

Analisis Kinematika dan Pola Gerakan Berjalan pada Robot *Bipedal Humanoid T-FLoW 3.0*

RYAN SATRIA WIJAYA¹, KEVIN ILHAM APRIANDY², M. RIZQI HASAN AL BANNA³, RADEN SANGGAR DEWANTO⁴, DADET PRAMADIHANTO⁵

^{1,4}Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

^{2,3,5}Departemen Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

Email: ryans799@gmail.com

Received 5 Juli 2021 | Revised 27 Juli 2021 | Accepted 8 Agustus 2021

ABSTRAK

Robot humanoid merupakan robot menyerupai manusia dengan tingkat kompleksitas yang tinggi dan fungsi yang serbaguna. Pada penelitian ini dilakukan analisis model kinematika gerak pada robot bipedal humanoid TFLoW 3.0, serta menganalisis pola gerakan berjalannya. Pola pergerakan yang diimplementasikan pada robot bipedal TFLoW 3.0 merupakan hasil pendekatan dari teori cara berjalan manusia dengan menggunakan enam gerakan dasar manusia saat berjalan. Kemudian menganalisis model gerakan robot menggunakan kinematika terbalik dengan solusi geometri. Tujuan dari model kinematika terbalik adalah untuk mengubah data input berupa posisi kartesian menjadi nilai sudut untuk setiap parameter joint pada masing-masing Degrees of Freedom (DoF). Lalu dilakukan analisis model mekanik robot saat berjalan yang terbagi atas fase tegak dan fase berayun yang bertujuan untuk mengetahui hasil pengujian.

Kata kunci: robot humanoid, gaya berjalan, kinematika, TFLoW, DoF.

ABSTRACT

Humanoid robots are human-like robots with a high level of complexity and versatile functions. In this study, kinematics analyze on TFLoW 3.0 humanoid bipedal robot is carried out, as well as analyzing the pattern of its walking movement. The implemented movement of TFLoW 3.0 bipedal robot is the result of an approach from human walk using six basic human movements when walking. the robot movement model is analyzed by inverse kinematics with geometric solutions. Invers kinematics model is to transform the input data in the form of a Cartesian position into an angle value for each joint parameter in each Degrees of Freedom (DoF). Then an analysis of the robot's mechanical model when walking is carried out which is divided into a stance phase and a swinging phase which aims to determine the test results.

Keywords: humanoid robot, gait, kinematics, TFLoW, DoF.

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia, robot *humanoid* salah satunya sedang dikembangkan oleh pusat penelitian robotika Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (*PENS*), yakni *Robotics and Intelligent Systems Center (RoISC)*. Selama 5 tahun terakhir, *RoISC* telah membangun dua jenis robot *humanoid*, yakni *T-FloW1 Humanoid Robot (Dimas Pristovani, dkk, 2016)* dan *T-FloW2 Humanoid Robot (Pristovani, dkk, 2017)*. Berbagai kemampuan telah dapat dilakukan oleh robot T-FLoW versi sebelumnya. Seperti pada (**Dimas Pristovani, dkk, 2016**), yang mengerjakan gerak berjalan sederhana, kemudian gerak berjalan tersebut disempurnakan pada penelitian selanjutnya (**Pristovani, dkk, 2017b**). Kemampuan lain yang dapat dilakukan oleh T-FLoW adalah melompat (**Nashihin, dkk, 2018**) dan mengumpan bola (**Pristovani, dkk, 2017a**). Topik yang sedang banyak dikerjakan adalah kemampuan untuk mempertahankan tubuh robot dari dorongan eksternal (**Pristovani, dkk, 2018**). Selain itu, beberapa bentuk simulasi di berbagai kondisi juga telah banyak dilakukan dengan menggunakan *T-FloW Humanoid Robot*. Seperti pada (**Arfaq, dkk, 2018**) yang menyimulasikan deteksi kondisi jatuh robot dengan menggunakan *CoppeliaSim*. Kemudian pada penelitian lainnya, telah dikerjakan simulasi stabilitas dinamis pada saat robot berjalan di bidang miring (**Sucipto, dkk, 2019**) dan naik-turun tangga (**Sari, dkk, 2019**).

T-FloW humanoid robot yang mengalami perkembangan pesat dan sukses mengakibatkan *RoISC* merasa tertantang dan ingin mencapai lebih banyak kesuksesan pada bidang robot *humanoid*. Oleh karena itu, *RoISC* merevolusi konsep pengembangan dan membawa perubahan besar dari *T-FloW1* dan *T-FloW2* ke *T-FloW 3.0*. Perubahan paling signifikan yang dialami adalah di bidang desain mekanik. Jika dibandingkan dengan dua versi FLoW sebelumnya, T-FLoW 3.0 saat ini dibangun dengan konsep eksoskeleton. Selain konsep eksoskeleton, desain mekanik pada T-FLoW 3.0 juga dibangun untuk dapat sedekat mungkin menyerupai manusia. Karena itu, konfigurasi panggul pada *bipedal* robot T-FLoW 3.0 dibangun dengan sudut kemiringan 45° untuk menyerupai manusia. Pada dua versi sebelumnya, konfigurasi panggul membentuk kemiringan sudut 90° . Gambar 1 menunjukkan desain panggul pada *bipedal* robot T-FLoW 3.0 baru.



(a) Robot Tampak Depan



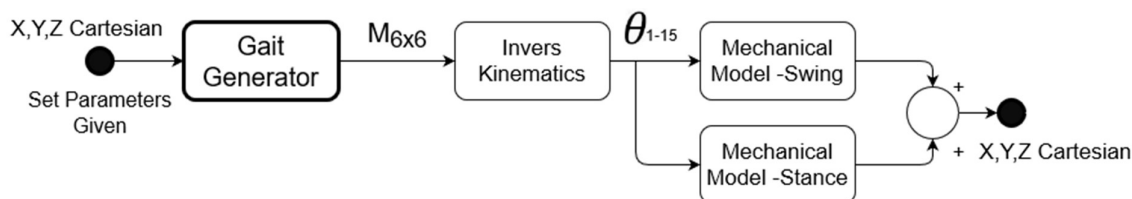
(b) Robot Tampak Samping

Gambar 1. Penampakan *Bipedal* T-FLoW Humanoid Robot

Dikarenakan adanya perbedaan konfigurasi panggul dengan para pendahulunya, membuat berbagai kemampuan yang telah dimiliki oleh T-FLoW1 dan T-FLoW2 tidak bisa diterapkan secara langsung pada T-FLoW 3.0. Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian untuk menyesuaikan desain yang ada pada T-FLoW 3.0. Penelitian ini bermaksud untuk membangun suatu kemampuan berjalan dengan mengusulkan analisis kinematika dan pola gerakan berjalan pada robot bipedal humanoid T-FLoW 3.0. Penelitian kali ini merupakan penelitian lanjutan dari (Sucipto, dkk, 2021) yang membahas tentang analisis gerak robot. Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan analisis model pola gerakan berjalan dan analisis model kinematika gerak robot *bipedal* TFLoW 3.0 dengan solusi geometri dan transformasi homogen, sehingga robot dapat berjalan sesuai dengan input posisi kartesian dan dapat dianalisis pola pergerakan dari robot *bipedal* TFLoW 3.0. Pola pergerakan yang diimplementasikan pada robot bipedal TFLoW 3.0 merupakan hasil pendekatan dari teori cara berjalan manusia dengan menggunakan enam gerakan dasar manusia saat berjalan. Analisis mengenai model gerakan robot dengan menggunakan kinematika terbalik solusi geometri juga turut disajikan. Tujuan dari model kinematika terbalik adalah untuk mengubah data input berupa posisi kartesian menjadi nilai sudut untuk setiap parameter *joint* pada masing-masing *Degrees of Freedom* (DoF). Lalu dilakukan analisis model mekanik robot saat berjalan yang terbagi atas fase tegak dan fase berayun yang bertujuan untuk menguji hasil analisis yang telah dilakukan. Berdasarkan hasil eksperimen, robot berhasil berjalan sesuai dengan input yang diberikan dengan metode model pendekatan yang telah dianalisis.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis model pergerakan kinematika *bipedal* humanoid robot T-FLoW dan pola pergerakan berjalan dengan model pergerakan satu kaki mengayun (*swing*) dan satu kaki tegak (*stance*) yang dilakukan secara bergantian dalam satu siklus. Agar terciptanya dari ide penelitian tersebut, maka diusulkan blok diagram sistem seperti berikut:

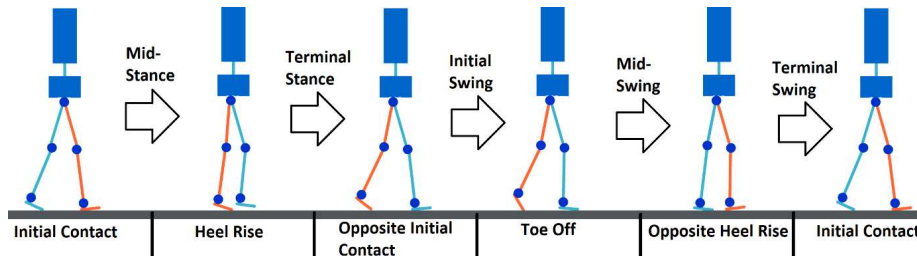


Gambar 2. Blok Diagram Sistem

Pada Gambar 2 terdapat empat blok yang akan dikerjakan oleh peneliti yakni mengenai pembangkitan pola pergerakan berjalan, analisis Kinematika terbalik, pemodelan mekanik robot mengayun, dan pemodelan mekanik robot tegak. Ke-empat blok diagram tersebut akan dijelaskan lebih rinci pada bagian bab 2 Metodologi penelitian ini.

2.1 Pembangkit gaya berjalan

Pada penelitian (Matthis, dkk, 2017) berjalan sebagai bentuk penggerak bipedal karena ada tindakan bergantian antara ekstremitas bawah. Satu kaki bersentuhan dengan tanah untuk menahan, menopang, dan mendorong. Kaki lainnya dalam fase ayunan untuk membuat langkah baru ke depan. Pada penelitian lainnya juga menjelaskan perihal cara berjalan manusia seperti pada (Molledo, dkk, 2018) dan (Castermans, dkk, 2013).



Gambar 3. Pola Gerakan Berjalan

Jadi kiprah adalah hasil dari serangkaian gerakan bergantian berirama lengan, kaki, dan badan yang menciptakan gerakan tubuh ke depan, seperti pada penjelasan Gambar 3 berikut:

- Mid-Stance*, fase ini sesuai dengan respons tanah di kaki dan paruh pertama dukungan tunggal (12-34% dari siklus). Ini mengkomunikasikan muatan penuh tubuh ke kaki pendukung dan memungkinkan tubuh maju di atas kaki. Fase ini berakhir ketika pusat gravitasi tubuh berada tepat di atas kaki penyangga. Perannya adalah untuk menambatkan kaki ke lantai sehingga menjadi tumpuan kaki penyangga.
- Terminal Stance*, fase ini sesuai dengan paruh kedua dari dukungan satu kaki (34 hingga 50% dari siklus). Tubuh bergerak secara vertikal dari pusat tekanan kaki pendukung dan berayun ke kontak kaki yang berlawanan dengan tanah. Perannya adalah untuk mendorong tubuh ke depan.
- Initial Swing*, fase ini sesuai dengan sepertiga pertama dari fase ayunan (62 hingga 75% dari siklus). Ini dimulai dengan mengangkat kaki dari lantai dan berakhir ketika kaki ayun berlawanan dengan kaki kuda-kuda. Salah satu masalah penting yang dibahas selama fase ini adalah jarak kaki dari lantai.
- Mid-Swing*, fase ini sesuai dengan tingkat kedua fase ayunan (siklus tugas 75-90%). Ini dimulai ketika kaki ayun berlawanan dengan kaki kuda-kuda dan berakhir ketika tungkai ayun berada dalam posisi vertikal tibia (postur fleksi pinggul dan lutut sama).
- Terminal Swing*, fase ini sesuai dengan tingkat ketiga fase ayunan dan berakhir dengan serangan tumit berikutnya (siklus tugas 90 hingga 100%).

Supaya pola gerakan berjalan yang telah dijelaskan tersebut dapat diimplementasikan, maka diperlukan matriks untuk pola gerakan berjalan sesuai pada Persamaan (1).

$$M_{(X_r, Y_r, Z_r, x_l, y_l, z_l)} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & x_2 & y_2 & z_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & x_3 & y_3 & z_3 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & x_3 & y_3 & z_3 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & x_3 & y_3 & z_3 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dimana:

M = Matrik 6x6 untuk pembangkitan gaya berjalan dalam satu siklus

X_r = Posisi Kartesius sumbu X pada kaki kanan

Y_r = Posisi Kartesius sumbu Y pada kaki kanan

Z_r = Posisi Kartesius sumbu Z pada kaki kanan

x_l = Posisi Kartesius sumbu x pada kaki kiri

- y_l = Posisi Kartesius sumbu y pada kaki kiri
- z_l = Posisi Kartesius sumbu z pada kaki kiri
- X_1-Z_1 = Elemen dari Matrix M untuk membuat gerakan *Initial Contact*
- X_2-Z_2 = Elemen dari Matrix M untuk membuat gerakan *Heel Rise*
- X_3-Z_3 = Elemen dari Matrix M untuk membuat gerakan *Opposite Initial Contact*
- X_4-Z_4 = Elemen dari Matrix M untuk membuat gerakan *Toe Off*
- X_5-Z_5 = Elemen dari Matrix M untuk membuat gerakan *Opposite Heel Rise*
- X_6-Z_6 = Elemen dari Matrix M untuk membuat gerakan *Initial Contact*

Setelah didefinisikan nilai parameter X , Y , dan Z dari setiap kaki pada matriks $M_{(X_r, Y_r, Z_r, x_l, y_l, z_l)}$. Kemudian untuk mengetahui pola gerakan tiap secara dinamis terhadap waktu, maka diperlukan pengolahan lanjut pada Persamaan (2) pembangkitan trayektori pola berjalan berikut:

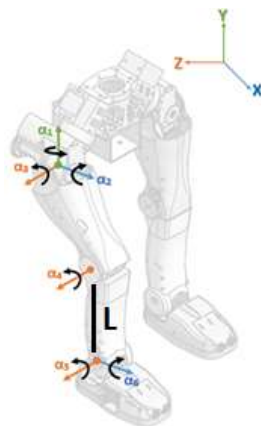
$$P_n(t) = P_n(0) + \left(\frac{P_n(T) - P_n(0)}{T} t \right) \tag{2}$$

Dimana:

- $P_n(t)$ = Posisi arah sumbu n pada saat waktu t
- $P_n(0)$ = Posisi awal arah sumbu n
- $P_n(T)$ = Posisi akhir arah sumbu n
- T = Waktu tempuh

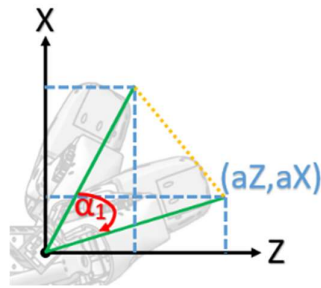
2.2 Kinematika Terbalik

Sistem *inverse kinematic* yang dimodelkan pada robot di masing-masing kaki seperti pada (Noreils, 2017), mulai dari pinggul sebagai *base* dan *ankle* sebagai *end of effector*. Penelitian lain mengenai *Inverse kinematic* juga dilakukan oleh (Sen, dkk, 2017) dengan metode solusi geometri. Dalam penelitian kali ini juga menggunakan pendekatan model geometri segitiga. Dalam *inverse kinematic* ini, terdapat kondisi input dari ankle yaitu, koordinat X , Y , Z dan *heading*. Kinematika terbalik mengacu pada penggunaan kinematika persamaan robot untuk menentukan parameter bersama yang memberikan posisi yang diinginkan dari end-effector dari spesifikasi pergerakan robot sehingga end-effector mencapai tugas yang diinginkan dikenal sebagai perencanaan gerakan. Kinematika terbalik mengubah rencana gerak ke dalam sendi aktuator lintasan untuk robot. Persamaan menentukan konfigurasi rantai dalam hal parameter bersama.



Gambar 4. Model Kinematik Satu Kaki Tampak Isometri

Sesuai dengan Gambar 4 dimana L merupakan panjang link yang menghubungkan antar servo. Sedangkan α merupakan sudut nilai dari perubahan sumbu z.



Gambar 5. Model Kinematik Tampak Atas

Dari Gambar 5 didapatkan persamaan:

$$\alpha_1 = \theta_H \quad (3)$$

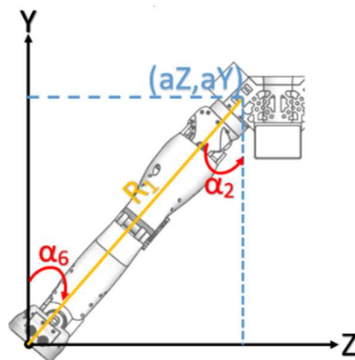
$$\alpha_Z = Z \quad (4)$$

$$\alpha_X = X \quad (5)$$

dimana:

θ_H = Sudut menghadap yang mengubah arah kaki

$\alpha_1 = \theta_H$



Gambar 6. Model Kinematik tampak Depan

Dari Gambar 6 didapatkan persamaan:

$$\alpha_Y = Y \quad (6)$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{\alpha_Z}{\alpha_Y}\right) \quad (7)$$

$$R1 = \sqrt{\alpha_Z^2 + \alpha_Y^2} \quad (8)$$

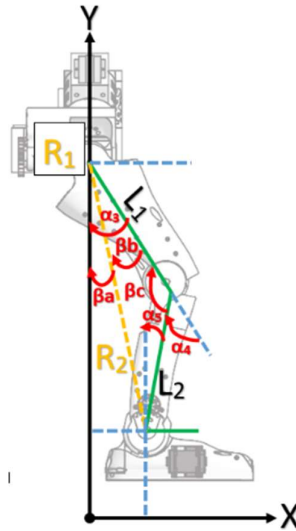
$$\alpha_6 = -\alpha_2 \quad (9)$$

Dimana:

α_2 = Selisih sudut antara aZ dan aY

α_6 = Refleksi dari sudut α_2

R1 = Resultan dari sudut aZ dan aY



Gambar 7. Model Kinematik Tampak Samping

Pada Gambar 7 didapatkan nilai dari sudut *joint 2*. *Joint 2* adalah bidang yang menunjukkan sisi samping sehingga kaki robot terlihat seperti kaki manusia yang dilihat dari samping.

$$R2 = \sqrt{R1^2 + \alpha X^2} \quad (10)$$

$$\beta c = \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + L2^2 - R2^2}{2L1L2} \right) \quad (11)$$

$$\beta a = \sin^{-1} \left(\frac{X}{R2} \right) \quad (12)$$

$$\beta b = \sin^{-1} \left(\frac{L2 \sin(180 - \beta C)}{R2} \right) \quad (13)$$

$$\alpha 3 = \beta a + \beta b \quad (14)$$

Dimana:

$L1$ = Panjang kaki bagian atas

$L2$ = Panjang kaki bagian bawah

$R2$ = Resultan terjadi antara medan $R1$ dan X

βA = Perbedaan sudut antara $R2$ dan $L1$

βB = Perbedaan sudut antara $R2$ dan $R1$

βC = Perbedaan sudut antara $L1$ dan $L2$

$\alpha 3$ = Penambahan sudut dari γA dan γC

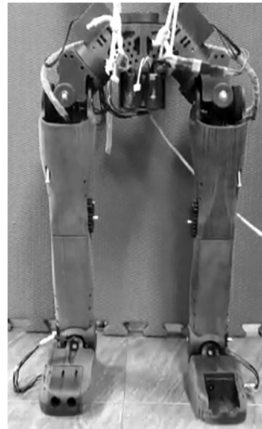
$\alpha 4$ = Pengurangan sudut dari 180 dan γB

$\alpha 5$ = Penambahan sudut dari $\alpha 3$ dan $\alpha 4$

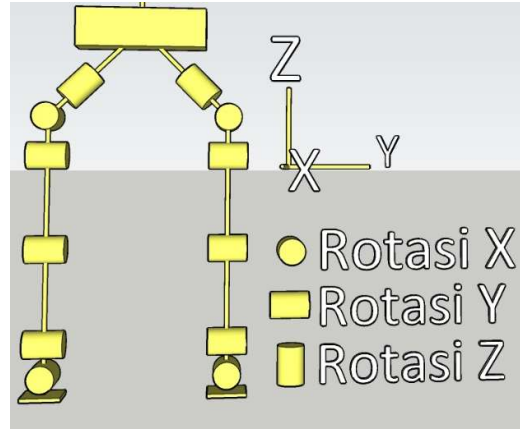
Setelah mendapatkan nilai-nilai yang diperlukan untuk perhitungan pada Gambar 7, maka bisa didapatkan keseluruhan besar sudut pada setiap *joint*.

2.3 Pemodelan Mekanik Robot

Dalam makalah ini akan dibahas model mekanik robot yang akan digunakan. Desain robot yang digunakan dibuat semirip mungkin dengan postur tubuh manusia seperti pada Gambar 8. Desain robot *bipedal* TFLoW 3.0 memiliki 12 *DoF* dengan postur panggul yang memiliki kemiringan sudut 45° mendekati postur panggul manusia.



(a) Desain Mekanik Robot



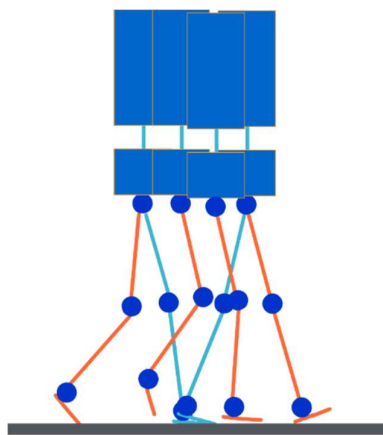
(b) Model Mekanik

Gambar 8. Desain dan Model Mekanik Robot

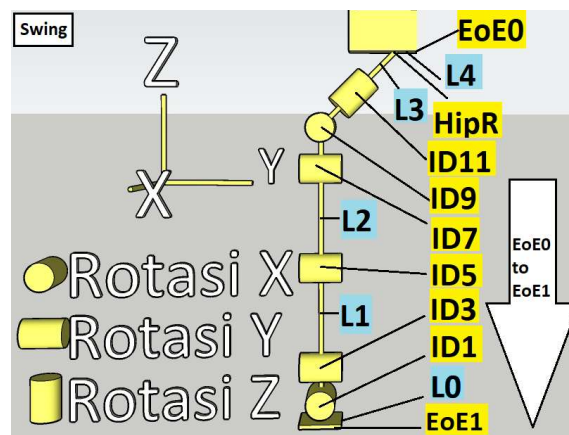
Dari cara berjalan yang meniru dari pergerakan manusia seperti yang dijelaskan pada (Matthis, dkk, 2017), menunjukkan perilaku lokomotor yang kompleks. Sehingga diperlukan tinjauan pergerakan berjalan seperti yang dijelaskan (Aoi, dkk, 2019). Oleh karena itu pada bagian bab ini akan ditinjau lebih dalam perihal analisis pemodelan mekanik *bipedal robot* yang terbagi pada fase berayun dan tegak, lalu akan digabungkan untuk analisis total pemodelan mekanik robot saat berjalan.

2.3.1 Pemodelan Kaki Berayun

Pada fase berayun menunjukkan seluruh ayunan tungkai terlihat Ketika kaki terangkat dari tanah, kaki mengayun ke atas dan kemudian mengayun ke depan sebagai fase menuju ke kondisi tegak. Sehingga pada fase berayun ini terlihat seperti gerakan pendulum dari kondisi belakang berayun sampai ke depan seperti pada Gambar 9(a). Lalu dalam fase pra ayunan tujuannya adalah untuk memposisikan anggota badan untuk bersiap mengayun ke depan dan biasa disebut juga *weight release* karena saat mengangkat kaki itu, kondisi tungkai menjadi turun yang menyebabkan beberapa beban anggota badan seakan-akan terlepas dalam fase ini karena anggota badan lainnya sekarang menerima beban.



(a) Mekanisme *Swing*



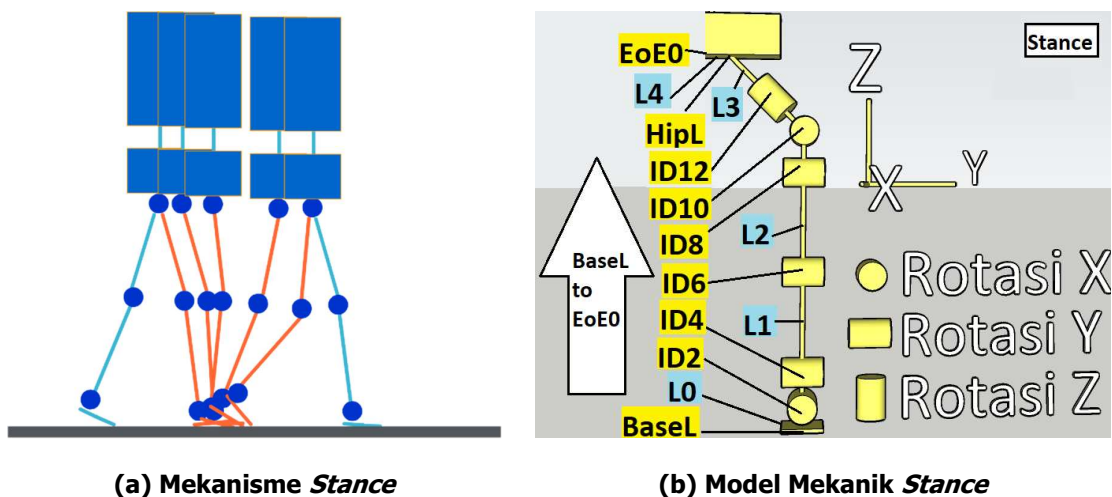
(b) Model Mekanik *Swing*

Gambar 9. Pemodelan dan Mekanisme *Swing*

Dalam menganalisis model pergerakan berayun seperti pada Gambar 9(b), diperlukan kinematika maju dengan menggunakan matriks transformasi homogen. Dimana *base* terletak pada panggul dan *end of effector* terletak pada ujung kaki. Dalam analisis pemodelan kaki berayun untuk *base* didefinisikan sebagai $EoE0$, sedangkan untuk *end of effector* didefinisikan sebagai $EoE1$.

2.3.2 Pemodelan Kaki Tegak

Pada fase tegak, terjadi kontak antara tumit dengan tanah. Sehingga salah satu kaki menyentuh lantai dan menjadi poros gerakan. Lalu kemudian kaki yang menjadi poros akan melakukan dorongan terhadap beban tubuh robot dari belakang ke depan sampai kaki yang melakukan ayunan menyentuh kontak dengan tanah seperti pada Gambar 10(a).



Gambar 10. Pemodelan dan Mekanisme *Swing*

Dalam menganalisis model pergerakan tegak seperti pada Gambar 10(b), diperlukan kinematika maju dengan menggunakan matriks transformasi homogen. Dimana *base* terletak pada ujung kaki dan *end of effector* terletak pada pusat panggul. Dalam analisis pemodelan kaki tegak untuk *base* didefinisikan sebagai $BaselL$, sedangkan untuk *end of effector* didefinisikan sebagai $EoE0$.

2.3.3 Pemodelan Utuh

Pada bagian ini dibahas mengenai total pemodelan mekanik selama satu siklus berjalan. Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan tentang model mekanik berayun dan model mekanik tegak. Pada pemodelan utuh ini merupakan gabungan dari kedua model yang sudah dianalisis tersebut dengan kinematika maju menggunakan transformasi homogen. Dari penjelasan yang telah dijabarkan dari model mekanik berayun dan model mekanik tegak, dapat dianalisis model kinematika maju-nya dengan menggunakan tabel transformasi homogen berikut.

Tabel 1. Matriks Transformasi Homogen

No	Joint	Rotasi	Translasi			Kondisi
			X	Y	Z	
1	BaseL	0	-l0	0	0	Kaki kiri Tegak
2	ID2	$R_X(\theta ID2)$	0	0	0	
3	ID4	$R_Y(\theta ID4)$	0	0	l1	
4	ID6	$R_Y(\theta ID6)$	0	0	l2	
5	ID8	$R_Y(\theta ID8)$	0	0	0	
6	ID10	$R_X(\theta ID10) * R_X(45^\circ)$	0	0	0	
7	ID12	$R_Z(\theta ID12)$	0	0	l3	
8	HipL	$R_X(45^\circ)$	0	-l4	0	
9	EoE0	0	0	-l4	0	Kaki kanan berayun
10	HipR	$R_X(45^\circ)$	0	0	-l3	
11	ID11	$R_Z(\theta ID11)$	0	0	0	
12	ID9	$R_X(45^\circ) * R_X(ID9)$	0	0	0	
13	ID7	$R_Y(\theta ID7)$	0	0	-l2	
14	ID5	$R_Y(\theta ID5)$	0	0	-l1	
15	ID3	$R_Y(\theta ID3)$	0	0	0	
16	ID1	$R_X(\theta ID1)$	l0	0	0	

Langkah awal pada Tabel 1 dilakukan analisis terpisah antara untuk analisis model mekanisme kaki tegak dan model mekanisme kaki berayun, kemudian ditahap akhir akan dilakukan penggabungan kedua model tersebut sehingga didapatkan model yang utuh untuk satu siklus gerakan pada robot *bipedal* TFLow 3.0. Berdasarkan dari data analisis Tabel 1, didapatkan persamaan transformasi untuk mekanisme kaki tegak pada Persamaan (14) dan persamaan transformasi untuk mekanisme kaki berayun pada Persamaan (15).

$${}^{BaseL}T_{EoE0} = {}^{BaseL}T_{ID2} \cdot {}^{ID2}T_{ID4} \cdot {}^{ID4}T_{ID6} \cdot {}^{ID6}T_{ID8} \cdot {}^{ID8}T_{ID10} \cdot {}^{ID10}T_{ID12} \cdot {}^{ID12}T_{HipL} \cdot {}^{HipL}T_{EoE0} \quad (15)$$

$${}^{EoE0}T_{EoE1} = {}^{EoE0}T_{HipR} \cdot {}^{HipR}T_{ID11} \cdot {}^{ID11}T_{ID9} \cdot {}^{ID9}T_{ID7} \cdot {}^{ID7}T_{ID5} \cdot {}^{ID5}T_{ID3} \cdot {}^{ID3}T_{ID1} \cdot {}^{ID1}T_{EoE1} \quad (16)$$

$${}^{BaseL}T_{EoE1} = {}^{BaseL}T_{EoE0} \cdot {}^{EoE0}T_{EoE1} \quad (17)$$

$${}^{BaseL}T_{EoE1} = \begin{bmatrix} m11 & m12 & m13 & m14 \\ m21 & m22 & m23 & m24 \\ m31 & m32 & m33 & m34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$P_{EoE1(X,Y,Z)} = {}^{BaseL}T_{EoE1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

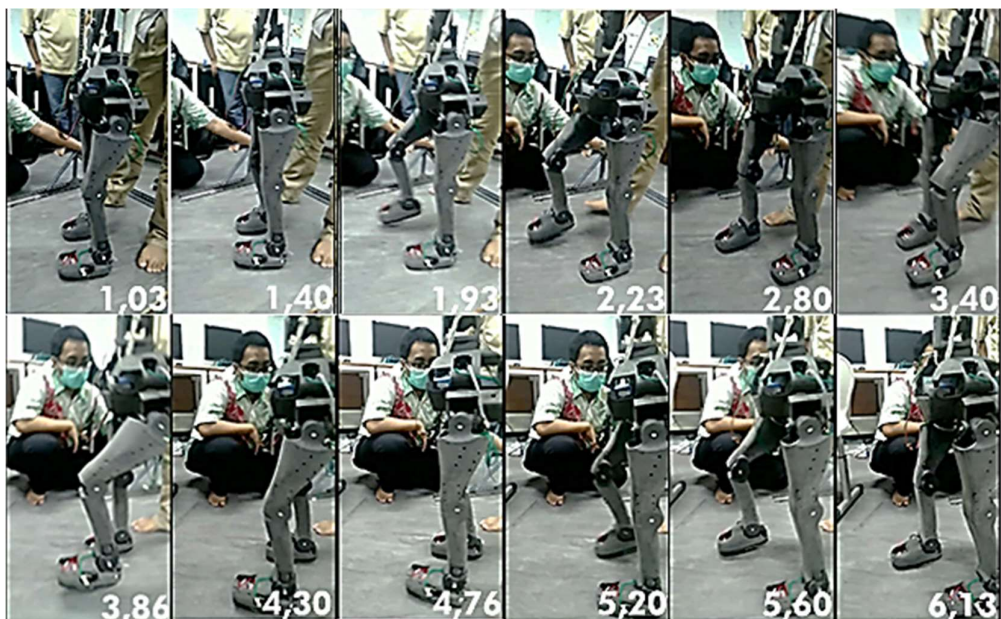
$$P_{EoE1(X,Y,Z)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m14 \\ m24 \\ m34 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Setelah didapatkan Persamaan (15) dan Persamaan (16), Langkah selanjutnya adalah menggabungkan kedua persamaan tersebut dengan matriks transformasi homogen. Sehingga didapatkan model mekanik lengkap pada Persamaan (17). Untuk mengetahui nilai

posisi kartesian X, Y, dan Z dilakukan operasi pada Persamaan (19), sehingga bisa diketahui nilai posisi kartesian untuk X, Y, dan Z pada Persamaan (20).

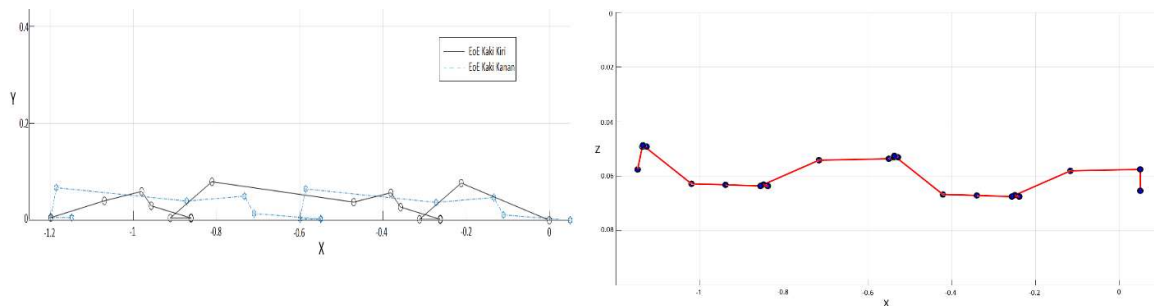
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian berjalan dari robot *bipedal* TFLoW 3.0 yang bertujuan untuk dilakukan analisis berupa hasil pergerakan *end of effector* (EoE) dari kedua kaki dan pergerakan *Center of Mass* (CoM) robot dalam bidang posisi kartesian. Serta untuk mengetahui nilai sudut-sudut yang dihasilkan oleh perhitungan kinematika terbalik yang didapatkan oleh Persamaan (3)-(14) pada bab sebelumnya.



Gambar 11. Pengujian Berjalan

Gambar 11 merupakan hasil pengujian cara berjalan robot *bipedal* TFLoW 3.0 dengan memasukkan input parameter koordinat X, Y, dan Z pada matriks pembangkit pola berjalan pada Persamaan (1). Setelah itu dapat terlihat pola pergerakan berjalan robot *bipedal* TFLoW 3.0 seperti pada Gambar 12.

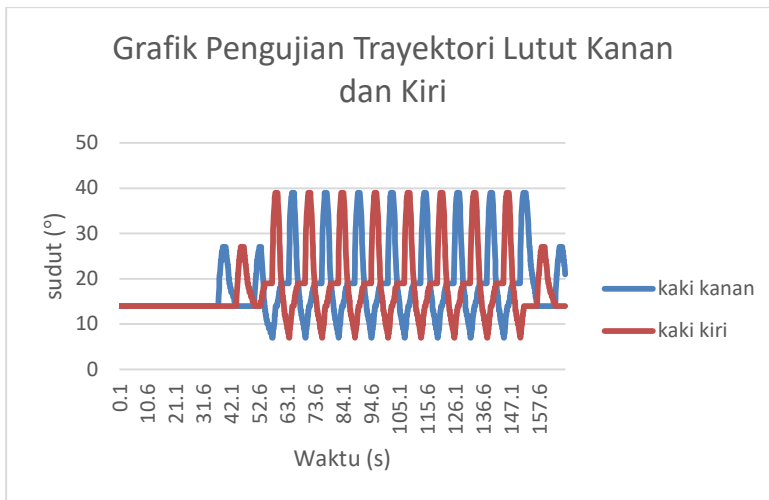


(a) Pergerakan End of Effector Kaki Kiri dan Kanan

(a) Pergerakan Center of Mass

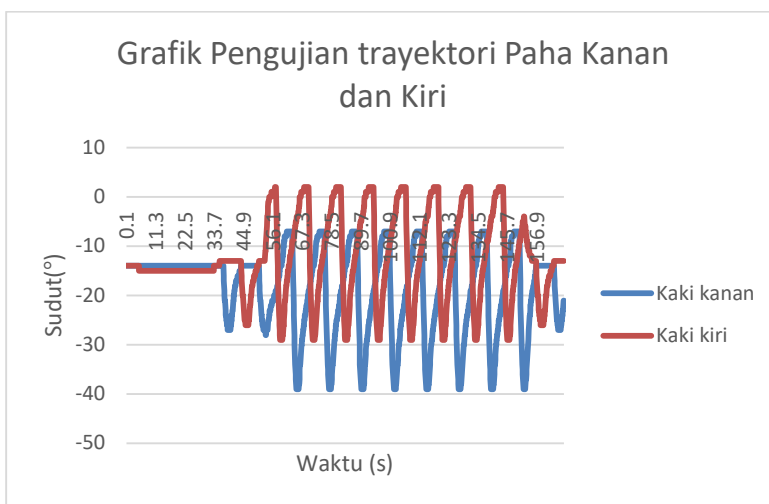
Gambar 12. Pergerakan EoE dan CoM Bipedal TFLoW 3.0

Pergerakan yang dihasilkan pada Gambar 12(a) merupakan pergerakan *End of Effector* dari kaki kanan dan kiri yang secara bergantian membentuk pola seperti sinyal gerigi, sedangkan untuk pergerakan *Center of Mass* dari robot *bipedal* TFLoW terlihat mirip seperti sinyal sinusoidal. Pergerakan tersebut didapatkan dari pemberian input posisi koordinat kartesian X, Y, dan Z pada Persamaan (1) yang kemudian diolah pada pembangkit pola gerakan berjalan pada Persamaan (2).



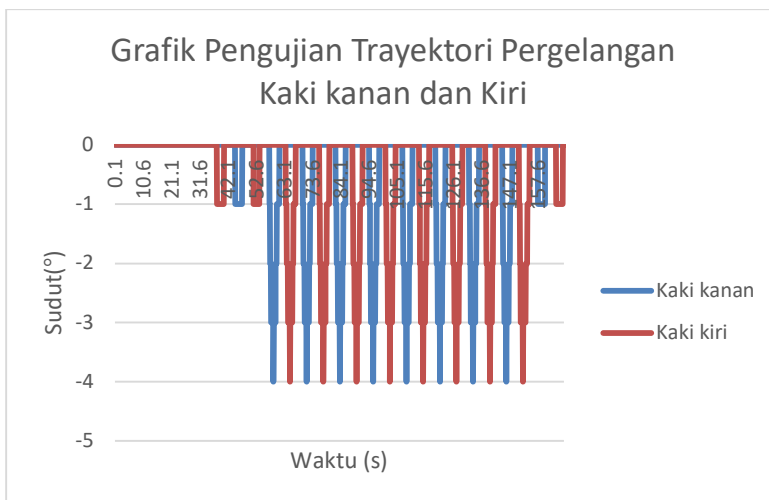
Gambar 13. Trayektori pada Lutut saat Berjalan

Pada Gambar 13 terlihat bahwa *joint* pada lutut mengalami perubahan ketika bergerak maju dengan membentuk grafik sinusoidal pada lutut kanan dan kiri secara bergantian yang dilakukan secara berulang. Nilai sudut maksimal pada *joint* lutut mencapai pada 40° dan nilai sudut minimal nya 7°, dengan nilai sudut awal saat kondisi diam atau postur tegak adalah 12°. Perubahan sudut pada *joint* lutut terhadap waktu t ini dihasilkan dari model kinematika terbalik yang telah dianalisis di bagian bab sebelumnya pada Persamaan (3) - Persamaan(14).



Gambar 14. Trayektori pada Paha saat Berjalan

Pada Gambar 14 terlihat bahwa *joint* pada paha mengalami perubahan ketika bergerak maju dengan membentuk grafik sinusoidal pada paha kanan dan kiri secara bergantian yang dilakukan secara berulang. Nilai sudut maksimal dari *joint* paha mencapai nilai 2° sedangkan nilai sudut minimal nya -39° , dengan nilai sudut awal saat kondisi diam atau postur tegak adalah -14° . Perubahan sudut pada *joint* paha terhadap waktu t ini dihasilkan dari model kinematika terbalik yang telah dianalisis di bagian bab sebelumnya pada Persamaan (3)-(14).



Gambar 15. Trayektori pada Pergelangan Kaki saat Berjalan

Pada Gambar 15 terlihat bahwa *joint* pada pergelangan kaki mengalami perubahan ketika bergerak maju dengan membentuk grafik sinusoidal pada pergelangan kaki kanan dan kiri secara bergantian yang dilakukan secara berulang. Nilai sudut maksimal dari *joint* pergelangan kaki mencapai nilai 0° sedangkan nilai sudut minimal nya -4° , dengan nilai sudut awal saat kondisi diam atau postur tegak sama dengan nilai maksimal nya yaitu 0° . Perubahan sudut pada *joint* pergelangan kaki terhadap waktu t ini dihasilkan dari model kinematika terbalik yang telah dianalisis di bagian bab sebelumnya pada Persamaan (3)-(14).

4. KESIMPULAN

Pada penelitian kali ini telah dilakukan analisis model gaya berjalan dan analisis model kinematika gerak robot *bipedal* TFLoW 3.0 dengan solusi geometri dan transformasi homogen. Sehingga robot dapat berjalan sesuai dengan input posisi kartesian dan dapat dianalisis pola pergerakan dari robot *bipedal* TFLoW 3.0. Berdasarkan hasil eksperimen, robot berhasil berjalan sesuai dengan input yang diberikan dengan metode model pendekatan yang telah dianalisis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua anggota laboratorium RoISC, dan kampus Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, serta kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas dukungan yang telah diberikan untuk mengerjakan penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Aoi, S., Ohashi, T., Bamba, R., Fujiki, S., Tamura, D., Funato, T., Senda, K., Ivanenko, Y., & Tsuchiya, K. (2019). Neuromusculoskeletal model that walks and runs across a speed range with a few motor control parameter changes based on the muscle synergy hypothesis. *Sci. Rep.* 9, 369.
- Arfaq, M., Dewanto, R.S., & Pramadihanto, D. (2018). Fall Detection in T-FLoW Humanoid Robot: V-REP Simulation. *2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), IEEE, Bali*, (pp. 224–228).
- Castermans, T., Duvinage, M., Cheron, G., & Dutoit, T. (2013). Towards Effective Non-Invasive Brain-Computer Interfaces Dedicated to Gait Rehabilitation Systems. *Brain Sci.* 4, 1–48.
- Dimas Pristovani, R., Rindo, W.M., Henfri, B.E., Subhan, K.H.A., & Pramadihanto, D. (2016). Basic walking trajectory analysis in FLoW ROBOT. *2016 International Electronics Symposium (IES), IEEE, Denpasar*, (pp. 329–334).
- Matthis, J.S., Barton, S.L., & Fajen, B.R. (2017). The critical phase for visual control of human walking over complex terrain. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, E6720–E6729.
- Molledo, M., Baček, T., Verstraten, T., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., & Lefeber, D. (2018). Powered ankle-foot orthoses: the effects of the assistance on healthy and impaired users while walking. *J. NeuroEngineering Rehabil.* 15, 86.
- Nashihin, D., Dimas Pristovani, R., Sandi Marta, B., Dewanto, R.S., & Pramadihanto, D. (2018). Multivariable Control for Jumping Mechanism of T-FLoW Humanoid Robot. *2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), IEEE, Bali*, (pp. 260–265).
- Noreils, F.R. (2017). Inverse kinematics for a Humanoid Robot: a mix between closed form and geometric solutions. *Technical Report*, 1-31.
- Pristovani, R.D., Ajir, Henfri, B.E., Subhan, K.A., Sanggar, D., & Pramadihanto, D. (2017a). Implementation of direct pass strategy during moving ball for “T-FLoW” Humanoid Robot. *2017 2nd International Conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), IEEE, Yogyakarta*, (pp. 223–228).
- Pristovani, R.D., Henfri, B.E., Sanggar, Dewanto., & Pramadihanto, D. (2017b). Walking strategy model based on zero moment point with single inverted pendulum approach in “T-FLoW” humanoid robot. *2017 2nd International Conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), IEEE, Yogyakarta*, (pp. 217–222).

- Pristovani, R.D., Sanggar, D.R., & Pramadihanto, D. (2018). Implementation of Push Recovery Strategy Using Triple Linear Inverted Pendulum Model in "T-FloW" Humanoid Robot. *J. Phys. Conf. Ser.* 1007, 012068.
- Sari, W.P., Sanggar Dewanto, R., & Pramadihanto, D. (2019). Kinematic and Dynamic Modelling of "T-FLoW" Humanoid Robot for Ascending and Descending Stair. *2019 International Electronics Symposium (IES), IEEE, Surabaya, Indonesia*, (pp. 82–87).
- Sen, M.A., Bakircioglu, V., & Kalyoncu, M. (2017). Inverse Kinematic Analysis Of A Quadruped Robot. *International Journal Of Scientific & Technology Research* 6, 5.
- Sucipto, A., Dewanto, R.S., & Pramadihanto, D. (2021). Gerak Robot Berkaki Dua menggunakan ROS dan RViz sebagai Visualisasi Interaktif. *ELKOMIKA: J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.* 9, 43.
- Sucipto, A., Dewanto, S., & Pramadihanto, D. (2019). Dynamic Stability Walking On Inclined Surface For "T-FloW" Humanoid Robot Using Design Pattern Step. *2019 International Electronics Symposium (IES), IEEE, Surabaya, Indonesia*, (pp. 100–104).