 + Y^2} - 8,5 \cos \theta_5 - 0,2 \quad (12)$$

$$Zw = (Z - 2,5) + 8,5 \sin \theta_5 \quad (13)$$

$$Rw = \sqrt{Xw^2 + Zw^2} \quad (14)$$

Dengan menggunakan hukum cosinus pada segitiga ABC

$$Rw^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \theta_3 \quad (15)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{Rw^2 - 25^2 - 14^2}{2 \cdot 25 \cdot 14} \quad (16)$$

$$\sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \quad (17)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3}\right) \quad (18)$$

Dapat dilihat dari persamaan di atas, terdapat dua solusi untuk besar sudut θ_3 . Hal ini dapat terjadi dari penentuan tanda pada nilai dari sinus θ_3 .

Untuk mencari θ_2 digunakan penyelesaian Persamaan 20 dan 21

$$\theta_2 = \alpha + \beta \quad (19)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Zw}{Xw}\right) \quad (20)$$

$$\text{dan } \beta = \tan^{-1}\left(\frac{-l_3 \sin \theta_3}{l_2 + l_3 \cos \theta_3}\right) \quad (21)$$

Dengan memasukkan Persamaan 20 dan 21 ke Persamaan 19 didapat

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{Zw}{Xw}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{-l_3 \sin \theta_3}{l_2 + l_3 \cos \theta_3}\right) \quad (22)$$

Sedangkan θ_4 dicari dengan melihat bangun A'BCP, dimana

$$\theta_5 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (23)$$

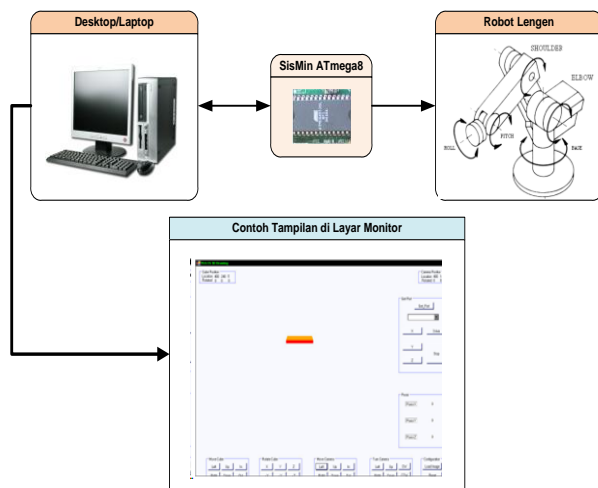
Sehingga didapatkan

$$\theta_4 = \theta_5 - \theta_2 - \theta_3 \quad (24)$$

Perasamaan 24 merupakan persamaan yang digunakan untuk orientasi dari gripper terhadap base frame.

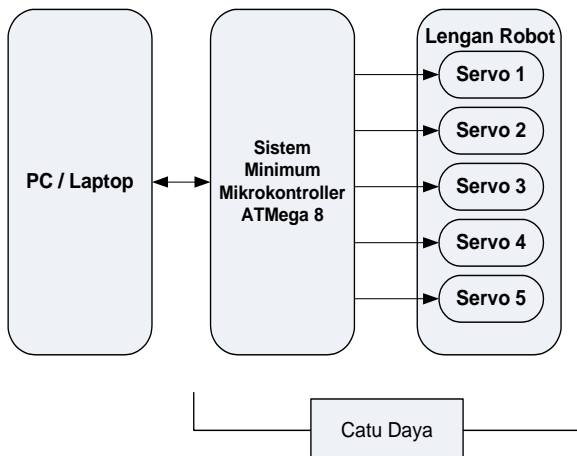
2.2 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Pada tahap ini, dirancang perangkat pengendalian lengan robot menggunakan mikrokontroler Sistem Minimum ATmega 8, motor servo sebagai penggerak lengan robot, dan sebuah komputer atau laptop sebagai *Interface*. Data dapat dipantau di monitor melalui komunikasi serial dengan mikrokontroler.



Gambar 3. Diagram blok hardware secara umum.

Dari Gambar 3 kemudian didapat diagram konteks dari sistem keseluruhan robot sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4



Gambar 4. Diagram konteks perancangan lengan robot.

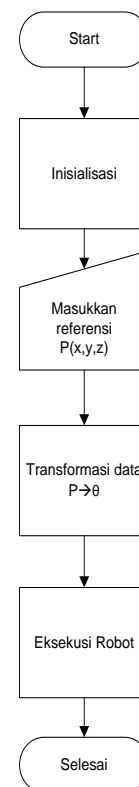
Tiap-tiap bagian dari diagram konteks sistem di atas dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Mikrokontroler AVR ATmega8 yang berfungsi sebagai pengontrol motor servo pada lengan robot. Komunikasi antara PC/Laptop dengan AVR ATmega8 menggunakan USART Port yang tersedia.
2. PC/Laptop berfungsi sebagai GUI yang akan dipakai oleh pengguna untuk memberikan instruksi pada robot.

Motor servo digunakan sebagai aktuator pada lengan robot, yang mana digunakan sebagai pembentuk sudut *join* antar *link* lengan robot dan penggerak pada gripper.

2.3 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Secara umum perancangan perangkat lunak pengendalian *arm manipulator* dapat digambarkan dari diagram alir pada gambar 5.



Gambar 5. Flow chart perancangan sistem.

3. Hasil dan Analisa

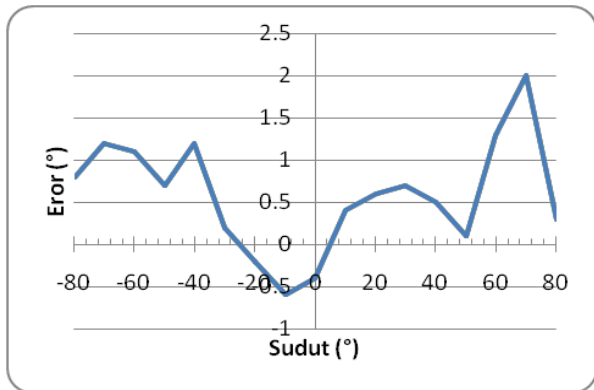
3.1 Pengujian Karakteristik Sensor Motor Servo

Pengujian karakteristik dari tiap motor servo pada setiap *axis/joint* lengan. Dari siklus motor *servo* pada Gambar 2.7 dapat diketahui bahwa untuk membentuk sudut 0°

(searah dengan sumbu X positif), maka *servo* diberi pulsa dengan besar 0,5 ms sedangkan untuk membentuk sudut 180°, maka *servo* harus diberi pulsa dengan lebar 2 ms.

3.1.1 Pengujian pada Axis 0

Pada pengujian axis 0 dengan rentang sudut dari -80° sampai dengan 80° didapatkan data pengukuran ditunjukkan pada Gambar 6.

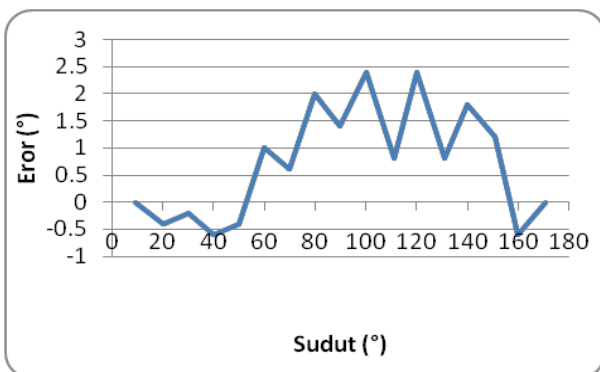


Gambar 6. Grafik perbandingan sudut dengan error yang dihasilkan pada axis 0.

Pada data gambar 6 memperlihatkan bahwa rata-rata error pada motor *servo* axis 0 sebesar 0,582352941°, dengan simpangan error terbesar sejauh 1,3° dan terkecil sejauh 0,1°.

3.1.2 Pengujian pada Axis 1

Pada pengujian axis 0 dengan rentang sudut dari 9° sampai dengan 171° didapatkan data pengukuran ditunjukkan pada Gambar 7.

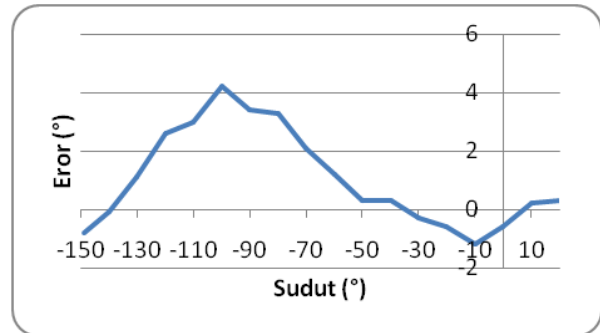


Gambar 7. Grafik perbandingan sudut dengan error yang dihasilkan pada axis 1.

Pada data Gambar 7 memperlihatkan bahwa rata-rata error pada motor *servo* axis 1 sebesar 0.717647059°, dengan simpangan error terbesar sejauh 2° dan terkecil sejauh 0°.

3.1.3 Pengujian pada Axis 2

Pada pengujian axis 2 dengan rentang sudut dari -149° sampai dengan 20° didapatkan data pengukuran ditunjukkan pada Gambar 8

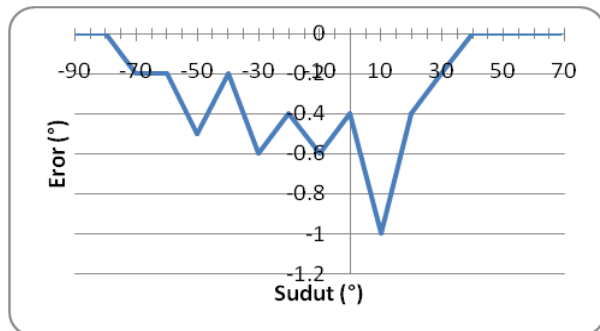


Gambar 8. Grafik perbandingan sudut dengan error yang dihasilkan pada axis 2.

Pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa rata-rata error pada motor *servo* axis 2 sebesar 1.022222222°, dengan simpangan error terbesar sejauh 4,2° dan terkecil sejauh 0,1°.

3.1.4 Pengujian pada Axis 3

Pada pengujian axis 3 dengan rentang sudut dari 90° sampai dengan 69° didapatkan data pengukuran ditunjukkan pada Gambar 13.

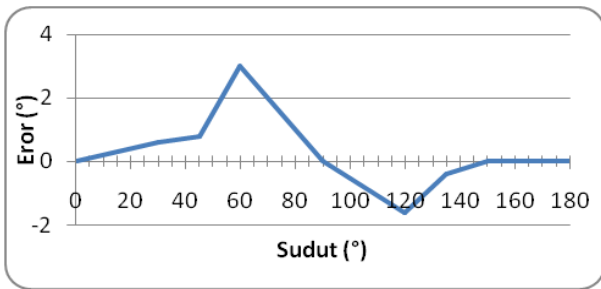


Gambar 9. Grafik perbandingan sudut dengan error yang dihasilkan pada axis 3.

Pada data Gambar 9 memperlihatkan bahwa rata-rata error pada motor *servo* axis 3 sebesar -0.276470588°, dengan simpangan error terbesar sejauh 1° dan terkecil sejauh 0°.

3.1.5 Pengujian pada Axis 4

Pada pengujian axis 4 dengan rentang sudut dari 0° sampai dengan 180° didapatkan data pengukuran ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik perbandingan sudut dengan error yang dihasilkan pada axis 4.

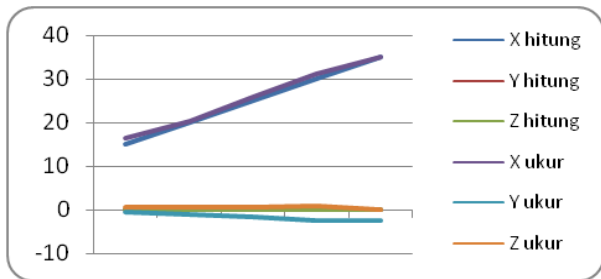
Pada data Gambar 10 memperlihatkan bahwa rata-rata error pada motor servo axis 4 sebesar 0.266666667° , dengan simpangan error terbesar sejauh 3° dan terkecil sejauh 0° .

3.2 Pengujian Kinematika Balik

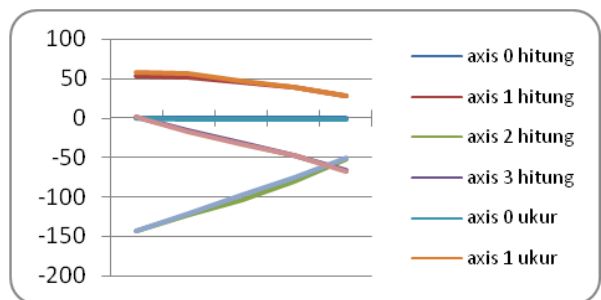
Pada pengujian kinematika balik dilakukan dengan pengukuran posisi koordinat tiga dimensi X, Y, dan Z dari end effector. Yaitu pada sumbu X, sumbu Y dan sumbu Z dengan orientasi tegak lurus dengan alas lengan (dengan sudut -90°).

3.2.1 Pengujian pada sumbu X

Pengujian pada sumbu dilakukan dengan memberikan variasi sumbu X dengan mempertahankan nilai koordinat sumbu Y=0 dan Z=0 serta orientasi dari end effector.



Gambar 11. Perbandingan perubahan koordinat 3 dimensi end effector variasi sumbu X.

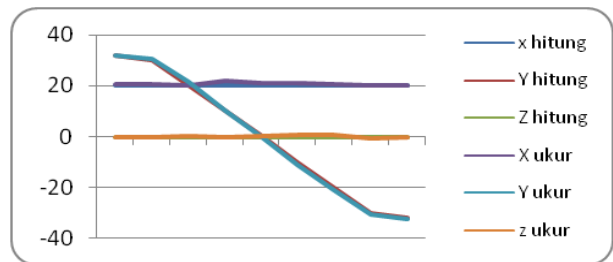


Gambar 12. Perbandingan perubahan sudut joint kinematika balik variasi sumbu X.

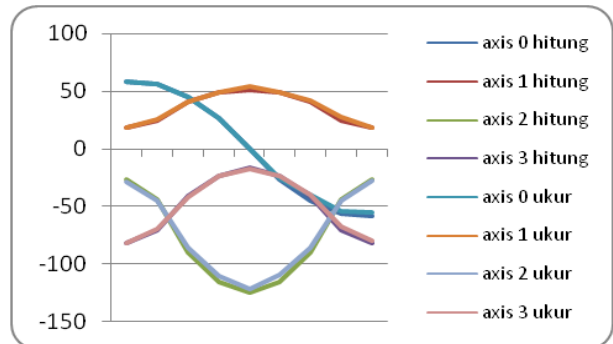
Dari Gambar 11 dan 12 pengujian kinematika balik secara keseluruhan masih terdapat error. Untuk koordinat 3D terdapat rentang error terbesar adalah sejauh 1,5 cm untuk sumbu X; 2,5 cm untuk sumbu Y ;dan 1 cm untuk sumbu Z. Sedangkan untuk perubahan sudut tiap joint rentang error sudut terbesar adalah sejauh $1,5^\circ$ untuk axis 0; $4,09^\circ$ untuk axis 1; $6,5^\circ$ untuk axis 2; dan $2,39^\circ$ untuk axis 3.

3.2.3 Pengujian pada sumbu Y

Pengujian pada sumbu dilakukan dengan memberikan variasi sumbu Y dengan mempertahankan nilai koordinat sumbu X=20 dan Z=0 serta orientasi dari end effector.



Gambar 13. Perbandingan perubahan koordinat 3 dimensi end effector variasi sumbu Y.

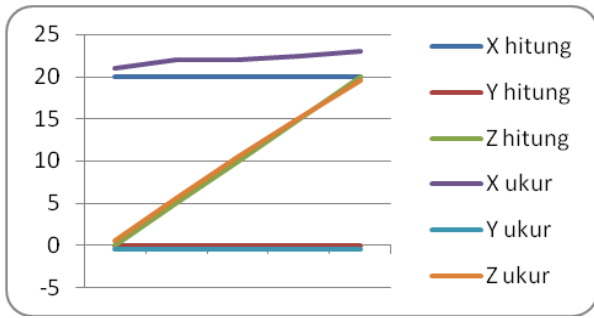


Gambar 14. Perbandingan perubahan sudut joint kinematika balik variasi sumbu Y.

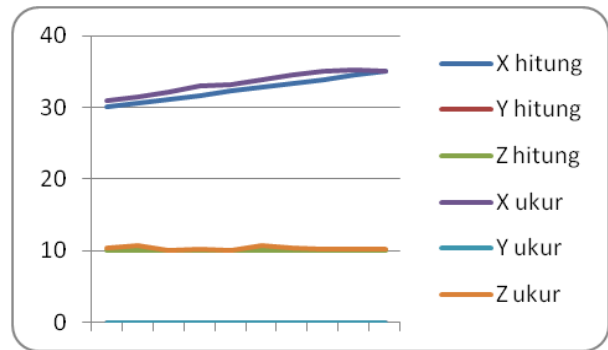
Dari Gambar 13 dan 14 pengujian kinematika balik variasi secara keseluruhan masih terdapat error. Untuk koordinat 3D terdapat rentang error terbesar adalah sejauh 2 cm untuk sumbu X; 1,5 cm untuk sumbu Y ;dan 0,6 cm untuk sumbu Z. Sedangkan untuk perubahan sudut tiap joint rentang error sudut terbesar adalah sejauh $1,5^\circ$ untuk axis 0; $4,09^\circ$ untuk axis 1; $6,5^\circ$ untuk axis 2; dan $2,39^\circ$ untuk axis 3. Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan grafik perubahan koordinat 3D dan perubahan sudut tiap axis.

3.2.3 Pengujian pada sumbu Z

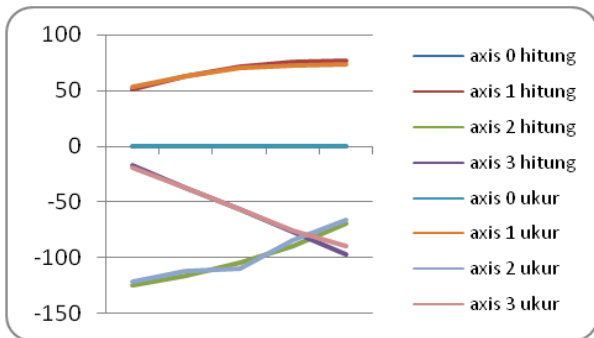
Pengujian pada sumbu dilakukan dengan memberikan variasi sumbu Z dengan mempertahankan nilai koordinat sumbu X=20 dan Y=0 serta orientasi dari end effector.



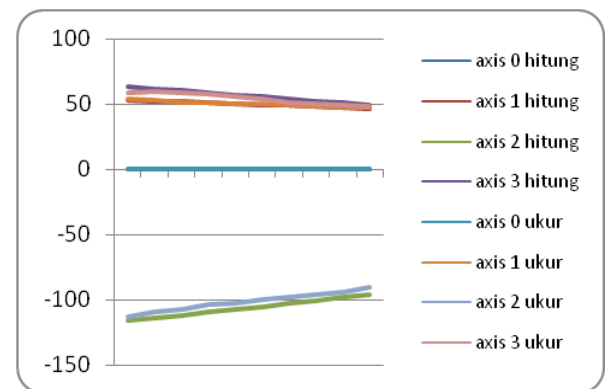
Gambar 15. Perbandingan perubahan koordinat 3 dimensi end effector variasi sumbu Z.



Gambar 17. Perbandingan perubahan koordinat 3 dimensi end effector variasi sumbu X.



Gambar 16. Perbandingan perubahan sudut joint kinematika balik variasi sumbu Z.



Gambar 18. Perbandingan perubahan sudut joint kinematika balik variasi sumbu X.

Dari Gambar 15 dan 16 untuk koordinat 3D terdapat rentang eror terbesar adalah sejauh 3 cm untuk sumbu X; 0,5 cm untuk sumbu Y ;dan 0,5 cm untuk sumbu Z. Sedangkan untuk perubahan sudut tiap joint rentang eror sudut terbesar adalah sejauh 0,5° untuk axis 0; 3,34° untuk axis 1; 5,1° untuk axis 2; dan 2,24° untuk axis 3. Sedangkan sudut axis 3 pada posisi Z=20 terjadi eror sebesar 8°, hal ini dikarenakan sudut maksimal joint 3 hanya diperbolehkan mencapai 90°.

3.3 Pengujian Trajectory Planning

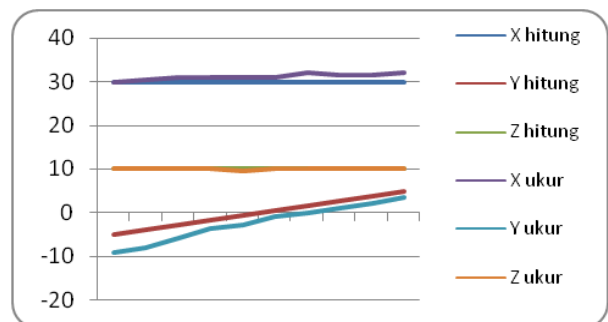
Pada pengujian trajectory planning dilakukan dengan pengukuran posisi koordinat tiga dimensi X, Y, dan Z dari end effector. Yaitu dengan variasi pada sumbu X, sumbu Y dan sumbu Z dengan menjaga arah orientasi dari end effector. Data yang diambil merupakan 10 data cuplikan dari keseluruhan proses pergerakan dari end effector.

3.3.1 Pengujian pada sumbu X

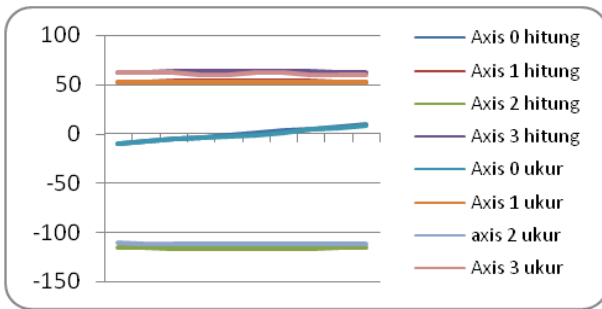
Pengujian pada sumbu X dilakukan dengan cara menggerakkan end effector dari koordinat X=30 Y=0 Z=10 ke koordinat X=35 Y=0 Z=10. Data sebenarnya dicuplikkan setiap 50ms sedangkan waktu yang diberikan adalah lima detik. Gambar 17 dan 18 menunjukkan hasil dari pengujian yang diberikan.

3.3.2 Pengujian pada sumbu Y

Pengujian pada sumbu Y dilakukan dengan cara menggerakkan end effector dari koordinat X=30 Y=-5 Z=10 ke koordinat X=30 Y=5 Z=10. Data sebenarnya dicuplikkan setiap 50ms sedangkan waktu yang diberikan adalah lima detik. Gambar 23 dan 24 menunjukkan hasil dari pengujian yang diberikan.



Gambar 19. Perbandingan perubahan koordinat 3 dimensi end effector variasi sumbu Y.

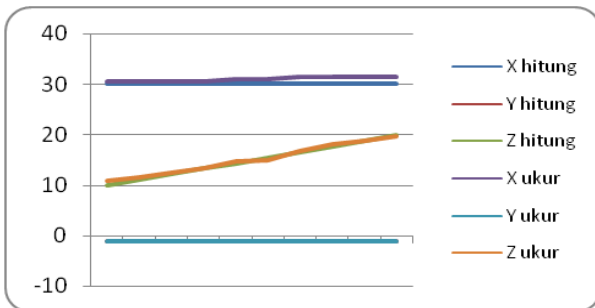


Gambar 20. Perbandingan perubahan sudut joint kinematika balik variasi sumbu Y.

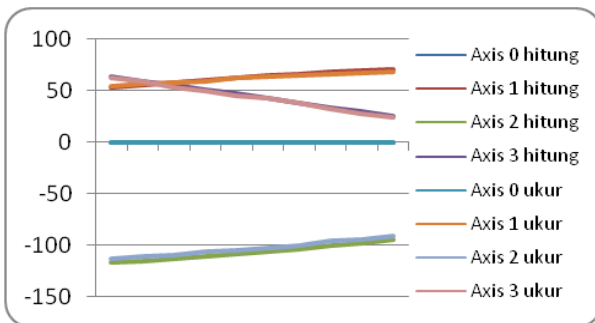
3.3.3 Pengujian pada sumbu Z

Pengujian pada sumbu Z dilakukan dengan cara menggerakkan end effector dari koordinat X=30 Y=0 Z=10 ke koordinat X=30 Y=0 Z=20. Data sebenarnya dicuplikkan setiap 50ms sedangkan waktu yang diberikan adalah lima detik. Gambar 25 dan 26 menunjukkan hasil dari pengujian yang diberikan.

Dari semua data pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa robot lengan mampu mengikuti lintasan pada sumbu Z yang diberikan. Adanya eror disebabkan karena tidak adanya sensor tambahan untuk menghitung sudut dan dikarenakan variabel dinamis dari lengan robot.



Gambar 21. Perbandingan perubahan koordinat 3 dimensi end effector variasi sumbu Z.



Gambar 22. Perbandingan perubahan sudut joint kinematika balik variasi sumbu Z.

4. Kesimpulan

Lengan robot mampu mengikuti lintasan (*Trajectory Planning*) yang diberikan berupa lintasan garis lurus. Nilai sudut yang dibentuk motor servo pada *joint* lengan robot mengalami osilasi atau eror terhadap sudut yang dihitung. Dimana nilai terbaik dengan eror rata-rata terkecil dihasilkan pada axis 3 sebesar -0.276470588° , sedangkan nilai rata-rata terbesar dihasilkan pada axis 2 sebesar 1.022222222° . Nilai koordinat 3 dimensi yang dibentuk dari metode kinematika balik untuk sumbu X nilai eror terkecil adalah sebesar 1,5cm, untuk sumbu Y adalah 0,5cm, dan untuk sumbu Z sebesar 0,5cm. Untuk nilai eror terbesar untuk sumbu X adalah sebesar 3 cm, sumbu Y sebesar 2,5cm, dan sumbu Z sebesar 1cm. Penambahan sensor untuk mengukur sudut tiap *joint* akan mampu meningkatkan ketelitian dari pergerakan lengan robot.

Referensi

- [1] Afandi, Moh. Imam. *Simulasi Pergerakan Trajectory Planning Pada Robot Lengan Anthropomorphic*. Puslit KIM-LIP, Tangerang, 2009.
- [2] Pitowarno, Endro. 2006. *Robotika, Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*. Penerbit Andi: Yogyakarta.
- [3] ----, *Pemodelan Robot Manipulator*, <http://learncontrol.wordpress.com>, Juli 2009.
- [4] ----, *ATMEGA 8 Data Sheet* <http://www.atmel.com>.
- [5] Budiharto, Widodo, *Membuat Robot Cerdas*, Penerbit Elex Media Komputindo, Jakarta, 2006.
- [6] Wardhana L. 2006. *Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR Seri ATmega8535 Simulasi, Hardware dan Aplikasi*. Penerbit Andi: Yogyakarta.
- [7] Xiao, John, *Kinematics of Robot Manipulator*, City College of New York.
- [8] Xiao, John, *Robot Sensing and Sensors*, City College of New York.
- [9] Y. Shen, K. Häuper. *Optimal Joint Trajectory Planning for Manipulator Robot Performing*. Department of Information Engineering Australian National University. Australia.
- [10] Annin, Dale. *Appllication of 4dof Anthromorphic Robot Arm to Output of Digital Raster Images Using Ordinary Human Tools*. Departement of Electrical and Computer Engineering Ryerson University, Canada, 2009.