

IMPLEMENTASI PERSAMAAN KINEMATIK MAJU PADA ROBOT MANIPULATOR

Oleh:
Herizon¹, Ade Diana²

¹Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang

²Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang

Abstract

Robot is one technology that is being developed at this time. Robot manipulators are widely used in industry, especially robotic arm that has a certain degree of freedom. The problems that occurred in the robot arm is the accuracy in determining the position of the object to be moved. This study aims to apply the method forward kinematics equation modeling on the movement of the robot manipulator in particular robot arm 3 degrees of freedom (DOF) equipped with a gripper which serves to clamp and move the object. The method used in this study is an experimental method in phases: the design of hardware and software, interconnect hardware and software in the system of movement of the robot. Joints actuator using servo motors. Manipulator control system is used to adjust the angular position of each joint with CodeVisionAVR programming language that is sent in parallel to the motor driver so as to produce pulses to move the bike. Forward kinematics equation modeling using trigonometric equations. Forward kinematics modeling applications on the movement of the robot arm that is used to provide information about the value of the angle and the coordinates of each joint. Results of testing the hardware controlled by software to show the error (error) the movement of each joint is varied by between 0.06% - 2.567%.

Keywords: robot manipulator, DOF, forward kinematics, error, joint

PENDAHULUAN

Robot industri umumnya merupakan suatu robot lengan (*arm robot*) yang dirancang untuk berbagai keperluan industri. Robot lengan dapat melakukan dua gerakan yaitu gerakan berputar (rotasi) dan memanjang atau memendek (*translation* atau *prismatic*). Satu sisi lengan yang disebut sebagai landasan dipasang pada bidang atau meja yang diam, sedangkan sisi yang lain yang disebut ujung (*end-effector*) dapat dimuati dengan peralatan (*tool*) tertentu sesuai dengan tugas robot. Dalam bidang mekanikal, manipulator memiliki dua bagian, yaitu tangan atau lengan (*arm*) dan pergelangan (*wrist*). Pada pergelangan dapat diletakkan berbagai peralatan. Keunggulan robot lengan

dalam dunia industri yaitu memiliki tingkat ketelitian yang tinggi serta mampu bekerja 24 jam sehari.

Pemanfaatan robot lengan terutama manipulator planar untuk aplikasi di industri cukup luas. Aplikasi robot lengan akan lebih efektif jika robot tersebut memiliki derajat kebebasan lebih daripada yang diperlukan untuk melakukan tugas khusus pada *end-effector*. Jumlah DOF ditentukan oleh struktur kinematik manipulator, yang biasanya sesuai dengan jumlah *joint*.

Salah satu kegunaan robot lengan dalam dunia nyata adalah robot yang mampu memindahkan objek dari suatu tempat ke tempat lain. Salah satu faktor permasalahan utama dari robot lengan ini adalah dibutuhkan ketelitian dalam

menentukan posisi dari objek yang akan dipindahkan. Salah satu perhitungan yang dapat digunakan adalah perhitungan *forward kinematics*. Perhitungan *forward kinematics* merupakan suatu perhitungan yang mana sudut gerak dari lengan robot sudah ditentukan kemudian dapat dicari posisi akhir lengan robot.

Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan metode kinematika maju pada robot manipulator 3 derajat kebebasan untuk menentukan posisi dari objek yang akan diambil dan posisi akhir objek yang dipindahkan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dibidang kendali. Robot lengan ini diharapkan dapat digunakan pada praktikum di laboratorium kendali Politeknik Negeri Padang.

Robot lengan ini dapat dimanfaatkan pada dunia industri untuk mempermudah pengerjaan dalam proses produksi.

TINJAUAN TEORITIK

Sistem robot mengadopsi pergerakan lengan manusia, yang terdiri dari pangkal bahu, lengan, sendi dan telapak tangan. Pada dunia industri sistem ini banyak dipakai untuk memindahkan benda dari satu tempat ke tempat lain.

Lengan robot (*arm robot*) terdiri dari rangkaian benda pejal/kaku, yaitu :

1. Dasar (*base*)
2. Lengan (*link*)
3. Sendi (*joint*)
4. *end-effector*, dapat berupa pencengkeram (*gripper*) dan peralatan (*tool*)



Gambar 1. Lengan Robot

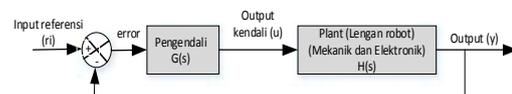
Definisi derajat kebebasan adalah banyaknya arah bebas yang menyebabkan *end-effector* lengan robot dapat bergerak. Setiap pasangan *joint* dan *link* menyatakan 1 derajat kebebasan. Jika ada N pasangan *joint* dan *link* maka ada N derajat kebebasan dengan *link* ke-0 yang melekat pada *base* tidak dipertimbangkan sebagai bagian dari lengan robot.

Kinematika Lengan Robot

Robot dapat dianalisis dalam dua kajian, yaitu analisa kinematik dan analisa dinamik. Analisa kinematik berkaitan dengan gerakan robot tanpa memandang efek inersia yang terjadi ketika robot melakukan gerakan, sedangkan analisa dinamik berhubungan dengan efek inersia dari struktur robot secara fisik hasil dari gerakan yang ditimbulkan oleh torsi aktuator ketika robot sedang melakukan pergerakan.

Pemodelan Matematika Sistem Robotik

Sistem robot secara umum terdiri dari sistem pengendali, elektronik dan mekanik robot.



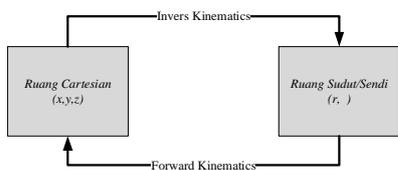
Gambar 2. Diagram sistem robot (Widodo. B: 2014)

$G(s)$ adalah persamaan matematik pengendali sedangkan $H(s)$ adalah persamaan sistem robot secara fisik termasuk aktuator dan sistem elektronik. Komponen r_i adalah referensi input yang dalam aplikasinya dapat berupa acuan posisi kecepatan dan akselerasi. Komponen e adalah *error* dan komponen u adalah output dari kontroler. Output y adalah fungsi gerak robot yang diharapkan selalu sama dengan acuan (gerak) yang didefinisikan pada input r_i .

Model Matematika Kinematika Lengan Robot

Untuk menentukan posisi atau sudut dari robot lengan maka dibutuhkan suatu

perhitungan kinematik. Kinematik dalam robotik adalah suatu bentuk pernyataan yang berisi tentang deskripsi matematik geometri dari suatu struktur robot. Dari persamaan kinematik dapat diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu obyek. Dengan analisa kinematik, programmer dapat menentukan referensi input yang harus diberi ke aktuator agar robot dapat melakukan gerakan untuk mencapai posisi yang dikehendaki.



Gambar 3. Transformasi *inverse kinematics* dan *forward kinematics* (K.S.FU:1987)

Secara umum analisis kinematika terbagi menjadi 2 yaitu:

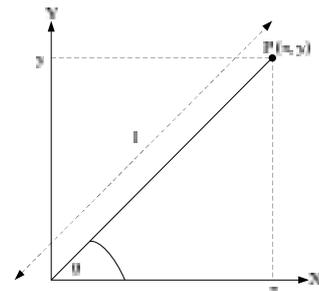
1. *Inverse Kinematics*, digunakan untuk mencari ruang sudut (r, θ) robot agar mencapai posisi (x, y, z) yang ditentukan.
2. *Forward Kinematics*, digunakan untuk mencari posisi (x, y, z) lengan robot dari ruang sudut (r, θ) yang telah ditentukan.

Penggunaan Persamaan Trigonometri

Analisis persamaan kinematika dapat diselesaikan dengan cara paling dasar yaitu menggunakan persamaan trigonometri. Setiap komponen dalam koordinat (x, y, z) dinyatakan sebagai transformasi dari tiap-tiap komponen ruang sudut (r, θ) . Jari-jari r dalam persamaan sering ditulis sebagai panjang lengan atau *link*. Untuk koordinat 2 dimensi komponen z dapat tidak dituliskan.

1. Kinematik robot tangan satu sendi

Diketahui sebuah robot lengan satu sendi seperti gambar di bawah ini:



Gambar 4. Konfigurasi robot tangan satu sendi (Pitowanto; 2006)

Dimana:

- l = panjang lengan
- θ = sudut yang dibentuk oleh panjang lengan dan sumbu x

Kedudukan ujung lengan $P(x, y)$ dapat diperoleh dengan :

$$x = r \cdot \cos \theta \dots \dots \dots (1)$$

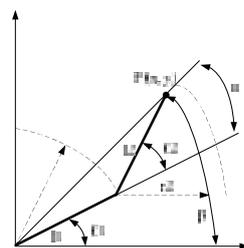
$$y = r \cdot \sin \theta \dots \dots \dots (2)$$

Jika (x, y) diketahui maka dapat dihitung dengan cara,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \dots \dots \dots (3)$$

2. Kinematik robot tangan dua sendi

Perhatikan gambar berikut:



Gambar 5. Konfigurasi robot tangan dua sendi (Pitowanto; 2006) (K.Warwick; 1988)

Dimana:

- l_1, l_2 = panjang lengan 1 dan 2
- θ_1 = sudut antara lengan 1 dan sumbu x
- θ_2 = sudut antara lengan 2 dan perpanjangan lengan 1
- r_1, r_2 = vektor lengan 1,2
- α = sudut antara perpanjangan lengan 1 dan garis yang dibentuk oleh $P(x, y)$
- β = sudut antara sumbu x dan garis yang dibentuk oleh $P(x, y)$

Kedudukan ujung lengan $P(x, y)$ dapat diperoleh sebagai berikut:

$$P(x, y) = f(\theta_1, \theta_2) \dots \dots \dots (4)$$

Jika P diasumsikan sebagai vektor penjumlahan yang terdiri dari vektor r_1 lengan-1 dan r_2 lengan-2.

$$r_1 = [l_1 \cos \theta_1, l_1 \sin \theta_1] \dots \dots \dots (5)$$

$$r_2 = [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \dots \dots \dots (6)$$

Maka,

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (7)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (8)$$

Persamaan 7 dan 8 adalah persamaan *forward kinematics* dari robot lengan 2 sendi.

Inverse kinematics robot lengan dapat dijabarkan sebagai berikut. Dengan menggunakan hukum identitas trigonometri,

$$\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b) \dots \dots \dots (9)$$

$$\sin(a + b) = \sin a \cos b + \sin b \cos a \dots \dots \dots (10)$$

Persamaan 7 dan 8 dapat ditulis kembali,

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dots \dots \dots (11)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \dots \dots \dots (12)$$

Dari kedua persamaan tersebut dapat dicari 2 terlebih dahulu dengan mengeluarkan $\cos \theta_2$ dari kedua persamaan. Dengan operasi pangkat dua pada keduanya, dan dikombinasikan diperoleh,

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \dots \dots \dots (13)$$

Sehingga

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left[\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right] \dots \dots \dots (14)$$

Perhatikan kembali gambar 5. Sudut α dapat dicari melalui,

$$\tan \alpha = \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_2 \cos \theta_2 + l_1}$$

$$\text{dan } \tan \beta = \frac{y}{x} \dots \dots \dots (15)$$

Sedangkan

$$\theta_1 - \beta = \alpha \dots \dots \dots (16)$$

Dengan menggunakan hukum identitas trigonometri,

$$\tan(b - a) = \frac{\tan(b) - \tan(a)}{1 + \tan(a) \tan(b)} \dots \dots \dots (17)$$

Diperoleh

$$\tan \theta_1 = \frac{y(l_1 + l_2 \cos \theta_2) - x l_2 \sin \theta_2}{x(l_1 + l_2 \cos \theta_2) + y l_2 \sin \theta_2} \dots \dots \dots (18)$$

Sehingga θ_1 dapat dihitung,

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{y(l_1 + l_2 \cos \theta_2) - x l_2 \sin \theta_2}{x(l_1 + l_2 \cos \theta_2) + y l_2 \sin \theta_2} \right] \dots \dots \dots (19)$$

Jika (x, y) diketahui maka dapat dihitung dengan cara seperti pada persamaan 14 dan 19.

3. Persamaan Denavit-Hartenberg Representasi Denavit-Hartenberg (D-H) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan rotasi dan translasi link-link yang saling berdekatan pada suatu lengan manipulator. Metode ini menggunakan matrik transformasi homogen 4x4 yang merepresentasikan sistem koordinat setiap link terhadap sistem koordinat link sebelumnya.

Sistem koordinat (x_i, y_i, z_i) dapat dibuat untuk setiap link pada sumbu joint, dimana $i = 1, 2, \dots, n$ (n = jumlah derajat kebebasan). Karena sumbu rotasi hanya mempunyai 1 derajat kebebasan, maka setiap kerangka koordinat (x_i, y_i, z_i) dari lengan robot berhubungan dengan joint $i+1$ dan terletak pada link I yang tetap. Karena sistem koordinat ke- i terletak pada link i , maka saat terjadi pergerakan maka sistem koordinat ini akan ikut bergerak bersama-sama dengan link i . Sehingga kerangka koordinat ke- n bergerak bersama link ke- n . Koordinat basis yang bersifat tetap didefinisikan sebagai kerangka koordinat ke-0 (x_0, y_0, z_0) yang merupakan kerangka koordinat awal dari lengan robot.

Setiap kerangka koordinat ditetapkan dan dibuat berdasarkan 3 aturan :

1. Sumbu Z_{i-1} terletak sepanjang sumbu gerak dari joint ke- i .
2. Posisi sumbu X_i normal terhadap sumbu Z_{i-1} , dan dimulai dari titik normalnya.
3. Sumbu Y_i menyesuaikan kedua sumbu sebelumnya dengan menggunakan aturan tangan kanan.

Representasi D-H dari link-link manipulator tergantung pada 4 parameter geometrik yang terdapat pada setiap link. Keempat parameter tersebut adalah a_i, α_i, d_i , dan θ_i .

Langkah-langkah pembentukan matrik D-H pada suatu manipulator adalah sebagai berikut :

1. Beri nomor setiap link dan joint. Base yang tetap (*stationary base*) dijadikan sebagai link ke-0 sedangkan *end-effector* sebagai link ke-n. Di sini link *i* bergerak terhadap link *i-1* .
2. Buat sistem koordinat link-link untuk setiap joint berdasarkan aturan
 - Sumbu Z_{i-1} dipilih sepanjang sumbu gerak dari joint *i*. Untuk revolute joint, link *i* berotasi terhadap link *i-1* pada sumbu Z_{i-1} sebesar θ_i . Sedangkan untuk prismatic joint, link *i* bergeser relatif terhadap link *i-1* sepanjang sumbu Z_{i-1} sebesar d_i .
 - Sumbu X_i dipilih tegak lurus terhadap sumbu Z_{i-1} . Jika Z_i dan Z_{i-1} tidak berpotongan, maka sumbu X_i berada sepanjang titik normal dari Z_i dan Z_{i-1} dan arahnya ditentukan mulai dari Z_{i-1} menuju Z_i .
 - Sumbu Y_i dipilih untuk melengkapi sistem koordinat di atas sesuai dengan aturan

3. Penentuan parameter joint dan link (θ_i , d_i , r_i dan a_i)
4. Tentukan matrik transformasi homogen untuk joint ke-*i*

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} C_{i-1}^i & a_{i-1}^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (20)$$

dimana

C_{i-1}^i : matrik orientasi 3x3 dari link *i* terhadap link *i-1*

$$C_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos a_i \sin \theta_i & \sin a_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos a_i \cos \theta_i & -\sin a_i \cos \theta_i \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i \end{bmatrix}$$

d_{i-1}^i : vektor translasi 3x1, menunjukkan posisi dari pusat kerangka koordinat O_{i-1}

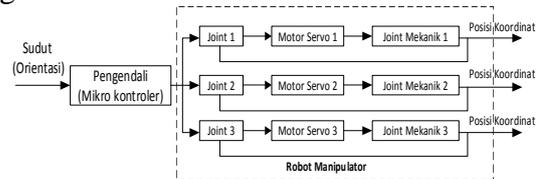
$$d_{i-1}^i = \begin{bmatrix} a_i \cos \theta_i \\ a_i \sin \theta_i \\ d_i \end{bmatrix} \dots \dots \dots (22)$$

METODE PENELITIAN

Secara umum sistem kendali pada robot manipulator terdiri atas bagian perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*), Perangkat keras berupa

perangkat masukan dan keluaran . Perangkat masukan dirancang pada program yang terdiri dari besar sudut dari tiap-tiap joint robot. Pada sisi keluaran terdiri dari motor dan 1 buah LCD 16x2 sebagai penampil data koordinat dan posisi sudut tiap-tiap joint robot. Motor yang digunakan terdiri dari 4 buah motor servo, 3 buah untuk tiap-tiap joint robot dan 1 buah sebagai penggerak *gripper* yang berfungsi untuk mengambil benda. Sistem kendali yang digunakan pada robot ini adalah mikrokontroler jenis ATmega8535 dengan dilengkapi 40 port yang bisa digunakan sebagai input maupun output. Pemilihan mikrokontroler jenis ini didasari kemampuannya yang cukup handal karena memiliki fitur ADC, pemrograman yang tidak terlalu sulit dan harganya yang relatif tidak terlalu mahal.

Blok diagram sistem robot seperti pada gambar berikut.



Gambar 6. Blok diagram pengendalian lengan robot

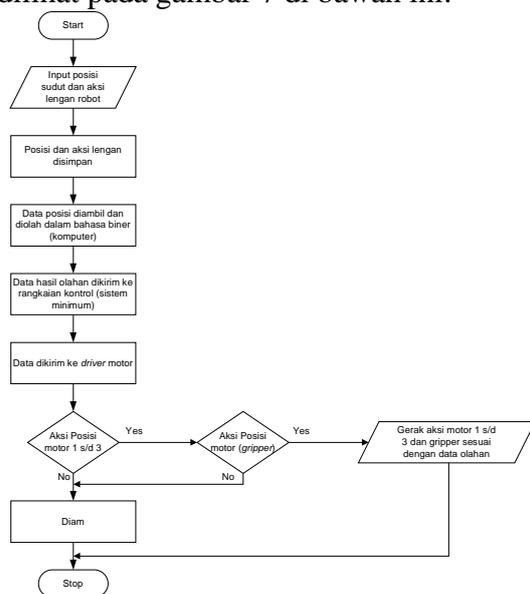
Data masukan yang digunakan untuk mengatur pergerakan lengan robot yaitu berupa posisi sudut dan ditambah dengan tugas *gripper* (mengambil benda). Data posisi sudut dan tugas *gripper* diproses melalui bahasa pemrograman, yang kemudian oleh komputer data dikirim ke *driver* motor servo. Setelah data tersebut diterima oleh *driver* motor servo, data tersebut diolah untuk menghasilkan sinyal agar dapat menjalankan motor servo.

Algoritma Kendali Robot

Robot bergerak sesuai dengan data yang diinputkan pada bahasa C (CodeVisionAVR). Data yang diinputkan berupa data posisi sudut dan aksi lengan robot. Aksi dari lengan dapat berupa gerak translasi dan rotasi, sedangkan pada ujung lengan yaitu *gripper* bergerak

secara rotasi dengan batas sudut pergerakan sebesar 90 derajat. Data posisi sudut dan aksi lengan disimpan pada bahasa C dan diolah dalam bahasa biner pada komputer. Data yang sudah diolah dikirim ke rangkaian kendali (sistem minimum), kemudian dikirim ke rangkaian driver untuk melakukan aksi dari pergerakan lengan robot. Setelah lengan bergerak, kemudian dihitung pergerakan lengan robot dengan metode *forward kinematic* dengan menginputkan nilai dari posisi sudut tiap-tiap *joint* robot dan panjang dari lengan 1 dan 2 robot saat posisi sudut sudah ditentukan. Setelah itu didapatkan data output berupa data koordinat. Data koordinat yang ditampilkan pada LCD dibandingkan dengan data yang didapat dengan perhitungan *forward kinematic*.

Diagram alir kendali robot lengan dapat dilihat pada gambar 7 di bawah ini:



Gambar 7. Flowchart sistem robot

Penyelesaian Perhitungan Pergerakan Lengan Robot

Robot dapat dianalisa dalam dua domain kajian, yaitu analisa kinematik dan dinamik. Analisa kinematik berkaitan dengan gerakan robot tanpa memandang efek inersia/kelembaman yang terjadi ketika robot melakukan gerakan,

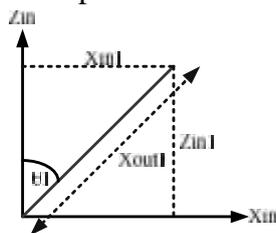
sedangkan analisa dinamik berhubungan dengan efek inersia dari struktur robot secara fisik hasil dari gerakan yang ditimbulkan oleh torsi aktuator ketika robot sedang melakukan pergerakan. Model kinematika merepresentasikan hubungan *end-effector* dalam ruang tiga dimensi dengan variabel sendi dalam ruang sendi. Persamaan kinematika maju mendeskripsikan posisi dan orientasi *end-effector* yang dinyatakan dalam posisi sendi. Sedangkan persamaan kinematika balik mendeskripsikan konfigurasi posisi sendi untuk menghasilkan posisi dan orientasi *end-effector* tertentu.

Kinematik dalam robotik adalah suatu bentuk pernyataan yang berisi tentang deskripsi matematik geometri dari suatu struktur robot. Dari persamaan kinematik dapat diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu objek. Dengan model kinematik, programmer dapat menentukan konfigurasi referensi input yang harus diumpangkan ke tiap aktuator agar robot dapat melakukan gerakan simultan (seluruh sendi) untuk mencapai posisi yang dikehendaki. Sebaliknya, informasi kedudukan (sudut) yang dinyatakan oleh tiap sendi ketika robot sedang melakukan gerakan, dengan analisa kinematik programmer dapat menentukan dimana posisi ujung lengan atau bagian robot yang bergerak itu dalam koordinat ruang.

Dalam penelitian ini pergerakan robot lengan dirancang menggunakan metode *forward kinematics* (kinematik maju). *Forward kinematics* digunakan untuk mencari posisi (x, y, z) lengan robot dari ruang sudut (r,) yang telah ditentukan. Untuk menghitung pergerakan lengan robot menggunakan *forward kinematics*, sudut dari tiap-tiap *joint* robot dan panjang dari tiap-tiap lengan robot harus ditentukan terlebih dahulu. Untuk pergerakan lengan robot dalam mengambil objek ditentukan sudut *joint* 1 (Motor 1) = 0°, sudut *joint* 2 (Motor 2) 2

= 39° dan sudut *joint* 3 (Motor 3) = 61°. Sedangkan posisi akhir untuk meletakkan benda diberikan sudut *joint* 1 (Motor 1) = 45°, *joint* 2 (Motor 2) = 39° dan *joint* 3 (Motor 3) = 61°. Panjang lengan 1 dan lengan 2 robot adalah 140 mm dan 200 mm. Analisa *forward kinematic* dapat diselesaikan dengan cara yang paling dasar yaitu menggunakan persamaan trigonometri.

Gambar 8 merupakan ilustrasi pergerakan lengan robot tampak dari atas.



Gambar 8. Ilustrasi pergerakan lengan robot tampak atas

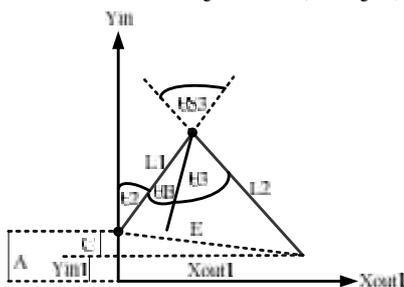
Dimana :

X1in1 = posisi koordinat lengan sepanjang sumbu x (mm)

Z1in1 = posisi koordinat lengan sepanjang sumbu z (mm)

Xout1 = panjang antara lengan 1 dan lengan 2 jika besar 1, 2 dan 3 diketahui (mm)

1 = besar sudut joint 1 (derajat)



Gambar 9. Ilustrasi pergerakan lengan robot tampak samping

Dimana :

Yin1 = posisi koordinat lengan sepanjang sumbu y (mm)

Xout1 = panjang antara lengan 1 dan lengan 2 jika besar 1, 2 dan 3 diketahui

L1= panjang lengan 1 (mm)

L2= panjang lengan 2 (mm)

A = tinggi landasan ke sumbu joint 2 (mm)

C =tinggi dari posisi motor (gripper) ke sumbu joint 2 (mm)

E = panjang dari sumbu joint 2 ke posisi motor (gripper) (mm)

2 = besar sudut joint 2 (derajat)

3 = besar sudut joint 3 (derajat)

B = sudut antara sumbu joint 3 (saat 3 = 0°) dengan ujung lengan 1 (derajat)

S3 = besar sudut antara lengan 1 dan lengan 2 (derajat)

Posisi koordinat Z1in1 dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{in1} = \cos \theta_1 \cdot X_{out1}$$

Setelah posisi koordinat Z1in1 didapat, maka posisi koordinat X1in1 dapat dicari dengan rumus berikut:

$$X_{in1} = \sqrt{X_{out1}^2 - Z_{in1}^2}$$

Besar sudut dari S3 dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\theta_{S3} = \theta_3 + \theta_B$$

B merupakan besar sudut antara sumbu joint 3 (saat 3 = 0°) dengan ujung lengan 1.

Panjang dari sumbu joint 2 ke sumbu joint gripper dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$E = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2) - \cos S_3 \times (2 \times L_1 \times L_2)}$$

Tinggi dari posisi motor (gripper) ke sumbu joint 2 adalah sebagai berikut:

$$C = \sqrt{E^2 - X_{out1}^2}$$

Sedangkan posisi koordinat Yin1 dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$Y_{in} = A - C$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

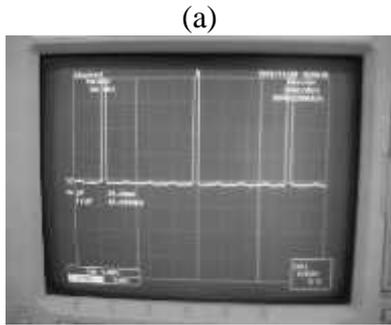
Hasil pengujian motor servo dapat dilihat pada gambar berikut:

Pengaturan osiloskop:

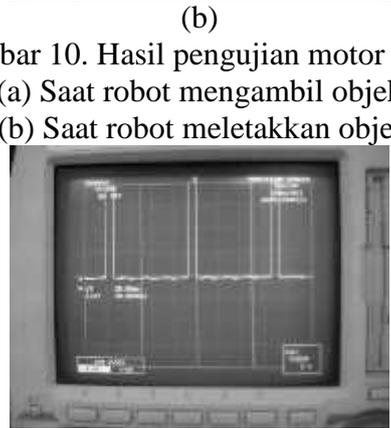
Volt/div = 5 volt/div

Time/div = 25 ms





(a)



(b)

Gambar 10. Hasil pengujian motor servo

(a) Saat robot mengambil objek

(b) Saat robot meletakkan objek



(a)



(b)

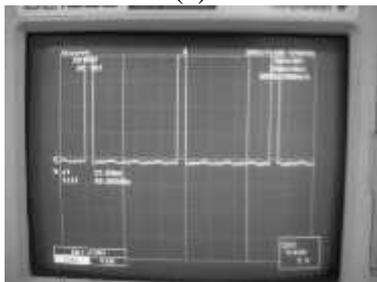
Gambar 11. Hasil pengujian motor servo

(a) Saat robot mengambil objek

(b) Saat robot meletakkan objek



(a)



(b)

Gambar 12. Hasil pengujian motor servo

(a) Saat robot mengambil objek

(b) Saat robot meletakkan objek

Tabel 1. Hasil pengujian motor servo

Posisi Motor Servo	Lebar Pulsa (ms)	Output Driver Motor Servo (Volt)
Motor Servo 1 mengambil objek	3 ms	0,4 V
Motor Servo 1 meletakkan objek	5 ms	0,7 V
Motor Servo 2 mengambil objek	8 ms	1,2 V
Motor Servo 2 meletakkan objek	9 ms	1,2 V
Motor Servo 3 mengambil objek	7 ms	1,1 V
Motor Servo 3 meletakkan objek	8 ms	1,1 V

Pergerakan Lengan Robot

Lengan robot memiliki panjang *link* 1 (L_1) 140 mm, *link* 2 (L_2) 200 mm, sehingga total panjang bentangan lengan horizontal adalah 340 mm. Ketinggian antara landasan dengan sumbu joint 2 adalah 62 mm. Sudut antara sumbu joint 3 (jika $\theta_3 = 0^\circ$) dengan ujung lengan 2 adalah 25° .

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° dan *joint* 3 (θ_3) sebesar 180° . Sedangkan untuk *gripper* jangkauan sudutnya sebesar 90° .

Nilai parameter dari sudut gerak dari tiap-tiap *joint* robot dapat diatur pada program (bahasa C) untuk mengendalikan pergerakan lengan robot.

Untuk menentukan posisi koordinat dari lengan robot, digunakan metode *forward kinematic* dimana pada kali ini digunakan rumus trigonometri.

Untuk menentukan posisi koordinat lengan robot saat mengambil objek

Diketahui besar $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 39^\circ$, $\theta_3 = 61^\circ$ dan panjang X_{out1} (panjang lengan 1 ditambah panjang lengan 2) = 235 mm. Panjang X_{out} didapatkan jika besar θ_1 , θ_2 dan θ_3 diketahui. Panjang $L_1 = 140$ mm, $L_2 = 200$ mm. Ketinggian antara landasan dengan sumbu joint 2 adalah 62 mm. Sudut antara sumbu joint 3 (saat $\theta_3 = 0^\circ$) dengan ujung lengan 1 adalah 25° . Posisi koordinat Z_{in1} dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{in1} = \cos \theta_1 \cdot X_{out1}$$

$$Z_{in1} = \cos 0^\circ \cdot 235$$

$$Z_{in1} = 235 \text{ mm}$$

Setelah posisi koordinat Z_{in1} didapat, maka posisi koordinat X_{in1} dapat dicari dengan rumus berikut:

$$X_{in1} = \sqrt{X_{out1}^2 - Z_{in1}^2}$$

$$X_{in1} = \sqrt{(235)^2 - (235)^2}$$

$$X_{in1} = 0 \text{ mm}$$

Besar sudut dari joint 3 adalah 61° , B merupakan besar sudut antara sumbu joint 3 (saat $\theta_3 = 0^\circ$) dengan ujung lengan 1, jadi besar sudut dari S_3 dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\theta_{S3} = \theta_3 + \theta_B$$

$$\theta_{S3} = 61^\circ + 25^\circ$$

$$\theta_{S3} = 86^\circ$$

Panjang dari sumbu joint 2 ke sumbu joint gripper dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$E = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2) - \cos S_3 \times (2 \times L_1 \times L_2)}$$

$$E = \sqrt{((140)^2 + (200)^2) - \cos 86^\circ (2 \times 140 \times 200)}$$

$$E = 236 \text{ mm}$$

Tinggi dari posisi motor (gripper) ke sumbu joint 2 adalah sebagai berikut:

$$C = \sqrt{E^2 - X_{out1}^2}$$

$$C = \sqrt{(236)^2 - (235)^2}$$

$$C = 21,7 \text{ mm}$$

Sedangkan posisi koordinat Y_{in1} dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$Y_{in1} = A - C$$

$$Y_{in1} = 62 - 21,7$$

$$Y_{in1} = 40,3 \text{ mm}$$

Dari hasil perhitungan didapat posisi koordinat robot lengan dengan $X_{in1} = 0$ mm, $Y_{in1} = 40,3$ mm dan $Z_{in1} = 235$ mm. X_{in1} = posisi koordinat x, Y_{in1} = posisi koordinat y dan Z_{in1} = posisi koordinat z.

Tabel 2. Hasil pengujian posisi koordinat robot lengan menggunakan metode kinematika maju

Sudut <i>joint</i> robot ($^\circ$)		Posisi koordinat robot lengan (mm)	
<i>Joint</i> 1	0°	X_{in1}	0
<i>Joint</i> 2	39°	Y_{in1}	40,3
<i>Joint</i> 3	61°	Z_{in1}	235

Menentukan posisi koordinat robot lengan saat meletakkan objek

Saat meletakkan objek posisi sudut tiap-tiap joint robot adalah sebagai berikut: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 39^\circ$ dan $\theta_3 = 61^\circ$. Sedangkan panjang X_{out2} adalah 235 mm. Panjang X_{out} didapatkan jika besar θ_1 , θ_2 dan θ_3 diketahui.

Posisi koordinat Z_{in2} dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{in2} = \cos \theta_1 \cdot X_{out2}$$

$$Z_{in2} = \cos 45^\circ \cdot 235$$

$$Z_{in2} = \cos 0,707 \cdot 235$$

$$Z_{in2} = 166,1 \text{ mm}$$

Setelah posisi koordinat Z_{in2} didapat, maka posisi koordinat X_{in2} dapat dihitung dengan cara berikut:

$$X_{in2} = \sqrt{X_{out2}^2 - Z_{in2}^2}$$

$$X_{in2} = \sqrt{(235)^2 - (166,1)^2}$$

$$X_{in2} = 166,2 \text{ mm}$$

Besar sudut dari joint 3 adalah 61° , B merupakan besar sudut antara sumbu joint 3 (saat $\theta_3 = 0^\circ$) dengan ujung lengan 1, jadi besar sudut dari S_3 dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\theta_{S3} = \theta_3 + \theta_B$$

$$\theta_{S3} = 61^\circ + 25^\circ$$

$$\theta_{S3} = 86^\circ$$

Panjang dari sumbu joint 2 ke sumbu joint gripper dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$E = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2) - \cos S_3 \times (2 \times L_1 \times L_2)}$$

$$E = 236 \text{ mm}$$

Tinggi posisi motor (*gripper*) ke sumbu joint 2 sebagai berikut:

$$C = \sqrt{E^2 - X_{out2}^2}$$

$$C = \sqrt{(236)^2 - (235)^2}$$

$$C = 21,7 \text{ mm}$$

Posisi koordinat Y_{in2} dihitung dengan rumus berikut:

$$Y_{in2} = A - C$$

$$Y_{in2} = 62 - 21,7025$$

$$Y_{in2} = 40,3 \text{ mm}$$

Dari hasil perhitungan diperoleh posisi koordinat robot lengan dengan $X_{in2} = 166,2 \text{ mm}$, $Y_{in2} = 40,3 \text{ mm}$ dan $Z_{in2} = 166,1 \text{ mm}$.

Tabel 3. Hasil pengujian posisi koordinat robot lengan menggunakan metode kinematika maju

Sudut <i>joint</i> robot ($^{\circ}$)		Posisi koordinat robot (mm)	
<i>Joint</i> 1	45 $^{\circ}$	X_{in2}	166,2
<i>Joint</i> 2	39 $^{\circ}$	Y_{in2}	40,3
<i>Joint</i> 3	61 $^{\circ}$	Z_{in2}	166,1

Dimana:

X_{in2} : posisi koordinat x

Y_{in2} : posisi koordinat y

Z_{in2} : posisi koordinat z

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa robot lengan yang dibuat dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode pemodelan persamaan kinematika maju dapat diterapkan pada robot manipulator khususnya robot lengan untuk menentukan posisi objek yang akan diambil dan posisi akhir dari objek yang dipindahkan.
2. Robot lengan dapat mengambil dan meletakkan objek.
3. Terdapat perbedaan nilai posisi koordinat saat robot lengan mengambil dan meletakkan objek dengan kesalahan (*error*) pada posisi y adalah 2,657 %. Sedangkan saat robot lengan meletakkan objek kesalahan yang terjadi pada posisi $x = 0,06 \%$, $y = 2,657 \%$ dan $z = 0,06 \%$.

Saran

Tindak lanjut penelitian dimasa yang akan datang, agar mendapatkan ketelitian yang lebih baik, maka pemodelan persamaan kinematika maju pada robot lengan harus memperhitungkan model dinamika sehingga diperoleh perilaku sistem kendali yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Budianto, Hary, 2007, *Robot dengan Sistem Pendeteksi Sensor Garis Putih dan Hitam Untuk Mengangkat Barang*, Tugas Akhir, Fisika Instrumentasi, Medan.
2. Budiharto, W, 2014, *Robotika Modern Teori dan Implementasi*, edisi revisi, Andi Yogyakarta.
3. Herizon, 2001, *Kinematika Robot*, LPIU Due Like, PNP.
4. Indrayanto, Andes, 2006, *Aplikasi Mikrokontroler Atmel 90s8515 Sebagai Pengatur Pada Robot Penyeleksi dan Pemindah Barang*, Tugas Akhir, Teknik Elektro Undip, Semarang.
5. K.S.FU cs, 1987, *Robotics, control sensing, vision, and inteligent*, Mc. Graw-Hill international edition,. New York.
6. K. Warwick, 1988, *Robot Control Theory and Aplication*, Peter Pertegninus.Ltd, London, United Kingdom
7. Pitowarno, Endra, 2006, *Robotika Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*, Edisi pertama, Andi Yogyakarta.
8. Willayem, 2012, "Aplikasi Robot dalam Bidang Industri.