

---

---

## Analisis Kinematik Pada Robot Hexapod

Julpri Andika

Fakultas Teknik/Teknik Elektro  
Universitas Mercu Buana  
Jakarta, Indonesia  
julpri.andika@mercubuana.ac.id

Ketty Siti Salamah

Fakultas Teknik/Teknik Elektro  
Universitas Mercu Buana  
Jakarta, Indonesia  
kettysitisalamah@mercubuana.ac.id

**Abstrak**— Saat ini manipulator robot sudah sangat umum digunakan untuk berbagai macam aplikasi robot. Sehingga tidak sedikit penelitian yang membahas mengenai manipulator robot dengan 2, 3 dan lebih derajat kebebasan. Manipulator robot ini bisa digunakan untuk kaki sebuah robot berkaki, misalnya pada robot berkaki enam. Dengan menggunakan analisis kinematika pada manipulator robot dapat menentukan arah dan gerakan kakinya untuk berjalan. Penelitian ini mengambil topik mengenai kinematika pada robot manipulator dengan tiga derajat kebebasan yang digunakan sebagai kaki robot berkaki enam sebagai objek penelitian, dianalisis dan mempelajari kinematika balik dan maju. Analisis kinematik adalah dasar dari studi robot manipulator. Melalui parameter Denavit Hartenberg, persamaan kinematik balik dan maju dari kaki robot secara mekanis dapat dibentuk melalui hubungan matematis antara end-effector (titik akhir efektor) dan sudut sendi. MATLAB dan RoboAnalyzer merupakan software yang kemudian digunakan untuk membuktikan persamaan kinematik tersebut dan kemudian mengimplementasikan gerakan tripod. Hasil penelitian menunjukkan analisis kinematik yang diperkenalkan Denavit Hartenberg untuk robot manipulator dengan 3 derajat kebebasan menghasilkan persamaan kinematik. Persamaan kinematik tersebut tersiri dari kinematik balik dan maju. Persamaan tersebut kemudian diverifikasi menggunakan MATLAB dan RoboAnalyzer menunjukkan hasil matriks yang sama. Dan gerak tripod dapat diterapkan..

**Kata Kunci** — Analisis Kinematik; Hexapod; Matlab; Robot; Tripod

### I. PENDAHULUAN

Mesin berjalan telah banyak dipelajari sejak tahun 1950-an, dan banyak karya-karya penelitian telah dihasilkan pada bidang ini. Robot berjalan yang telah dibuat hingga saat ini memiliki dua, empat, enam atau bahkan delapan kaki. Penelitian mengenai robot berjalan yang ada saat ini didorong oleh oleh dua bidang aplikasi: robot humanoid berkaki dua untuk layanan atau operasi wilayah di lingkungan sekitar dan robot berkaki empat, enam dan delapan yang diharapkan dapat sebagai mesin

pencari atau penyelamat dalam skenario area yang sangat sulit dihadapi oleh manusia. Dalam skenario ini, robot berkaki enam lebih stabil daripada robot berkaki empat dan lebih rumit daripada robot berkaki delapan, dan seterusnya berbagai jenis robot berkaki enam telah dikembangkan. [1]

Hexapod robot terdiri dari enam kaki yang biasanya dikendalikan oleh dua belas atau delapan belas motor servo. Berbeda dengan robot berkaki dua dan robot hewan berkaki empat, konfigurasi hexapod menunjukkan keuntungan dari stabilitas statis selama berjalan. Alasannya adalah bahwa enam kaki memungkinkan pelaksanaan gaya berjalan dengan tiga kaki di udara dan tiga kaki yang tersisa di tanah, memberikan keseimbangan yang stabil. [2] Diantara banyak robot berjalan, robot hexapod yang telah dibuat meniru struktur tubuh dan kontrol gerakan serangga atau binatang antropoda adalah salah satu robot berkaki enam yang paling khas. Dengan struktur tubuh seperti itu, robot dapat bergerak maju dengan berbagai jenis gaya berjalan dan beradaptasi dengan kecepatan dan beban yang berbeda. Dan karena ada ekstremitas berlebihan, hexapod robot dapat terus berjalan jika salah satu kaki hilang. Keuntungan ini membuatnya kompeten untuk beberapa karya otonom dan kehandalan tinggi, seperti bidang pemandu lapangan, pencarian bawah air, dan menjelajah ruang. [3]

Banyak penelitian yang menjelaskan robot manipulator dengan 3 derajat kebebasan yang dapat digunakan sebagai kaki dari hexapod. Dengan dua atau tiga sendi putar mirip dengan lengan manipulator robot. Dari lengan manipulator dapat digunakan untuk menentukan arah dan gerakan. Untuk menentukan arah dan gerakan robot lengan diperlukan analisis kinematika maju dan balik. Kinematika maju adalah proses penentuan orientasi dan posisi akhir-efektor berdasarkan masukan besarnya sudut sendi. Sedangkan kinematika balik berlawanan dengan kinematika maju, penentuan besarnya sudut sendi ditentukan oleh posisi akhir-efektor.

Dalam penelitian ini, saya menganalisis kinematika maju dan balik dengan menggunakan Konvensi Denavit-Hartenberg [4][5] pada manipulator lengan dengan 3 derajat kebebasan. Kemudian persamaan tersebut diujicoba menggunakan 2 buah software yaitu Matlab dan RoboAnalyzer. Keduanya digunakan untuk menguji persamaan kinematika maju dan

balik. Serta cara menerapkan gaya berjalan tripod untuk robot berkaki enam.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa penelitian telah dilakukan seperti Atique & Ahad [6] merancang dan menciptakan struktur berbentuk kaki robot 3 derajat kebebasan. Kemudian mereka menyimpulkan solusi Kinematika maju dan balik Konvensi Denavit-Hartenberg dan dengan solusi itu, simulasi perangkat lunak dirancang untuk memprediksi pergerakan dan juga untuk mengendalikan struktur robotik. Hasilnya adalah mereka bisa mengendalikan struktur robot dengan solusi kinematika balik dan untuk membuktikan sistem kontrol, mereka memasang dua struktur robotik pada sebuah mobil untuk menggerakkan mobil tersebut dan eksperimen ini berhasil terutama untuk permukaan datar. Dengan kaki robotik tersebut, mobil dapat bergerak dengan kecepatan sekitar 0.48 feet/second. Permukaan kasar tidak sesuai untuk struktur saat ini karena mobil yang mereka gunakan, tidak dibuat untuk situasi permukaan yang kasar. Juga motor servo yang mereka gunakan, hanya bisa memberi sedikit torsi, yang tidak cukup untuk menggerakkan mobil di area permukaan yang sulit. Tapi struktur seperti ini akan sangat membantu jika dibuat dalam skala besar dan dengan struktur yang lebih baik sehingga bisa membantu pergerakan mobil dalam situasi seperti roda mobil macet di jalan berlumpur atau di permukaan yang kasar. Kemudian ada Utomo et al [7] menyajikan robot simulator dengan 5 derajat kebebasan yang bisa dijadikan alat demonstrasi di bidang pendidikan. Untuk membuat link simulator, mereka menggunakan mesin pemotong laser akrilik agar lebih presisi memotongnya. Gerakan motor servo dikendalikan dengan menggunakan program yang dibuat menggunakan LabVIEW. Kesalahan posisi sudut motor servo dikoreksi dengan menggunakan fungsi program numerik perkalian dan numerik pembagian pada LabVIEW. Analisis kinematika maju dan balik menggunakan perangkat lunak MATLAB sebagai alat untuk menghitung dan mereka menggunakan verifikasi dengan perangkat lunak RoboAnalyzer. Untuk perhitungan kinematika maju diperlukan notasi Parameter Denavit-Hartenberg yang akan menghasilkan orientasi dan posisi efektor-akhir. Orientasi dan posisi diperoleh dengan mentransformasi matriks. Kemudian kinematic balik diperoleh dengan melakukan penurunan transformasi matriks sehingga diperoleh sudut pada masing-masing sambungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan desain dan pembuatan simulator robot lengan dengan 5 derajat kebebasan, mereka berhasil merancang robot lengan simulator 5 derajat kebebasan yang dibuat dari bahan akrilik menggunakan perangkat lunak SolidWorks dan CorelDraw 12, panel depan menghubungkan LabVIEW

dengan mikrokontroler Arduino dimana motor servo dapat dipindahkan secara manual.

### A. MATLAB

MATLAB merupakan sebuah bahasa pemrograman dengan (high-performance) kinerja tinggi untuk komputasi mengenai permasalahan teknik. Matlab menggabungkan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam suatu model yang sangat mudah untuk pakai, dimana masalah-masalah dan penyelesaiannya gambarkan dalam notasi matematika yang mudah dikenal.

### B. ROBOANALYZER

RoboAnalyzer merupakan software model 3D yang dapat digunakan untuk mengajar dan mempelajari konsep-konsep robotika. Software ini dikembangkan di laboratorium Mekatronika, Departemen Teknik Mesin IIT Delhi, India, di bawah bimbingan Prof. S.K. Saha dalam rangka mendukung bproses belajar-mengajar mengenai topik yang dibahas di dalam bukunya yang berjudul "Pengenalan Robotika" diterbitkan oleh Tata McGraw Hill, New Delhi.

### C. PARAMETER DAN KONVENSI DH

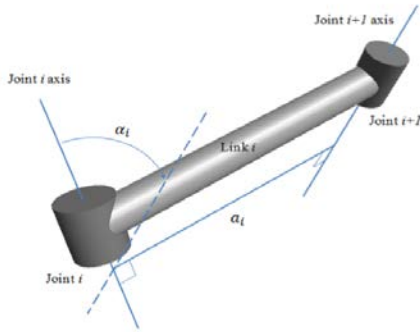
Jacques Denavit dan Richard Hartenberg [4][8][9] memperkenalkan berbagai konsep kunci dari kinematic untuk manipulator serial-link pada penelitian mereka di tahun 1955 (Denavit dan Hartenberg 1955) dan teks klasik terakhir mereka mengenai hubungan sintesis kinematika (Hartenberg dan Denavit 1964).

Ini adalah sebuah konvensi yang digunakan untuk memberikan sistem koordinat setiap link manipulator. Koordinat system yang diberikan sesuai dengan peraturan berikut:

- Asal mula sistem koordinat  $i$  berada di titik potong sumbu sendi  $i + 1$  dan garis normal anatar sumbu sendi  $i$  and  $i + 1$ .
- Sumbu  $z_i$  sejajar dengan sumbu sendi  $(i+1)^{th}$ . Arah positif dari sumbu ini dapat dipilih secara acak.
- Sumbu  $x_i$  sejajar dengan garis normal sumbu  $i^{th}$  dan sumbu sendi  $(i+1)^{th}$  dan bentuk titik  $i^{th}$  ke sendi  $(i+1)^{th}$ .
- Sumbu  $y_i$  ditentukan menggunakan kaidah tangan kanan.

Sistem koordinat tanah dan fektor-akhir tidak mengikuti peraturan ini. Sistem koordinat tanah dapat dipilih selama sumbu  $z_0$  sejajar dengan sumbu sendi 1. Sistem koordinat efektor-akhir, disebut juga system koordinat tangan, juga bias dipilih selama sumbu  $x$  normal ke sumbu sendi yang terakhir. Setiap serial manipulator [10][11] bisa digambarkan secara kinematikal dengan menetapkan empat parameter untuk setiap link. Terlepas dari pembangunan fisik link yang sebenarnya menghubungkan dua sendi, lokasi relatif mereka bisa digambarkan menggunakan dua parameter:

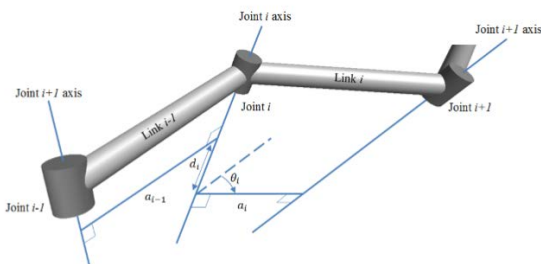
- $a_i$  : Panjang garis normal antara sumbu dari sendi  $i$  and  $i+1$ . Hal ini juga dikenal sebagai panjang link.
- $\alpha_i$  : Sudut yang diukur dari sumbu sendi  $i$  ke sumbu sendi  $i+1$ . Hal ini juga dikenal sebagai putaran dari link.



Gambar 1 Panjang dan Putaran link

Demikian pula, dua parameter yang lain bisa menggambarkan lokasi link relatif terhadap satu sama lain:

- $d_i$  : Jarak offset antara garis normal dari sumbu sendi  $i-1$  dan sendi  $i$  dengan garis normal sumbu sendi  $i$  dan sendi  $i+1$ . Hal ini dikenal dengan offset dari link.
- $\theta_i$  : Sudut antara garis normal dari sumbu sendi  $i-1$  dan sendi  $i$  dengan garis normal sumbu sendi  $i$  dan sendi  $i+1$ . Hal ini dikenal dengan sudut dari sendi.



Gambar 2 Offset dan Sudut Putar

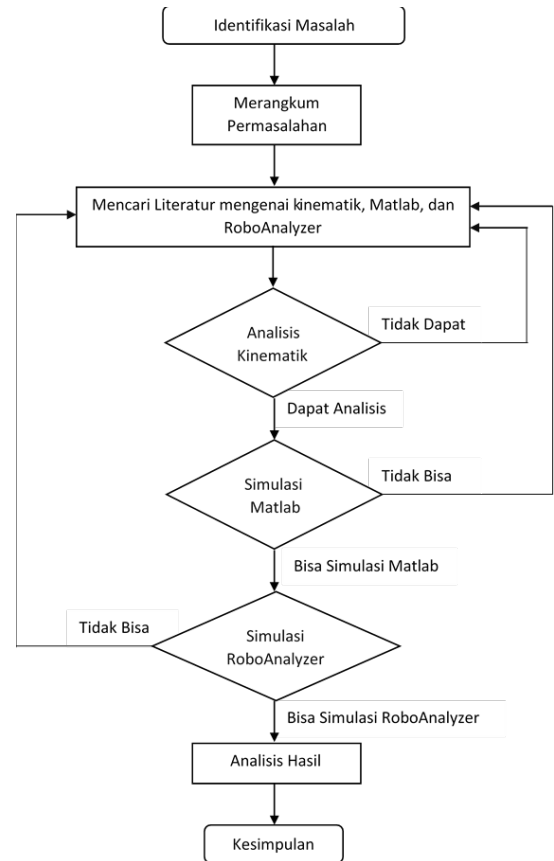
### III. TUJUAN DAN MANFAAT

Tujuan dari riset ini adalah untuk menganalisis kinematik 3 derajat kebebasan pada kaki dari robot berkaki enam menggunakan parameter Denavit Hartenberg, kemudian hasil perhitungan di simulasikan menggunakan software MATLAB dan RoboAnalyzer. Dan menerapkan gaya berjalan tripod untuk robot berkaki enam.

Manfaat dari riset ini adalah memberikan alternatif dalam dalam programming robot berkaki enam, sehingga mempermudah dan ringkas dalam penulisan programming dengan menganalisis bentuk kaki robot.

## IV. METODE Riset

### A. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

### B. LANGKAH KERJA PENELITIAN

Berikut adalah langkah kerja yang akan dilaksanakan pada penelitian ini.

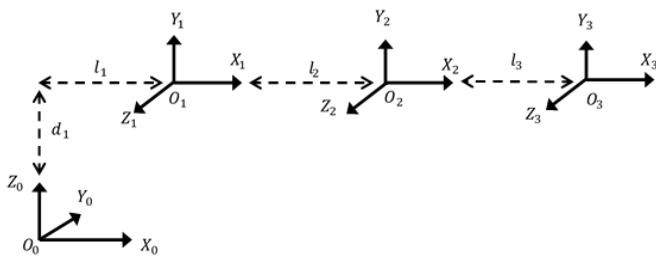
- Tahap identifikasi adalah mengidentifikasi masalah yang akan diteliti
- Tahap permasalahan yaitu merangkum masalah yang didapat
- Tahap literatur yaitu tahan mencari refensi atau pustaka untuk dijadikan literatur studi
- Tahap analisis kinematik adalah tahap pernyataan tentang deskripsi geometris struktur robot. Dari persamaan geometris kita bisa mendapatkan hubungan antara konsep geometri spasial sendi pada robot dengan konsep koordinat biasa yang digunakan untuk menentukan posisi suatu objek. Tujuan

kinematika adalah untuk menentukan posisi relatif dari sebuah frame ke koordinat aslinya.

- Tahap simulasi MATLAB adalah tahap mensimulasikan persamaan kinematik maju dan balik yang didapat menggunakan software MATLAB, sebuah lingkungan komputasi numerikal dan bahasa pemrograman komputer generasi keempat. Dikembangkan oleh The MathWorks, MATLAB memungkinkan manipulasi matriks, pemplot-an fungsi dan data, implementasi algoritme, pembuatan antarmuka pengguna, dan peng-antarmuka-an dengan program dalam bahasa lainnya.
- Tahap simulasi RoboAnalyzer adalah tahap mensimulasikan desain dengan Software yang bernama RoboAnalyzer, sebuah software untuk belajar mengenai konsep dasar model robot 3D. Dengan Software ini akan disimulasikan pergerakan dari setiap kaki hexapod, mulai dari panjang setiap link, offset sendi dan sudut putar tiap sendi.
- Tahap analisis hasil adalah tahap menganalisis hasil data yang didapat.
- Tahap kesimpulan adalah tahap penarikan kesimpulan atas hasil data dan analisa yang didapat.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinematik di dalam robotika merupakan deskripsi bentuk pernyataan secara geometris dari struktur robot. [12] dari persamaan geometris, kami mendapatkan hubungan antara konsep geometris sendi spasial pada robot dengan konsep koordinat normal yang digunakan untuk menentukan posisi sebuah objek. Tujuan dari kinematik adalah untuk mendefinisikan posisi relatif sebuah frame dengan koordinat aslinya. Untuk kaki Hexapod ini, koordinate framenya direpresentasikan pada gambar 4.



Gambar 4 Koordinat Frame kaki robot

Setelah menentukan koordinate setiap frame, selanjutnya adalah menentukan parameter DH yang ditunjukkan pada table 1.

Tabel 1 Parameter DH

Link	Parameter DH			
	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	90	$l_1$	$d_1$	$\theta_1$
2	0	$l_2$	0	$\theta_2$
3	0	$l_3$	0	$\theta_3$

A. ANALISIS KINEMATIK MAJU

Dengan nilai-nilai yang diberikan variabel sendi, posisi koordinat dapat ditentukan. Transformasi matriks homogen untuk kaki hexapod tertentu dapat ditentukan dengan menggunakan konvensi Denavit Hartenberg (DH).

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Kemudian transformasikan matrik-mtarik di atas dari link 0 sampai link 3

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \tag{4}$$

Sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} p_x = x &= c\theta_1(c(\theta_2 + \theta_3)l_3 + c\theta_2l_2 + l_1) \\ p_y = y &= s\theta_1(c(\theta_2 + \theta_3)l_3 + c\theta_2l_2 + l_1) \\ p_z = z &= s(\theta_2 + \theta_3)l_3 + s\theta_2l_2 + d_1 \end{aligned} \tag{5}$$

B. ANALISIS KINEMATIK BALIK

Untuk menganalisis kinematik balik, menggunakan persamaan (4) yang kedua sisinya dikalikan dengan  $[{}^0_1T]^{-1}$  dimana,

$$[{}^0_1T]^{-1} = \begin{bmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ s\theta_1 & -c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Sehingga,  ${}^0_3T[{}^0_1T]^{-1} = [{}^0_1T]^{-1}{}^0_1T \frac{1}{2}T \frac{2}{3}T$  (7)

Dan akhirnya didapatkan

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) \quad (8)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2} \left( \frac{(p_z - d_1)(l_2 + l_3 c \theta_3) - (p_x c \theta_1 + p_y s \theta_1 - l_1)(l_3 s \theta_3)}{(p_x c \theta_1 + p_y s \theta_1 - l_1)(l_2 + l_3 c \theta_3) + (p_z - d_1)(l_3 s \theta_3)} \right) \quad (9)$$

$$\theta_3 = \mp \text{Atan2} \left( \frac{\sqrt{1 - c^2 \theta_3}}{M^2 + N^2 - l_2^2 - l_3^2} \right) \quad (10)$$

**C. SIMULASI MATLAB**

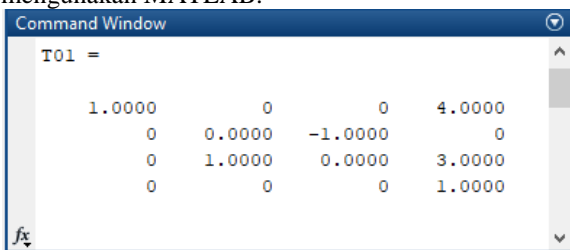
Untuk simulasi kinematik maju dan balik menggunakan MATLAB, kami memasukkan persamaan yang didapat dari perhitungan menggunakan tangan ke dalam editor MATLAB, dan kemudian set nilai dari parameter DH.

Tabel 2 Nilai Parameter Denavit-Hartenberg

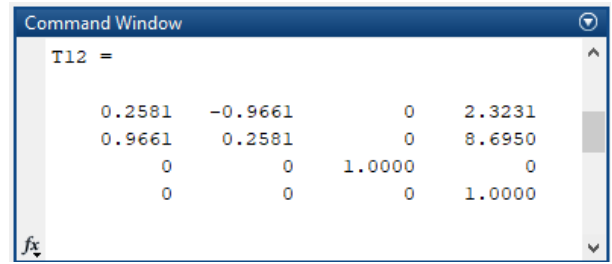
Link	Parameter DH			
i	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	90	4	3	$\theta_1$
2	0	9	0	$\theta_2$
3	0	13	0	$\theta_3$

• **MATLAB KINEMATIK MAJU**

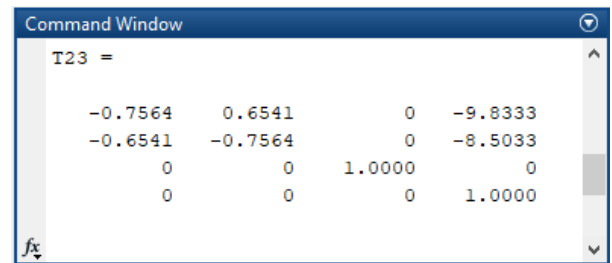
Untuk simulasi MATLAB kinematik maju, kami menggunakan  $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 75.0412^\circ$  dan  $\theta_3 = -139.1487^\circ$  sebagai input nilai sudut servo dan menggunakan transformasi matrix dari setiap link dari base frame sampai ke link ketiga. Berikut adalah hasil perhitungan transformasi matrix setiap link menggunakan MATLAB.



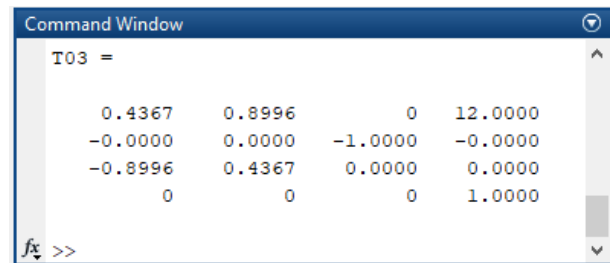
Gambar 5 Transformasi matriks antara base frame and link 1



Gambar 6 Transformasi matriks antara link 1 and link 2



Gambar 7 Transformasi matriks antara link 2 and link 3

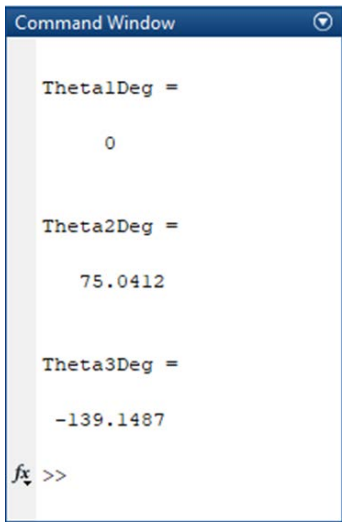


Gambar 8 Transformasi matriks antara base frame and link 3

Dari simulasi dihasilkan nilai dari efektor akhirnya adalah  $p_x = 12.0, p_y = 0.0$  dan  $p_z = 0.0$ .

• **MATLAB KINEMATIK BALIK**

Untuk simulasi MATLAB kinematik balik, masukan persamaan kinematik yang didapat dari perhitungan tangan dan kami menggunakan  $p_x = 12.0, p_y = -0.0$  and  $p_z = 0.0$  sebagai nilai input dari efektor akhir.

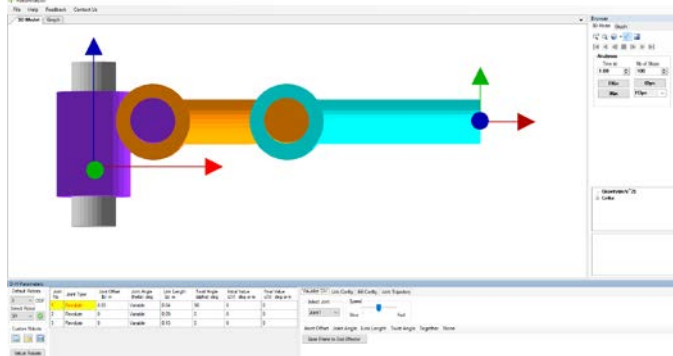


Gambar 9 Sudut Untuk Semua Sendi Hexapod

Dari hasil didapatkan nilai untuk setiap sendi adalah  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 75.0412^\circ$  dan  $\theta_3 = -139.1487^\circ$ .

**D. ROBOANALYZER**

Dalam penelitian ini, jenis model simulasi yang digunakan adalah 3R Articulated Model, yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10 Model Artikulasi Putaran Kaki Robot

Ada 3 jenis putaran sendi, dengan 3 cm offset sendi (joint offset) dan  $90^\circ$  sudut putar (twist angle) di sendi pertama. Panjang link pertama adalah 3 cm, link kedua 9 cm dan link ketiga 13 cm.

**• ROBOANALYZER KINEMATIK MAJU**

Untuk memulai simulasi kinematik maju dengan RoboAnalyzer, masukkan nilai sudut dari setiap awalan (initial) dan akhir (final) dalam kolom yang tersedia. Kami memasukkan nilai  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 75.0412^\circ$  dan  $\theta_3 = -139.1487^\circ$  sebagai nilai akhir dari setiap sudut sendi dan  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$  untuk nilai awalan sudut sendi.

Joint No	Joint Type	Joint Offset (b) m	Joint Angle (theta) deg	Link Length (a) m	Twist Angle (alpha) deg	Initial Value (JV) deg or m	Final Value (JV) deg or m
1	Revolute	0.03	Variable	0.04	90	0	0
2	Revolute	0	Variable	0.09	0	75.0412	0
3	Revolute	0	Variable	0.13	0	-139.1487	0

Gambar 11 Parameter DH pada RoboAnalyzer

Dan yang hasil dari transformasi matriks setiap linknya adalah

$$\begin{bmatrix} T_{Link1} \\ \text{Base Frame} \\ \text{Update} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.04 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gambar 12 Transformasi base frame dengan link pertama

$$\begin{bmatrix} T_{Link2} \\ \text{Previous Link Frame} \\ \text{Update} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.258124 & -0.966112 & 0 & 0.023231 \\ 0.966112 & 0.258124 & 0 & 0.08695 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gambar 13 Transformasi link pertama dengan kedua

$$\begin{bmatrix} T_{Link3} \\ \text{Previous Link Frame} \\ \text{Update} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.75641 & 0.654098 & 0 & -0.098333 \\ -0.654098 & -0.75641 & 0 & -0.085033 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gambar 14 Transformasi matriks link kedua dengan ketiga

$$\begin{bmatrix} T_{Link3} \\ \text{Base Frame} \\ \text{Update} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.436684 & 0.899615 & 0 & 0.12 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -0.899615 & 0.436684 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gambar 15 Transformasi base frame dengan link ketiga

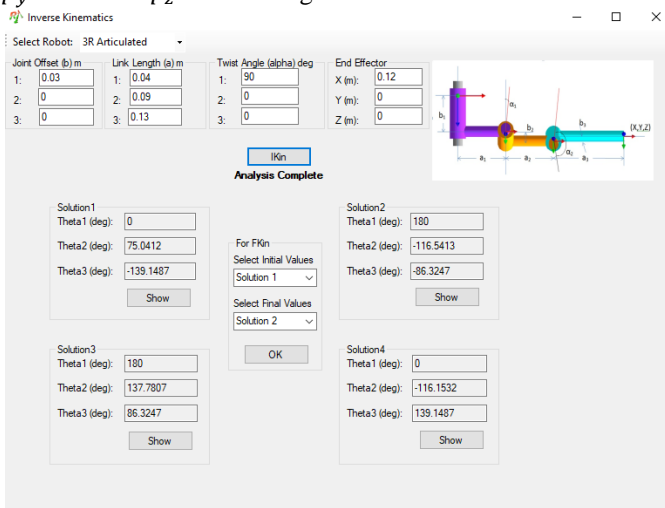
Dari hasil didapatkan transformasi matriks antara base frame dengan link ketiga, yang merupakan hasil dari transformasi matriks dari setiap link. Pengukuran dalam satuan meter.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} 0.436684 & 0.899615 & 0 & 0.12 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -0.899615 & 0.436684 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kemudian didapatkan posisi dari efektor akhirnya  $p_x = 12.0 \text{ cm}$ ,  $p_y = 0.0 \text{ cm}$  dan  $p_z = 0.0 \text{ cm}$ .

• ROBOANALYZER KINEMATIK BALIK

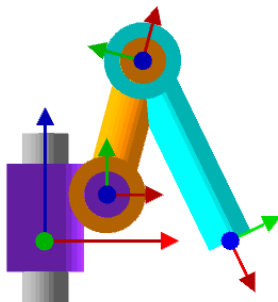
Untuk simulasi kinematik balik dengan RoboAnalyzer, masukkan nilai dari parameter-parameter DH dan efektor akhir yang kita inginkan. Kami memasukkan nilai  $p_x = 12.0$ ,  $p_y = 0.0$  dan  $p_z = 0.0$  sebagai nilai efektor akhir.



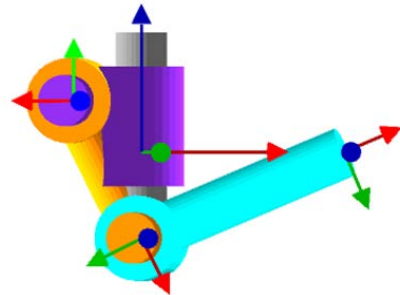
Gambar 16 Solusi kinematik balik RoboAnalyzer

Dari hasil simulasi didapatkan 4 buah solusi atau sudut-sudut yang yang membuat efektor akhir dapat mencapai posisi  $p_x = 12.0$ ,  $p_y = 0.0$  and  $p_z = 0.0$ . Solusi tersebut adalah

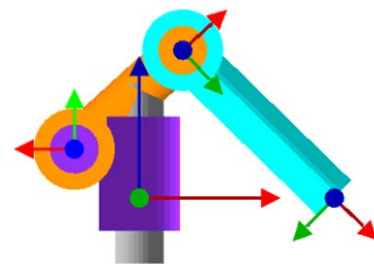
- (1)  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 75.0412^\circ$  dan  $\theta_3 = -139.1487^\circ$ .
- (2)  $\theta_1 = 180^\circ$ ,  $\theta_2 = -116.5413^\circ$  dan  $\theta_3 = -86.3247^\circ$ .
- (3)  $\theta_1 = 180^\circ$ ,  $\theta_2 = 137.7807^\circ$  dan  $\theta_3 = 86.3247^\circ$ .
- (4)  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = -116.1532^\circ$  dan  $\theta_3 = 139.1487^\circ$ .



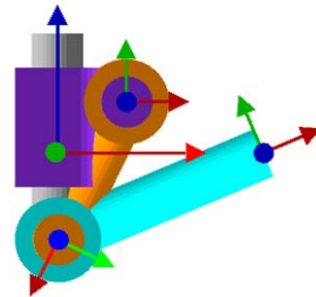
Gambar 17 Solusi (1)



Gambar 18 Solusi (2)



Gambar 19 Solusi (3)



Gambar 20 Solusi (4)

Dari hasil tersebut, kemungkinan pergerakan yang dapat dilakukan oleh hexapod adalah pergerakan dengan gambar 17, karena pergerakan tersebut tidak menyentuh atau menabrak batas limit fisik dari hexapod.

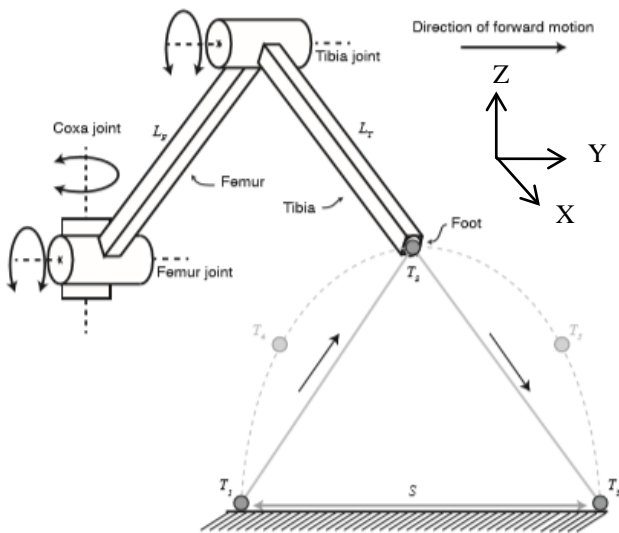
• GERAKAN TRIPOD

Robot berkaki enam pada umumnya mengadopsi gaya berjalan tripod dengan beban faktor  $\beta = 0.5$ . Dengan gaya berjalan ini, enam kaki yang dimiliki dibagi menjadi dua kelompok. Setiap kaki depan dan belakang dari satu sisi dan kaki tengah dari sisi lain dari tubuh menjadi satu kelompok gerak, begitu pula sebaliknya. Sehingga dua kelompok gerak tripod terbentuk. Ketika satu kelompok gerak kaki mengangkat dan berayun, kelompok yang lain akan tetap diam karena untuk menyokong beban tubuh dan kemudian mendorong tubuh ke depan. Kegiatan ini dilakukan secara

bergantian dan berulang. Ketika prosedur di atas berulang, pusat gravitasi beban robot akan selalu berada dalam satu kelompok gerak. [13][14][15].

Memiliki kesamaan dengan serangga, robot berkaki enam ini dalam pengulangan pergerakannya membuat sebuah pola gerak. Dengan posisi kaki di tanah dikatakan berada dalam “stance phase” sementara kaki mengayunkan ke depan dalam “swing phase”. Untuk melakukan langkah maju gerakan kaki harus terdiri dari kombinasi swing dan stance phase.

Sebagai contoh pada tahap swing phase, untuk arah ke depan berkaitan antara sumbu y positif dengan sumbu z positif yang membentuk kerangka koordinat yang menggunakan kaidah tangan kanan. Panjang coxa, femur dan tibia yang secara berurutan dilambangkan dengan LC, LF dan LT. S untuk melambangkan panjang langkah. Pergerakan lintasan kaki pada saat melangkah ditunjukkan pada gambar 21, dan sesuai dengan gerak  $T1 \rightarrow T2 \rightarrow T3$ . Lintasan yang halus didapatkan dengan menginterpolasi dengan jumlah poin yang sangat banyak (misalnya,  $T1 \rightarrow T4 \rightarrow T2 \rightarrow T5 \rightarrow T3$ ) [16]



Gambar 21 Contoh lintasan kaki saat melangkah

**E. KESIMPULAN DAN SARAN**

Parameter Denavit Hartenberg dapat memecahkan dan menghasilkan persamaan kinematik maju dan balik pada lengan manipulator robot dengan 3 derajat kebebasan. Persamaan ini kemudian dapat diterapkan pada setiap kaki robot berkaki, khususnya pada robot berkaki 6 dengan 3 derajat kebebasan. Sebelum diterapkan persamaan-persamaan ini diuji coba menggunakan software Matlab dan RoboAnalyzer.

Pada Matlab, persamaan kinematik maju diuji dengan memasukan nilai  $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 75.0412$  dan  $\theta_3 =$

$-139.1487^\circ$  menghasilkan matriks nilai x, y dan z (12,0,0). Sedangkan untuk persamaan kinematik balik diuji dengan memasukkan nilai  $p_x = 12.0, p_y = -0.0$  and  $p_z = 0.0$  menghasilkan  $\theta_1, \theta_2$  dan  $\theta_3$  ( $0^\circ, 75.0412^\circ$  dan  $-139.1487^\circ$ ). Dari kedua ujicoba tersebut menunjukkan hasil yang saling berketerbalikan satu sama lain.

Pada RoboAnalyzer, persamaan kinematik maju juga dimasukkan nilai  $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 75.0412$  dan  $\theta_3 = -139.1487^\circ$  menghasilkan matriks nilai x, y dan z (12,0,0). Untuk persamaan kinematik balik juga dimasukkan nilai joint offset 0.3, panjang setiap link kaki (4 cm, 9 cm dan 13 cm) dan sudut putar  $90^\circ$  serta nilai x, y dan z (12,0,0) menghasil 4 buah solusi yang dari dolusi-solusi tersebut hanya satu solusi yang pergerakan kakinya tidak menabrak batas limit pergerakan kaki.

Pergerakan kaki dengan gaya berjalan tripod dapat diterapkan dengan mengelompokkan 2 kelompok gerakan kaki, yaitu swing dan stance phase. Kedua kelompok ini digerakan secara bergantian. Ketika satu kelompok gerak kaki mengangkat dan berayun, kelompok yang lain akan tetap diam karena untuk menyokong beban tubuh dan kemudian mendorong tubuh ke depan. Kegiatan ini dilakukan secara bergantian dan berulang.

Untuk penelitian selanjutnya dapat dicoba membuat design dari robot berkaki enam dan mencetaknya, sehingga dapat mengimplementasikan persamaan analisis beserta gaya berjalannya ke robot berkaki 6.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Terima kasih kepada seluruh Tim Riset Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini dan juga Tim Editorial Jurnal Teknologi Elektro atas dipublikasikannya penelitian ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] P. Yang and F. Gao, “Leg kinematic analysis and prototype experiments of walking-operating multifunctional hexapod robot,” *Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 12, pp. 2217–2232, 2013.
- [2] Z. Yang, C. Juang, and Y. Jhan, “Hexapod Robot Wall-Following Control Using A Fuzzy Controller,” pp. 1–5, 2014.
- [3] G. Jianhua, “Design and Kinematic Simulation for Six-DOF Leg Mechanism of Hexapod Robot,” in *2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2006, no. 50405012, pp. 625–629.
- [4] H. Wang, H. Qi, M. Xu, Y. Tang, J. Yao, X. Yan, and M. Li, “Research on the Relationship between Classic



- Denavit-Hartenberg and Modified Denavit-Hartenberg,” *Proc. - 2014 7th Int. Symp. Comput. Intell. Des. Isc. 2014*, vol. 2, pp. 26–29, 2015.
- [5] W. Weber, “Automatic Generation of the Denavit-Hartenberg Convention,” pp. 235–241, 2010.
- [6] M. M. U. Atique and M. A. R. Ahad, “Inverse Kinematics solution for a 3DOF robotic structure using Denavit-Hartenberg Convention,” in *2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2014, pp. 1–5.
- [7] B. Utomo, M. Jurusan, T. Mesin, F. Teknik, U. Diponegoro, D. Jurusan, T. Mesin, F. Teknik, and U. Diponegoro, “Analisa Forward dan Inverse Kinematics pada Simulator Arm Robot 5 Derajat Kebebasan,” vol. 1, no. 3, pp. 11–20, 2013.
- [8] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*, vol. 73, no. 11. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [9] H. I. Bozma, “EE 451 - Kinematics & Inverse Kinematics,” 2015.
- [10] W. W. Melek, “ME 547: Robot Manipulators: Kinematics, Dynamics, and Control.” University of Waterloo, ON, Canada, 2010.
- [11] L.-W. Sai, *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, 1st ed. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [12] A. Beni, “Kinematics of AdeptThree Robot Arm,” in *Robot Arms*, InTech, 2011.
- [13] R. B. McGhee and A. A. Frank, “On the stability properties of quadruped creeping gaits,” *Math. Biosci.*, vol. 3, pp. 331–351, Aug. 1968.
- [14] B. Jin, L. Zhao, J.-L. Zhang, C. Chen, and S. Hu, “Design of the Control System for a Hexapod Walking Robot,” in *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 2011, pp. 401–404.
- [15] M. Zak and J. Rozman, “Design , Construction and Control of Hexapod Walking Robot,” *IEEE 13th Int. Sci. Conf. Informatics*, no. Figure 1, pp. 302–307, 2015.
- [16] N. Kottege, C. Parkinson, P. Moghadam, A. Elfes, and S. P. N. Singh, “Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains,” in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 5140–5147.