

## Trajectory Planning Pada Robot Lengan 3 DOF

Erni Puspita Sari<sup>1</sup>, Farrady Alif Fiolana<sup>1</sup>, Diah Arie Widhining Kusumastutie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Kediri, Kediri

Jl. Sersan Suharmaji No. 38, Manisrenggo, Kec. Kota, Kota Kediri Jawa Timur, Kode Pos : 64128, Indonesia  
E-mail: ernip68@gmail.com ; farradyalif@uniska-kediri.ac.id ; diahariewk@uniska-kediri.ac.id

### Abstrak

Robot lengan adalah robot lengan yang menyerupai lengan manusia dengan keunggulan yaitu pekerjaan dapat terselesaikan dengan cepat, tepat, dan ketelitian yang tinggi. Robot lengan ini memiliki 3 derajat kebebasan (DOF) dengan titik pergerakan pada sumbu x, y, dan z yang menggunakan 3 motor stepper sebagai penggerakannya. Untuk menghasilkan pergerakan robot lengan dilakukan cara dengan menentukan gambar yang telah diinginkan, melakukan perencanaan gerak robot (*trajectory planning*), dari perencanaan tersebut dihitung menggunakan metode *invers kinematic* analisa trigonometri untuk mendapatkan solusi pergerakan perpindahan dari titik satu ke titik lainnya agar posisi *end-effector* terpenuhi. Untuk membuat garis vertical yang presisi sudut yang berubah adalah sudut 1 dan 2, dibutuhkan perubahan sudut 1 sebesar  $3,2^\circ$  dan sudut 2 sebesar  $5,3^\circ$  setiap langkahnya. Sedangkan jika menggunakan ketentuan motor stepper perubahan setiap sudut sebesar  $1,8^\circ$  setiap langkahnya, namun hasil yang didapat tidak presisi. Dari perbandingan kedua ketentuan tersebut diperoleh *error* sebesar 4,8777868 mm. Untuk membuat garis horizontal menggunakan 3 perubahan sudut, perubahan sudut 1 sebesar  $0,25^\circ$ , sudut 2 sebesar  $0,35^\circ$ , dan sudut 3 sebesar  $2,27^\circ$ . Sedangkan jika menggunakan ketentuan motor stepper dengan perubahan setiap sudutnya sebesar  $1,8^\circ$ , maka menghasilkan garis yang tidak presisi. Dari perbandingan kedua ketentuan tersebut diperoleh *error* sebesar 0,653056 mm.

**Kata Kunci:** Robot Lengan, Invers Kinematik, Perubahan Kecepatan Sudut

### Abstract

The robotic arm is a human-like robot arm with the advantage of completing tasks quickly, accurately, and high precision. This robotic arm has 3 DOF with movement points on the x, y, and z axes using 3 stepper motors as its drivers. To generate the movement of the robotic arm, the desired image is determined, and robot motion planning is performed. From this planning, inverse kinematic methods with trigonometric analysis are used to calculate the displacement movement solution from one point to another to fulfill the end-effector position. For writing a precise vertical line, the changing angles are angle 1 and 2, with angle 1 requiring a change of  $3,2^\circ$  and angle 2 is  $5,3^\circ$  for each step. If stepper motor specifications are used, the angle changes are  $1,8^\circ$  for each step, resulting in imprecise outcomes. The comparison of these two conditions yields an error of 4,8777868 mm. For writing a horizontal line using 3 angle changes, angle 1 requires a change of  $0,25^\circ$ , angle 2 is  $0,35^\circ$ , and angle 3 is  $2,27^\circ$ . If stepper motor specifications are used with a change of  $1,8^\circ$  for each angle, it produces imprecise lines. From these two conditions produce an error of 0,653056mm.

**Keywords:** Arm Robot, Inverse Kinematic, Change in Angular Speed

### I. PENDAHULUAN

Pada zaman sekarang segala hal di dunia sudah semakin maju, terutama dalam dunia teknologi. Di sebuah industri sudah banyak menggunakan robot sebagai tenaga kerjanya. Mulai dari pengepakan, pemilihan bahan, bahkan dalam hal memasak. Hingga di dunia pendidikan juga sudah mulai menggunakan teknologi robot sebagai alat bantu pembelajaran.

Untuk saat ini jenis robot yang sering digunakan dalam sebuah industri adalah *arm robot* atau sering disebut dengan robot lengan yang menyerupai bentuk lengan manusia [1]. Jenis robot ini banyak digunakan karena memiliki sifat fleksibel sehingga mudah digunakan dalam sebuah pekerjaan yang membutuhkan

hasil yang cepat dan tepat, serta memiliki ketelitian yang tinggi. Robot memiliki jumlah derajat kebebasan, derajat kebebasan adalah jumlah arah yang *independent* dimana *end-effector* dari sebuah robot dapat bergerak [2]. Penelitian terfokus pada gerakan robot lengan 3 derajat kebebasan yang pada setiap sendi (*joint*) memiliki gerak putar pada sumbu X, Y, dan Z [3].

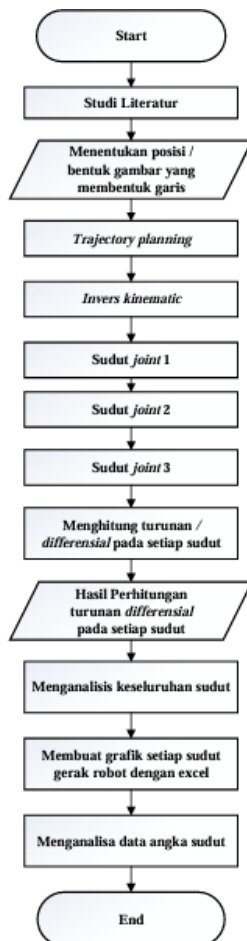
Dengan kemajuan teknologi tersebut, sarana pendidikan dapat mengikuti kemajuannya dengan menunjang materi menggunakan robot lengan yang mampu melakukan gerakan menggambar tiruan yang telah ditentukan seperti menggambar garis atau bentuk gambar dua dimensi. Gerak robot lengan ini diharapkan sama dengan gerak lengan manusia yang

memperhitungkan titik koordinat awal ke titik akhir penggambaran yang presisi.

Pada tahun 2022, Zen Nurkholik membuat alat rancangan bangun lengan robot *arm* untuk menggambar menggunakan invers kinematik. Robot ini diciptakan sebagai alat pembelajaran mengenai robot manipulator. Namun dari rancangan alat tersebut terdapat kekurangan dalam proses cara menentukan posisi *end-effector* dan mengubah sudut pada masing-masing motor stepper agar membentuk pola gambar yang teratur. Dari kekurangan tersebut penelitian akan dilanjutkan untuk menentukan posisi *end-effector*. Untuk memenuhi kekurangan tersebut dengan menggunakan kinematika robot, studi kinematika melibatkan pergerakan rotasi dan translasi, dengan *inverse kinematic* dan *forward kinematic* memainkan peran penting dalam mencapai posisi *end-effector* [4].

## II. METODOLOGI

Diagram alir proses untuk mendesain sistem yang baik untuk proses perancangan *trajectory planning* pada robot lenga 3 DOF :



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian

Proses implementasi menggunakan metode inverse kinematic untuk menentukan sudut atau posisi dari setiap sendi berdasarkan posisi akhir dari end-effector untuk

membentuk garis vertikal dan garis horizontal, tahapan-tahapan tersebut adalah :

### A. Trigonometri

Trigonometri berasal dari bahasa Yunani yaitu “*trigonon*” yang berarti tiga sudut dan “*metron*” yang berarti mengukur [5] Trigonometri membahas mengenai sudut yang berada dalam segitiga. Nilai trigonometri dirumuskan berdasarkan perbandingan panjang sisi – sisi segitiga siku – siku. Terdapat enam nilai perbandingan trigonometri yaitu *sinus (sin)*, *cosinus (cos)*, *tangen (tan)*, *cosecan (cosec)*, *secan (sec)*, dan *cotangen (cot)* [6]. Dalam jenis-jenis segitiga terdapat banyak rumus mutlak yang dapat dijadikan dasar pengembangan pencarian nilai-nilai sudut yang tidak diketahui. Seperti, perbandingan trigonometri dinyatakan Sebagian perbandingan sisi-sisi pada segitiga siku-siku [7].

### B. Trajectory Planning

*Trajectory planning* merupakan suatu hal penting untuk merancang manipulator dan robot [8]. Perencanaan lintasan dimana “*interpolasi*” atau “*aproksimasi*” *path* atau ruang kurva dimana lengan robot yang diwakili oleh masing-masing *joint*, bergerak dari posisi awal menuju ke posisi akhir yang diinginkan (*desired path*) dengan fungsi-fungsi *polynomial* dan membangkitkan urutan nilai “*set point*” untuk pengendalian robot dari posisi awal menuju posisi yang diinginkan.

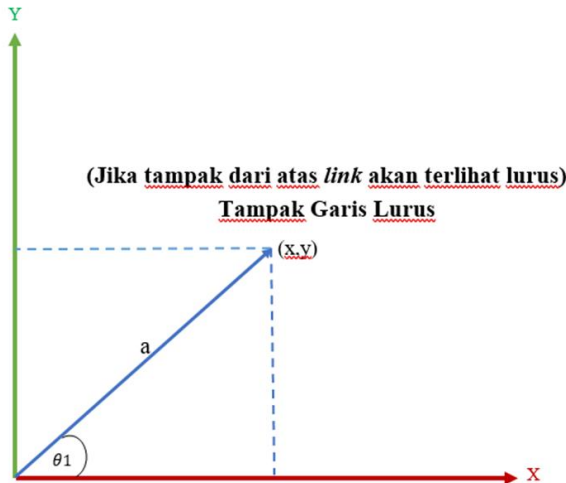
Metode perencanaan atau *trajectory* adalah ruang variabel *joint* (sendi), dimana trayektori dibentuk berdasarkan posisi, kecepatan, dan percepatan *joint* (sendi). Lalu ruang kartesian, dimana trayektori dibentuk berdasarkan posisi, kecepatan, percepatan ujung lengan robot.

### C. Inverse Kinematic

Transformasi kinematika pada perancangan sistem robot lengan ini membahas tentang hubungan antara posisi joint robot dengan posisi *end-effector* atau posisi akhir robot dalam bidang koordinat kartesian. Dalam perancangan kinematika transformasi robot lengan, terdapat beberapa hal yang perlu dilakukan. Tahap pertama adalah tahap perumusan model kinematic robot lengan yang bertujuan untuk menganalisis pergerakan dan posisi robot lengan yang berhubungan dengan desain mekanik lengan dan dilanjutkan dengan menggunakan metode model *inverse kinematic* sebagai control gerak. Terdapat tiga metode paling terkenal untuk memecahkan masalah kinematika ini, yang pertama, metode numerik, kemudian metode aljabar, dan metode geometrik [9]. Namun yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode aljabar. Persamaan invers kinematik memberikan parameter tiap *joint* robot untuk posisi dan orientasi *end of effector* yang diberikan atau diinginkan. Dalam penerapan *inverse kinematic* memiliki kesulitan tersendiri untuk mentransformasikan posisi dan orientasi robot menjadi posisi revolusi *joint* robot menggunakan *inverse kinematic* [10].

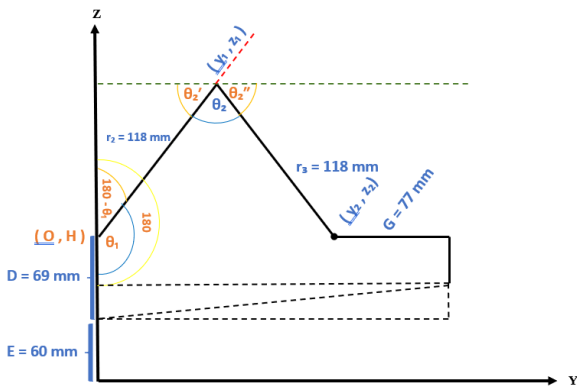
Bentuk lengan robot yang akan diteliti adalah 3D printing, jadi akan memiliki koordinat sudut berupa (x, y, z) dalam menghitung invers kinematik adalah dengan koordinat

kartesian. Peneliti akan membuat 2 koordinat kartesian, karena robot 3D akan diidentifikasi dalam 2 sudut pandang, yaitu sudut pandang grafik tampak dari atas dan grafik tampak dari samping. Untuk grafik tampak dari atas yang akan terlihat adalah koordinat sumbu x dan sumbu y, sedangkan grafik tampak dari samping yang akan terlihat adalah koordinat sumbu x dan sumbu z. Dibawah ini merupakan gambar dari koordinat kartesius jika dilihat secara 3D / dari segala arah :



Gambar 2. Grafik koordinat kartesia robot 3D

Grafik tampak atas yang terlihat hanya sumbu x dan sumbu y. Dengan terbentuknya sudut  $\theta_3$  diantara link dan poros sumbu x, dari tampak atas ini dapat dianalisa gerak robot memutar.



Gambar 3. Grafik tampak samping dengan poros (0,0)

$$\begin{aligned} \theta_2' &= 180^\circ - (90^\circ + (180^\circ - \theta_1 \text{ rad})) \\ &= 180^\circ - (270^\circ - \theta_1 \text{ rad}) \\ \theta_2' &= \theta_1 \text{ rad} - 90^\circ \end{aligned} \quad (3.1)$$

Dan

$$\begin{aligned} \theta_2'' &= 180^\circ - (\theta_2 \text{ rad} + \theta_2' \text{ rad}) \\ &= 180^\circ - (\theta_2 \text{ rad} + (\theta_1 \text{ rad} - 90^\circ)) \\ &= 180^\circ + 90^\circ - (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\ \theta_2'' &= 270^\circ - (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

- Gerak lengan robot pada dof ke-2  
Gerakan lengan robot pada dof ke-2 yang berada pada koordinat sumbu (y,z) didapat persamaan:

Pada sumbu y :

$$\begin{aligned} y_1 &= r_2 \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} - 90^\circ) \\ &= r_2 \cdot (\cos 90^\circ \cdot \cos 90^\circ + \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= r_2 \cdot (\cos \theta_1 \text{ rad} \cdot 0 + \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot 1) \\ &= r_2 \cdot (0 + \sin \theta_1 \text{ rad}) \\ y_1 &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Pada sumbu z :

$$\begin{aligned} z_1 &= h + r_2 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} - 90^\circ) \\ &= h + r_2 \cdot (\sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos 90^\circ - \cos \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin 90^\circ) \\ &= h + r_2 \cdot (\sin \theta_1 \text{ rad} \cdot 0 - \cos \theta_1 \text{ rad} \cdot 1) \\ &= h + r_2 \cdot (0 - \cos \theta_1 \text{ rad}) \\ &= h + r_2 \cdot (-\cos \theta_1 \text{ rad}) \\ z_1 &= h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} \end{aligned} \quad (3.4)$$

- Gerak lengan robot pada dof ke-2 dan dof ke-3  
Gerakan lengan robot pada dof ke-2 dan dof ke-3 yang berada pada koordinat sumbu (y,z) didapat persamaan :

Pada sumbu y :

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 + r_3 \cdot \cos \theta_2'' \text{ rad} \\ &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot \cos \theta_2'' \text{ rad} \\ &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot \cos(270^\circ - (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot (\cos 270^\circ \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) + \sin 270^\circ \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot (0 \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) + (-1) \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot (0 - \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot (-\sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ y_2 &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pada sumbu z :

$$\begin{aligned} z_2 &= z_1 + r_3 \cdot \sin \theta_2'' \text{ rad} \\ &= (h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}) + r_3 \cdot \sin \theta_2'' \text{ rad} \\ &= (h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}) + r_3 \cdot \sin(270^\circ - (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= (h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}) + r_3 \cdot (\sin 270^\circ \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) + \cos 270^\circ \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= (h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}) + r_3 \cdot ((-1) \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) + 0 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ &= (h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}) + r_3 \cdot (-\cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) + 0) \\ &= (h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}) + r_3 \cdot (-\cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \\ z_2 &= h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot (\cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \end{aligned} \quad (3.6)$$

- Gerak lengan robot pada dof ke-1  
Gerakan lengan robot pada dof ke-1 yang berada pada koordinat sumbu (x,y) dengan robot tampak atas maka didapat persamaan :

Pada sumbu x :

$$\begin{aligned} x &= r_1 \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \\ &= y_2 \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \\ x &= (r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Pada sumbu y :

$$\begin{aligned} y &= y_2 \\ y &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Note : ketika tampak atas garis miring yang dilihat adalah total jari-jari atau link. dan itu adalah total dari  $y_2$  yang telah dicari . jadi  $x = r_1$  atau  $y_2$ .

$$\begin{aligned} \theta_3 &= 90^\circ \\ x &= 0 \end{aligned}$$

ketika mencari koordinat (x,y) untuk mempermudah pencarian persamaan maka sudut dari persamaan diatas didapatkan persamaan akhir pada dof ke-1, dof ke-2, dan dof ke-3, yaitu :

$$x = (r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \quad (3.9)$$

$$y = r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \quad (3.10)$$

$$z = h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \quad (3.11)$$

### III. HASIL DAN ANALISIS

Hasil pada perencanaan gerak robot lengan 3 dimensi dengan menggunakan *inverse kinematic* akan digunakan untuk menghasilkan gerak pada robot. Dari analisa gerak robot dengan cara menentukan dan menghitung rumus batasan sudut pada setiap DOF untuk menghasilkan gerak pada setiap sendi. Dengan adanya rumus tersebut mempermudah perintah robot untuk menghitung rotasi atau perpindahan gerak robot dengan dilakukannya penurunan

atau *differensial* fungsi rumus tersebut. Sehingga penentuan sudut – sudut fungsi untuk membentuk perintah yang dimana dapat menghasilkan garis vertikal dan horizontal dari pergerakan *end-effector*. Batasan gerak robot lengan pada lembar kerja berbentuk persegi dengan masing - masing sisi sebesar 12 cm dan batasan sudut setiap sendi yang telah diukur manual maksimum lebar sudut sebesar 40°.

#### A. Hasil Invers Kinematik Posisi Sudut

Bentuk lengan robot yang akan diteliti adalah 3D *printing*, jadi akan memiliki koordinat sudut berupa (x, y, z) dalam menghitung invers kinematik adalah dengan koordinat kartesian.

$$\begin{aligned}x &= (r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \\y &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\z &= h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$

#### B. Hasil Batasan Sudut Pada Setiap DOF

##### 1) Dof ke-1

$$\begin{aligned}x &= (r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \\y &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$

##### 2) Dof ke- 2

$$\begin{aligned}y_1 &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \\z_1 &= h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad}\end{aligned}$$

##### 3) Dof ke- 3

$$\begin{aligned}y_2 &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\z_2 &= h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot (\cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}))\end{aligned}$$

#### C. Hasil Differensial Fungsi Pada Setiap Sudut

##### 1) Pada persamaan sumbu X

$$x = r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_2 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin \theta_2 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad}$$

Mengubah posisi sudut dengan cara menurunkan rumus posisi yang didapat pada masing-masing sudut untuk mendapatkan kecepatan perubahan posisi terhadap perubahan sudut titik koordinat x pada masing-masing sudut :

$$\begin{aligned}x(\theta_1') &= r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \cdot \cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\x(\theta_2') &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} + r_3 \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} \cdot \cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\x(\theta_3') &= r_3 \cdot \sin \theta_3 \text{ rad} \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) - r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin \theta_3 \text{ rad}\end{aligned}$$

##### 2) Pada persamaan sumbu Y

$$y = r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_2 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin \theta_2 \text{ rad}$$

Berikut adalah kecepatan perubahan posisi terhadap perubahan sudut titik koordinat y pada masing-masing sudut :

$$\begin{aligned}y(\theta_1') &= r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot (\cos \theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\y(\theta_2') &= r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$

##### 3) Pada persamaan sumbu Z

$$z = h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_2 \text{ rad} + r_3 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin \theta_2 \text{ rad}$$

Berikut adalah kecepatan perubahan posisi terhadap perubahan sudut titik koordinat z pada masing-masing sudut :

$$\begin{aligned}z(\theta_1') &= h - r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}) \\z(\theta_2') &= h - r_2 \cdot \cos \theta_1 \text{ rad} + r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$

#### D. Analisa Kecepatan Perubahan Posisi Terhadap Perubahan Sudut Setiap Koordinat

Kecepatan perubahan posisi terhadap sudut 1, sudut 2, dan sudut 3 pada koordinat X adalah :

$$\begin{aligned}\text{Kecepatan perubahan posisi (x)} &: \\&= x\theta_1' + x\theta_2' + x\theta_3' \\&= r_2 \cdot (\cos \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} + \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \cos \theta_3 \text{ rad} - \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin \theta_3 \text{ rad}) + r_3 \cdot \sin \theta_3 \text{ rad} \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$

Kecepatan perubahan posisi terhadap sudut 1 dan sudut 2 pada koordinat Y adalah :

$$\begin{aligned}\text{Kecepatan perubahan posisi (y)} &: \\&= y'(\theta_1) + y'(\theta_2) \\&= r_2 \cdot (\cos \theta_1 \text{ rad} + \sin \theta_1 \text{ rad}) - 2 \cdot r_3 \cdot \cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$

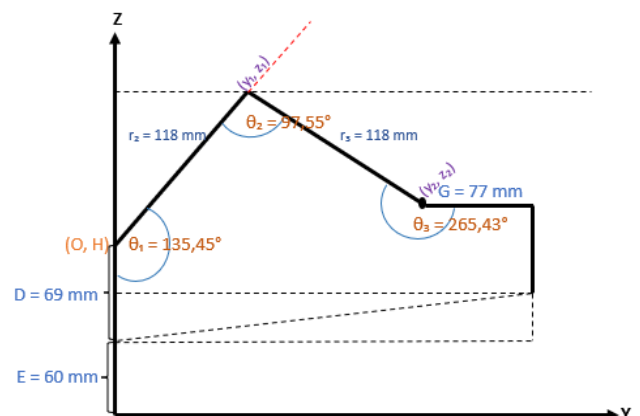
Kecepatan perubahan posisi terhadap sudut 1 dan sudut 2 pada koordinat Z adalah :

$$\begin{aligned}\text{Kecepatan perubahan posisi (z)} &: \\&= z\theta_1' + z\theta_2' \\&= 2h - r_2 \cdot (\sin \theta_1 \text{ rad} + \cos \theta_1 \text{ rad}) + 2 \cdot (r_3 \cdot \sin (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad}))\end{aligned}$$

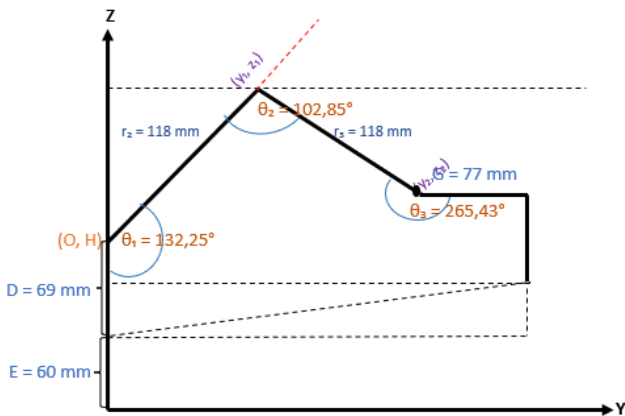
#### E. Analisa Garis Vertikal

Untuk membentuk garis vertikal, x dan z tetap sedangkan y berubah, sehingga kecepatan perubahan posisi terhadap perubahan sudut adalah sudut 1 dan sudut 2 :

$$\begin{aligned}Y(\theta_1') + y(\theta_2) &: \\&= r_2 \cdot (\cos \theta_1 \text{ rad} + \sin \theta_1 \text{ rad}) - 2 \cdot r_3 \cdot \cos (\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})\end{aligned}$$



Gambar 4. Grafik Keadaan Awal Robot Menggambar Garis Vertikal



Gambar 5. Grafik Keadaan Robot Berubah 1 Langkah Untuk Membentuk Garis Vertikal

Untuk Analisa Gerakan robot lengan secara praktek, pada keadaan awal robot lengan sebelum bergerak  $\theta_1 = 135.45^\circ$ ,  $\theta_2 = 97.55^\circ$ , dan  $\theta_3 = 265.43^\circ$ . Ketika robot bergerak 1 langkah keadaan menjadi  $\theta_1 = 132.25^\circ$ ,  $\theta_2 = 102.85^\circ$ , sedangkan  $\theta_3$  keadaan tetap. Dari keadaan tersebut 1 langkah pergerakan perubahan perpindahan sudut yang terjadi adalah  $\theta_1$  sebesar  $3.2^\circ$  atau  $0.055822$  rad dan  $\theta_2$  sebesar  $5.3^\circ$  atau  $0.0924556$  rad.

Grafik perbandingan hasil dari pengukuran beberapa masukan sudut pada setiap sendi secara praktek untuk menghasilkan garis vertikal yang lurus / presisi dan masukan sudut pada setiap sendi dengan ketentuan spesifikasi motor stepper setiap langkah dapat dilihat pada grafik dibawah ini :



Gambar 6. Grafik perbandingan garis vertikal

Jadi dapat disimpulkan bahwa terdapat kesalahan atau error yang terjadi ketika dibandingkan hasil dari perhitungan secara praktek dan secara spesifikasi fitur bawaan dari motor stepper. Dan berikut adalah grafik error yang terjadi :



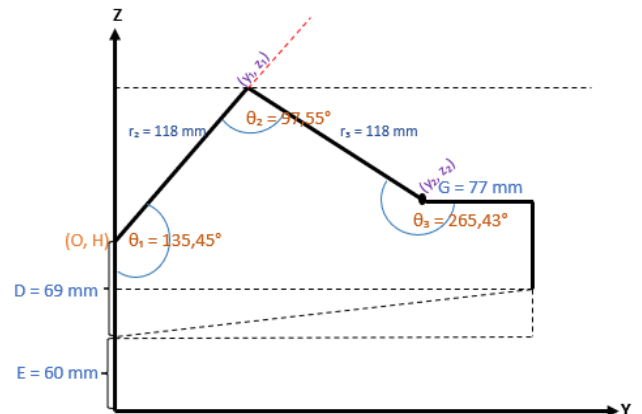
Gambar 7. Grafik error garis vertikal

#### F. Analisa Garis Horizontal

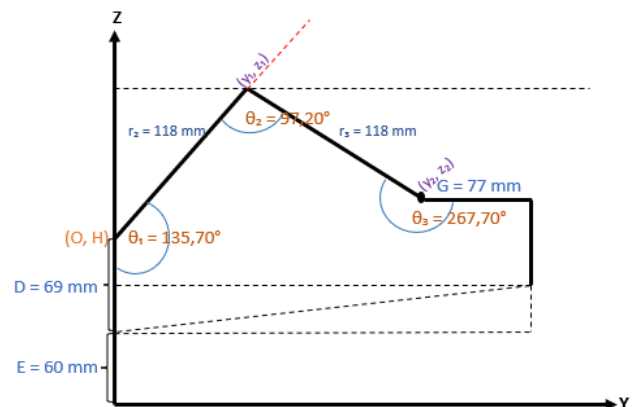
Analisa gerak lengan untuk menggambar garis horizontal dengan perubahan sudut robot lengan, pada semua sendi yang bergerak mempengaruhi koordinat (x,y,z). Kecepatan perubahan posisi terhadap perubahan sudut yang diperoleh untuk membentuk garis horizontal :

$$x(\theta_3') + y(\theta_2') + z(\theta_1')$$

$$= h + r_3 \cdot \sin \theta_3 \text{ rad} \cdot (1 + \sin(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})) - r_2 \cdot \sin \theta_1 \text{ rad} \cdot \sin \theta_3 \text{ rad} - r_3 \cdot \cos(\theta_1 \text{ rad} + \theta_2 \text{ rad})$$



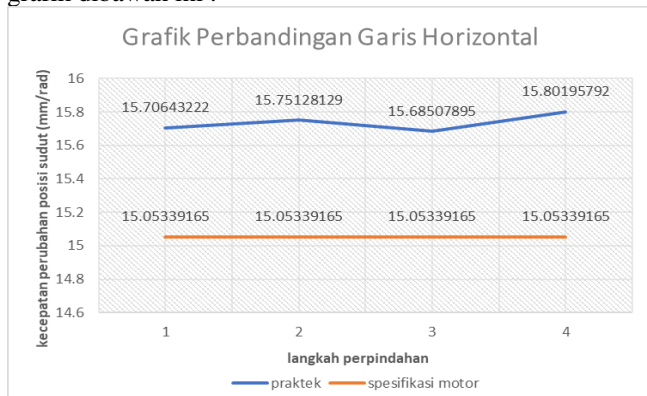
Gambar 8. Grafik Keadaan Awal Robot Menggambar Garis Horizontal



Gambar 9. Grafik Keadaan Robot Berubah 1 Langkah Untuk Membentuk Garis Horizontal

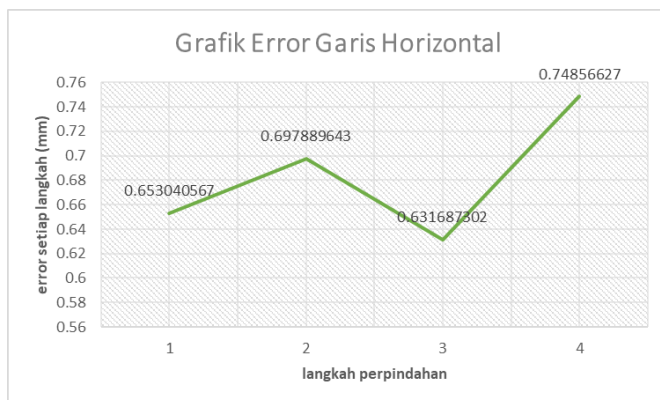
Untuk Analisa Gerakan robot lengan secara praktek membentuk garis horizontal, pada keadaan awal robot lengan sebelum bergerak  $\theta_1 = 135.45^\circ$ ,  $\theta_2 = 97.55^\circ$ , dan  $\theta_3 = 265.43^\circ$ . Ketika robot bergerak 1 langkah keadaan menjadi  $\theta_1 = 135.70^\circ$ ,  $\theta_2 = 97.20^\circ$ , dan  $\theta_3 = 267.70^\circ$ . Dari keadaan tersebut 1 langkah pergerakan perubahan perpindahan sudut yang terjadi adalah  $\theta_1$  sebesar  $0.25^\circ$ ,  $\theta_2$  sebesar  $5.3^\circ$ , dan  $\theta_3$  sebesar  $2.27^\circ$ .

Grafik perbandingan hasil dari pengukuran beberapa masukan sudut pada setiap sendi secara praktek untuk menghasilkan garis horizontal yang lurus / presisi dan masukan sudut pada setiap sendi dengan ketentuan spesifikasi motor stepper setiap langkah dapat dilihat pada grafik dibawah ini :



Gambar 10. Grafik perbandingan garis horizontal

Jadi dapat disimpulkan bahwa terdapat kesalahan atau *error* yang terjadi ketika dibandingkan hasil dari perhitungan secara praktek dan secara spesifikasi fitur bawaan dari motor stepper. Dan berikut adalah grafik *error* yang terjadi :



Gambar 11. Grafik error garis horizontal

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian untuk menentukan gerak robot lengan menggunakan invers kinematik, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

a. Untuk membuat garis vertikal dengan pengukuran secara praktek dilakukan dengan mengukur perubahan sudut dari keadaan awal ke keadaan berikutnya yaitu

sendi 1 perubahan sudut sebesar  $3,2^\circ$  dan sendi 2 berubah sebesar  $5,3^\circ$ , sedangkan untuk nilai perubahan sudut sesuai dengan spesifikasi fitur bawaan dari motor stepper yaitu nilai sendi 1 dan 2 pada setiap langkah sebesar  $1,8^\circ$  menghasilkan error kecepatan perubahan posisi terhadap sudut untuk membuat garis vertikal secara presisi sebesar  $4,8777868$  mm.

- b. Untuk membuat garis horizontal dengan pengukuran secara praktek dilakukan dengan mengukur besar nilai perubahan sudut dari keadaan awal atau diam ke keadaan berikutnya (bergerak 1 langkah) yaitu pada sendi 1 perubahan sudut sebesar  $0,25^\circ$ , sendi 2 berubah sebesar  $0,35^\circ$ , dan pada sendi 3 mengalami perubahan sudut sebesar  $2,27^\circ$ , sedangkan untuk nilai perubahan sudut sesuai.
- c. Dari hasil metode invers kinematik ini dapat dinyatakan bahwa menggunakan metode tersebut sudah baik dalam menghitung perpindahan perubahan sudut robot, namun karena mekanik robot yang tidak sempurna mengakibatkan adanya *error* masih menghasilkan *error*. Untuk menyempurnakan *trajectory planning* ini dapat dengan cara mendesain ulang mekanik robot, agar *error* yang dihasilkan lebih kecil lagi

#### REFERENCES

- [1] Z. Nurkholik, F. Alif, dan D. Arie, "Rancangan Bangun Lengan Robot Arm Untuk Menggambar Menggunakan Invers Kinematik", Jurnal Ilmiah Sistem Informasi (JUSI), vol. 1, no. 3, pp. 59-68, Nov 2022.
- [2] A. Wibowo, "Perancangan Prototype Simulasi Robot Cartesian 3 DOF", Universitas Nasional, 2021.
- [3] H. D. A. Mahendra, K. Hertavianda, L. F. Wicaksono, J. Wandu, A. Yuandari, "Rancang Bangun Lengan Robot Penggambar Bidang Datar Dua Dimensi", Konferensi Desain Industri dan Mekanik (IMDeC), vol. 2, pp. 200-207, 2020.
- [4] A. Uchrowi, Lasnadi, Sutjipto, "Pemodelan dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan V-REP", AVITEC, vol. 1, no. 1, pp. 87-97, Aug 2019.
- [5] Kristayulita. Trigonometri. Mataram: Sanabil. 2020: 1-10.
- [6] Wardoyo. Konsep Dasar Ilmu Trigonometri Mata Pelajaran Matematika. Surabaya: Shafta. 2021: 1-10.
- [7] Tanti J. Trigonometri. Yogyakarta: K-Media. 2022: 36-42.
- [8] G. Chen, N. Wei, L. Yan, H. Lu, J. Li, "Time-optimal Trajectory Planning Based on Event-trigger and Conditional Proportional Control", Plos One, Vol. 1, No. 18, pp. 1-34, Jan 2023.
- [9] I.D. Nugraha, P.M. Santika, "Pendekatan Geometri untuk Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan robot 4 Derajat Kebebasan", Jurnal Teknik Mesin – ITI, vol. 5, 2021.
- [10] F.R. Iskandar, I. Sucahyo, dan M. Yantidewi, "Penerapan Metode Invers Kinematik Pada Kontrol Gerak robot Lengan Tiga Derajat Bebas", jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI), vol. 09, pp. 64-71, 2020.