

IMPLEMENTASI KINEMATIKA MAJU DAN MUNDUR ROBOT BERKAKI EMPAT (TETRAPOD ROBOT)

¹ Moch. Burhanuddin Alfarobbi, ²Andis Wijaya, ³Dwi Puri Fatmawati,

⁴ Rizky Asilia Puspita Sari, ⁵ Siti Sendari

^{1,2,3,4,5} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Malang

¹ burhanalfaroby@gmail.com, ² sidnawijaya19@gmail.com, ³ dwi.puri1566@gmail.com,

⁴ rasiliaa06@gmail.com, ⁵ siti.sendari.ft@um.ac.id

Abstrak—Pada tulisan ini, penulis membahas tentang robot berkaki. Robot ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan robot beroda salah satunya adalah dapat mengatasi sebuah medan yang tidak rata sehingga robot bisa beradaptasi terhadap medan yang dilaluinya. Robot yang diteliti dalam tulisan ini adalah robot berkaki empat atau yang biasa disebut sebagai *Quadruped* yang beranatomis seperti serangga maupun reptil. Namun karena istilah *Quadruped* ini lebih mengarah pada anatomi hewan kelas bertulang seperti rusa, kucing dsb. Maka diubahlah kata kuncinya menjadi *Tetrapod*. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji lebih dalam terkait dengan pengaturan kinematika serta algoritma jalan pada robot tetrapod dengan 3 derajat kebebasan. Dalam penelitian ini Robot *Tetrapod* dirancang dengan mempunyai 4 kaki dimana setiap kakinya memiliki 3 derajat kebebasan. Setiap kaki robot terdiri dari 3 sumbu yaitu maju-mundur pada sumbu y, kiri-kanan pada sumbu x dan naik-turun beserta rotasinya pada sumbu z. Servo pertama yang merekat pada badan robot digunakan untuk rotasi dari *end-effector*. Servo kedua yang merekat pada servo pertama dan servo ketiga digunakan untuk membuat *end-effector* naik-turun dan merapat-menjauh dari badan robot. Dari percobaan kinematika yang telah dilakukan dengan akan dianalisis dengan menggunakan desain geometri dengan bantuan koordinat kartesian dan polar 3 sumbu. Dari data yang telah diperoleh maka dapat diketahui bahwa Semakin tinggi nilai Z_{offset} maka semakin rendah nilai Pitch dan hal inilah yang menentukan lebar langkah robotnya.

Kata Kunci—*Tetrapod*; *Kinematika Maju*; *Kinematika Mundur*; 3DoF

Abstract— In this paper, the writer discusses about legged robot. This robot has several advantages over the wheeled robot one of them is able to overcome an uneven field so that the robot can adapt to the field in its path. The research of this paper is a four-legged robot or commonly referred to as *Quadruped* that is anatomical-like insect or can be reptil. But because the term *Quadruped* is more directed to the anatomy of species of bony classes animals such as horse deers, cats and so on. Then key word became *Tetrapod*. The purpose of this research is to add knowledges about kinematics setting and walk algorithm at tetrapod robots with 3 DoF. In this research the *Tetrapod Robot's* design with 4 feet in which each leg has 3 DoF. Each robot leg consists of 3 axis ie, back-front at y axis, left-right at x axis and up-down with its rotation at z axis. The first servo attached to robot body is used to end-effector's rotation. The second servo attached with first servo and third servo is used to make the end-effector up-down and close on-be away from the robot body. From kinematics experiments that have been done with will be analyzed by using geometry design with support of cartesian and polar 3 axis coordinate. From data have been obtained can be known that higher value of Z_{offset} hence lower value of pitch and from that determine the how far robot move.

Keywords—*Tetrapod*; *Forward Kinematics*; *Invers Kinematics*, 3DoF

I. PENDAHULUAN

Berbagai jenis teknologi telah banyak diciptakan untuk dapat mempermudah aktifitas sehari-hari. Salah satu teknologi yang sedang berkembang cukup pesat yaitu pada ilmu elektronika bidang robotika. Robot merupakan suatu benda yang memiliki kecerdasan tertentu, mempunyai bentuk fisik dan penggerak yang didesain untuk mampu bergerak untuk melaksanakan suatu tugas[3].

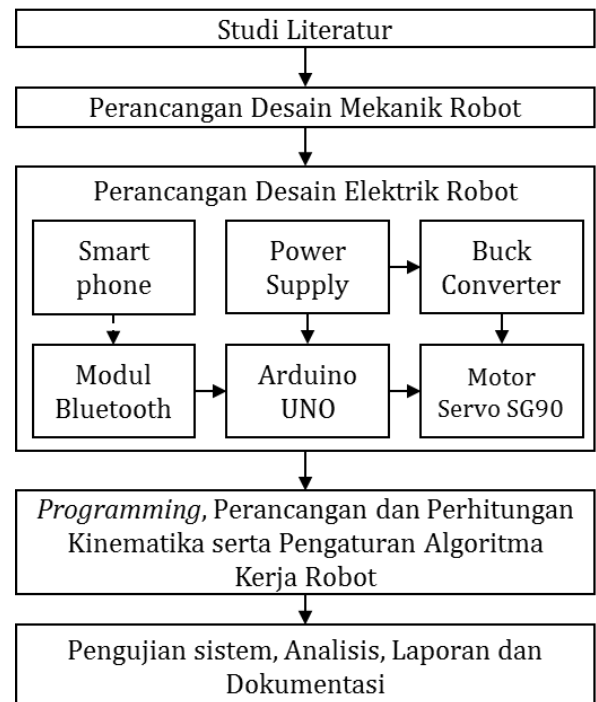
Robot memiliki berbagai bentuk dari yang menyerupai kendaraan, mesin, makhluk hidup dll. Pada tulisan ini, penulis akan membahas tentang robot berkaki. Robot ini memiliki beberapa kelebihan dari robot beroda salah satunya adalah dapat mengatasi sebuah medan yang tidak rata sehingga robot bisa beradaptasi terhadap medan yang dilaluinya. Adapun robot yang diteliti dalam tulisan ini adalah robot berkaki empat atau yang biasa disebut sebagai *Quadruped* yang beranatominya seperti serangga. Namun karena istilah *Quadruped* ini lebih mengarah pada anatomi spesies hewan bertulang seperti singa, kucing dsb[6][7][8]. Maka diubahlah kata kuncinya menjadi *Tetrapod*[12].

Terdapat beberapa sebab adanya penulisan ini diantaranya karena penulis sangat jarang menemukan referensi yang menyatakan dengan jelas terkait kinematika pada robot bersendi. Harapan penulis, tulisan berikut dapat menjelaskan tentang kinematika pada robot bersendi dan dapat dipahami dengan mudah.

Dengan pengimplementasian kinematika ini banyak dihasilkan robot yang dapat digunakan untuk membantu kegiatan manusia. Contohnya, yaitu pada implementasi metode kinematika maju dan mundur terhadap pergerakan robot tetrapod ini. Kedua kinematika ini digunakan untuk mengatur gerak kaki-kaki robot dan smartphone digunakan sebagai kendali jalannya dari robot.

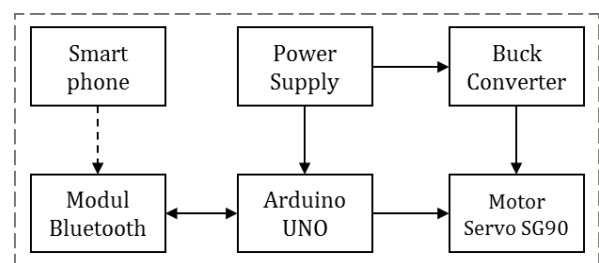
II. METODE PENELITIAN

Rancangan penelitian dalam perancangan robot *Tetrapod* adalah sebagai berikut :



Gambar 1. Desain Penelitian

Sistem yang dirancang dan dibangun adalah sebuah robot *Tetrapod* (berkaki empat) yang dikontrol oleh mikrokontroler Arduino Uno sebagai processor yang bertugas memproses perintah untuk menggerakkan motor servo yang berfungsi sebagai sendi-sendi pada robot. Robot akan aktif setelah daya dari baterai terhubung ke sistem mikrokontroler arduino uno, rangkaian shield driver dan motor servo. Blok diagram sistem dapat dilihat pada gambar berikut.

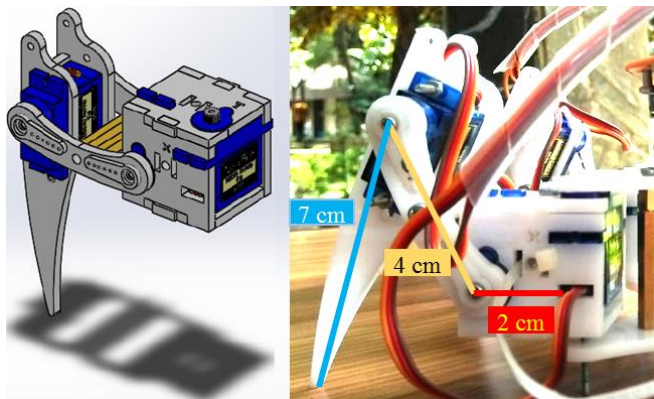


Gambar 2. Blok Diagram Elektrik

Robot *Tetrapod* yang dirancang dalam penelitian ini mempunyai 4 kaki dimana setiap kakinya memiliki 3 derajat kebebasan. Setiap kaki robot terdiri dari 3 sumbu yaitu, maju-mundur(y), kiri-kanan(x) naik-turun serta rotasinya(z). Servo pertama yang merekat pada badan

robot digunakan untuk membuat *end-effector* bergerak maju-mundur pada sumbu z. Servo kedua yang merekat pada servo pertama digunakan untuk membuat *end-effector* naik-turun dan servo ketiga yang menempel pada kaki digunakan untuk membuat *end-effector* merapat atau menjauh dari badan robot.

Servo pertama dan kedua dipasang berhimpitan sehingga jarak sumbu tengah antar servo adalah 2 cm. Servo kedua dan ketiga dihubungkan dengan sebuah *link*, jarak antar pusat servo kedua dan ketiga adalah 4 cm. Servo ketiga berhubungan langsung dengan *end-effector*. Jarak antara pusat servo ketiga dengan *end-effector* adalah 7 cm.

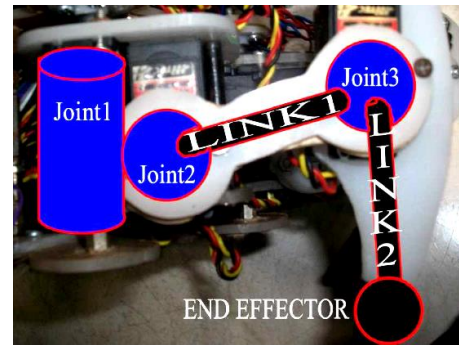


Gambar 3. Dimensi Struktur Kaki Robot

Robot *tetrapod* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki 3 (tiga) derajat kebebasan, dengan demikian setiap kaki robot mampu bergerak pada 3 (tiga) sumbu, sehingga langkah yang tepat untuk menggambarkan geometri pergerakan kaki robot adalah dengan menggunakan koordinat kartesian.

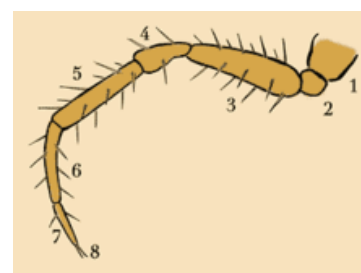
Setiap motor servo atau *joint* akan digambarkan dengan tabung di mana pusat lingkaran alas dan tutupnya merupakan poros putar dari motor servo.

Link yang merupakan penghubung antar *joint* akan digambarkan dengan garis lurus sementara *end-effector* yang akhir tujuan kaki robot akan digambarkan dengan sebuah lingkaran hitam.



Gambar 4. Model Transformasi *link*, *joint* dan *end-effector*[10]

Untuk pencarian persamaan yang akan digunakan, penulis menggunakan teorema pythagoras dan hukum trigonometri sedangkan untuk penamaan *link* dan *joint* menggunakan referensi berdasarkan gambar berikut:



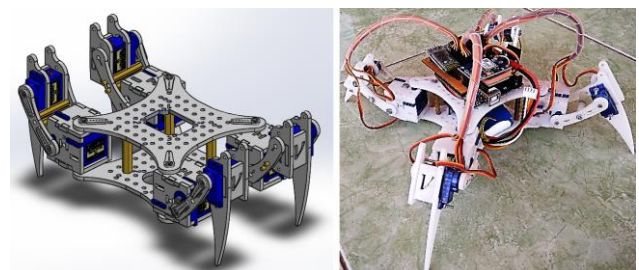
Keterangan:

1. Coxa
2. Trochanter
3. Femur
4. Patella
5. Tibia
6. Metatarsus
7. Tarsus
8. Claws

Gambar 6. Anatomi kaki serangga laba-laba

Karena dalam batasan penelitian ini penulis hanya mengambil 3 DoF (*Degree of Freedom*)[8] maka dari gambar 6 tersebut, penulis hanya menggunakan 3 buah *link* (*coxa*, *femur* dan *tibia*) dan 3 buah *joint* (*coxa*, *trochanter* dan *patella*).

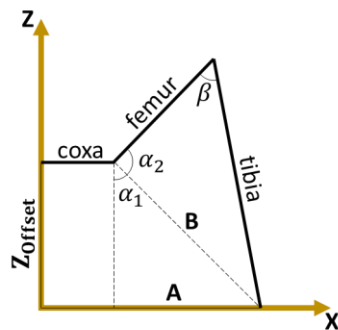
III. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 7. Desain Mekanik Robot *Tetrapod*

Kinematika akan dianalisis dengan menggunakan desain geometri dengan bantuan koordinat kartesian dan polar 3 sumbu, namun untuk menganalisa ruang dimensi 3 sekaligus akan sangat sulit diimplementasikan. Oleh

karena itu, penulis akan menganalisis terhadap 2 sumbu terlebih dahulu, yaitu sumbu x dan sumbu z. Untuk mengatur pergerakan naik-turun dan maju mundur kaki robot digunakan kinematika mundur (*invers kinematics*) pada joint 2(α) dan joint 3(β).



Gambar 8. Ilustrasi gambar kaki dengan koordinat sumbu x dan z

Dari gambar 8 terlihat bahwa sudut yang dibentuk motor servo kedua dan ketiga hanya dipengaruhi oleh 2 sumbu, yaitu sumbu x dan sumbu z. Dimana untuk mencari masing-masing sudut tersebut menggunakan persamaan berikut:

$$A = P - coxa \dots \dots \dots (1)$$

$$B = \sqrt{A^2 + Z_{offset}^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{femur^2 + tibia^2 - B^2}{2 \cdot femur \cdot tibia} \dots \dots \dots (3)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{femur^2 + B^2 - tibia^2}{2 \cdot femur \cdot B} \dots \dots \dots (4)$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \frac{A}{B} \dots \dots \dots (5)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \dots \dots \dots (6)$$

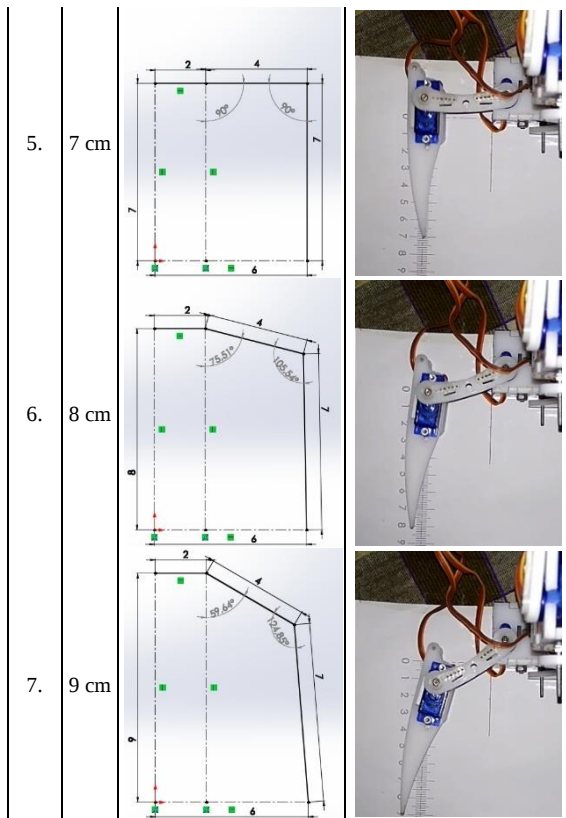
P merupakan *end-effector* yang menjadi titik akhir tujuan. Untuk menentukan nilai akhir dari P digunakan jumlah total panjang dari coxa dan femur (nilai minimal). Hal ini perlu diperhatikan karena jika tidak maka kaki robot (*end-effector*) akan menjorok ke dalam di bawah badan robot.

Z_{offset} merupakan sebuah variabel yang menentukan tinggi rendahnya robot saat berdiri maupun berjalan. α merupakan sudut pada trochanter dan β

merupakan nilai sudut pada patella. Untuk nilai P_{tengah} diambil nilai minimumnya yang berasal dari jumlah panjang coxa dan femur. nilai Penentuan gerak pada kedua sendi tersebut menggunakan kinematika mundur berdasarkan koordinat kartesian sumbu x dan z yaitu pada *end-effector* P dan Z_{offset} . Berikut ini beberapa sampel hasil pergerakan dari persamaan kinematika mundur dengan ketentuan $Pitch = 0^\circ$ dan $P = 6$ cm yang merupakan nilai ideal P.

Tabel 1. Hasil Simulasi dan Impelentasi Kinematika Mundur Pada Kaki Robot.

No.	Z_{offset}	Hasil Simulasi	Implementasi
1.	3 cm		
2.	4 cm		
3.	5 cm		
4.	6 cm		



Untuk menentukan nilai Z_{offset} tertinggi dapat diketahui dari persamaan berikut:

$$P = \frac{x}{\cos Pitch} \dots \dots \dots (7)$$

$$Z_{offset} = \sqrt{(femur + tibia)^2 - A^2} \dots \dots \dots (8)$$

Pada persamaan 8 nilai A yang diperoleh mempunyai ketentuan sudut 45° dalam persamaan 7 yang kemudian dimasukkan dalam persamaan 1. $Pitch$ merupakan sebuah nilai yang mengimplementasikan sudut putar pada sumbu Z. Dari kinematika inilah dicari nilai maksimal pergerakan dari kaki robotnya dengan persamaan berikut:

$$A_{max} = \sqrt{(femur + tibia)^2 - Z_{offset}^2} \dots \dots \dots (9)$$

$$P_{ujung} = coxa + A_{max} \dots \dots \dots (10)$$

$$P_{tengah} = coxa + femur \dots \dots \dots (11)$$

$$Pitch = \cos^{-1} \frac{P_{tengah}}{P_{ujung}} \dots \dots \dots (12)$$

$$Y_{(pitch)} = x \cdot \tan Pitch \dots \dots \dots (13)$$

A_{max} merupakan sebuah variabel yang menunjukkan nilai A yang berada pada panjang maksimal yang ditandai dengan *end-effector* berada pada P_{ujung} . Sedangkan P_{tengah} merupakan sebuah keadaan dimana nilai $Pitch = 0^\circ$. Untuk mengetahui nilai Y dari titik P menggunakan persamaan 13.

Setelah menentukan sudut pada trochanter dan patella langkah berikutnya adalah mencari gerak maksimal (P_{tip}) ujung kaki mengikuti garis P. Adapun penentuan dari gerakan tersebut menggunakan kinematika maju berdasarkan koordinat polar sudut putar pada sumbu Z dan Z_{offset} . Berikut ini merupakan beberapa sampel data gerak sudut maksimal berdasarkan nilai Z_{offset} .

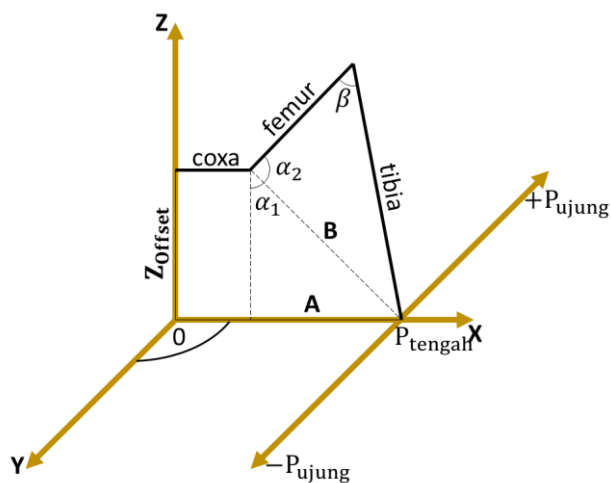
Tabel 2. Sampel Pergerakan Sudut Maksimal Berdasarkan Nilai Z_{offset}

No.	Z_{offset}	θ_{max}	θ_{test}	α	β	Keterangan
1.	1 cm	$62,41^\circ$	30°	$179,58^\circ$	$44,83^\circ$	Within Reach
2.	1 cm	$62,41^\circ$	45°	$160,19^\circ$	$66,93^\circ$	Within Reach
3.	1 cm	$62,41^\circ$	60°	$116,53^\circ$	$130,01^\circ$	Within Reach
4.	3 cm	$61,52^\circ$	30°	$148,31^\circ$	$55,51^\circ$	Within Reach
5.	3 cm	$61,52^\circ$	45°	$136,76^\circ$	$75,58^\circ$	Within Reach
6.	3 cm	$61,52^\circ$	60°	$97,80^\circ$	$141,79^\circ$	Within Reach
7.	5 cm	$59,43^\circ$	30°	$117,73^\circ$	$73,70^\circ$	Within Reach
8.	5 cm	$59,43^\circ$	45°	$111,04^\circ$	$92,11^\circ$	Within Reach
9.	5 cm	$59,43^\circ$	60°	#NUM!	#NUM!	Out of Range
10.	7 cm	$55,09^\circ$	30°	$89,11^\circ$	$98,51^\circ$	Within Reach
11.	7 cm	$55,09^\circ$	45°	$83,30^\circ$	$117,73^\circ$	Within Reach
12.	7 cm	$55,09^\circ$	60°	#NUM!	#NUM!	Out of Range
13.	9 cm	$43,88^\circ$	30°	$56,99^\circ$	$136,01^\circ$	Within Reach
14.	9 cm	$43,88^\circ$	45°	#NUM!	#NUM!	Out of Range
15.	9 cm	$43,88^\circ$	60°	#NUM!	#NUM!	Out of Range

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa jika sudut percobaan yang dimasukkan melebihi sudut maksimal maka penentuan sudut pada servo trochanter (α) maupun patella (β) akan bernilai #NUM! atau nan (not a number) yang menandakan bahwa *end-effector* yang dituju telah melebihi batas jangkauan yang ada.

Setelah menentukan sudut dari joint 2 (α) dan joint 3 (β) dimulailah menentukan sudut dari joint 1 yaitu sumbu putar pada sumbu Z. Sudut pada joint 1 inilah yang akan menentukan rotasi robotnya. Untuk menentukan hal tersebut digunakanlah kinematika maju

(forward kinematics) yang menjadi dasar gerakannya. Untuk model dari kakinya bisa dilihat pada gambar berikut:



Gambar 9. Model kaki pada 3 sumbu x, y dan z

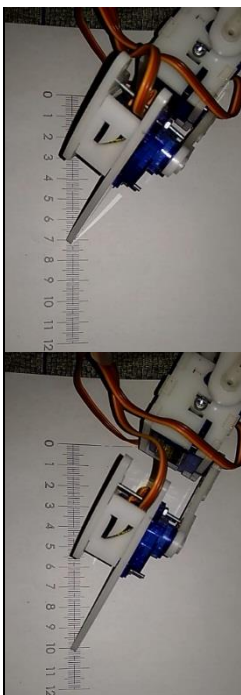
Dari pencarian sudut maksimal tersebut dapat dilanjutkan pada pengaturan gerak robot untuk bergerak maju, mundur, kanan, kiri, berbelok atau berputar dengan menggunakan kinematika maju. Berikut ini beberapa sampel hasil pergerakan dari persamaan sebelumnya dengan ketentuan $Z_{offset} = 1,9\text{ cm}$ dan $P = 6\text{ cm}$ (nilai ideal untuk P):

Tabel 3. Hasil Perhitungan dan Implementasi Kinematika Maju Pada Kaki Robot

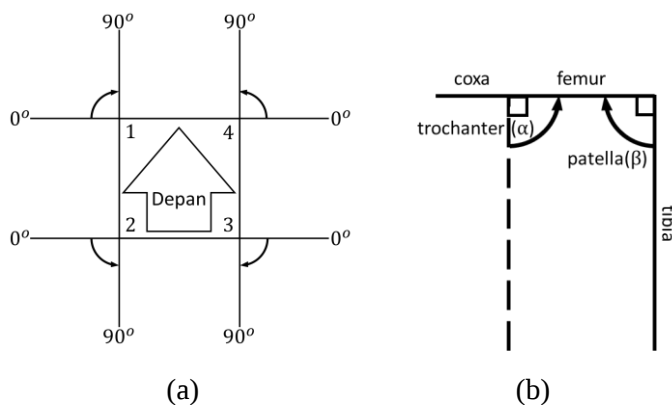
No.	Sudut Pitch	α	B	Nilai Y pada titik P	Implementasi
1.	0°	176,80°	35,85°	0 cm	

2.	10°	175,60°	37,14°	0,95 cm	
3.	20°	171,99°	41,16°	2,07 cm	
4.	30°	165,85°	48,51°	3,33 cm	
5.	40°	156,55°	60,74°	4,86 cm	

6.	50°	141,74°	82,20°	6,9 cm
7.	60°	109,12°	133,59°	9,99 cm

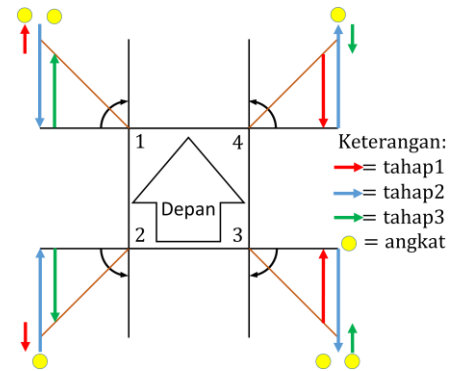


Setelah mengatur kinematika maju maupun mundur pada kaki robot dibuatlah *default* untuk sudut kerja aktuatornya seperti pada gambar berikut:

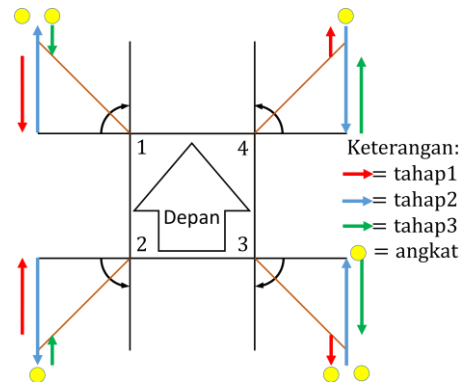


Gambar 10.(a) *default* posisi untuk joint 1 tampak atas, (b) *default* posisi untuk joint 2 (trochanter) dan joint 3 (patella) pada masing-masing kaki

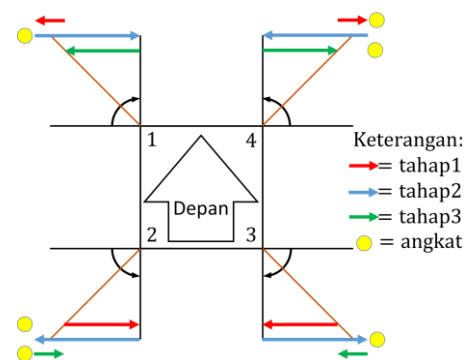
Dari gambar 10 tersebut dibuatlah sebuah algoritma jalan robotnya seperti yang tampak pada gambar 11 sampai dengan gambar 16 yang merupakan contoh algoritma jalan robot secara umum.



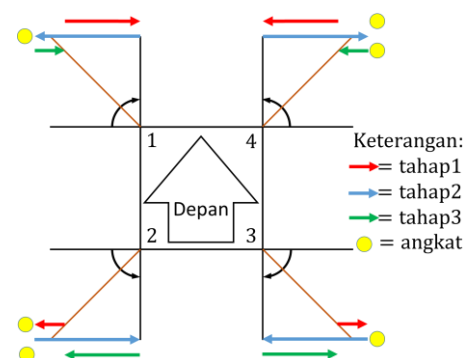
Gambar 11. Algoritma gerak untuk robot bergerak maju



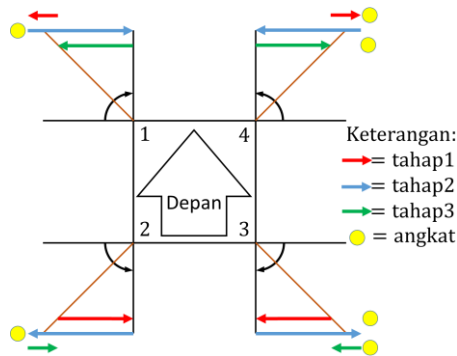
Gambar 12. Algoritma gerak untuk robot bergerak mundur



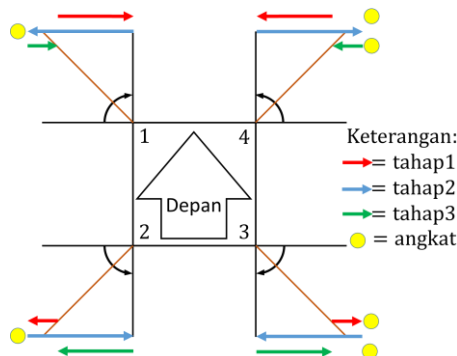
Gambar 13. Algoritma gerak untuk robot bergerak ke kanan



Gambar 14. Algoritma gerak untuk robot bergerak kiri



Gambar 15. Algoritma Gerak Untuk Robot Belok Kanan



Gambar 16. Algoritma Gerak Untuk Robot Belok Kiri

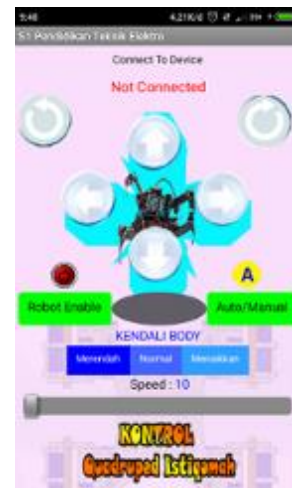
Untuk mengetahui hasil dari seberapa jauh robot berjalan dengan sebuah algoritma untuk bergerak maju, mundur, ke kanan atau ke kiri bisa diketahui hasil idealnya dari persamaan 13 (Y_{pitch}). Hasil dari pergerakan robot dengan sebuah algoritma yang dijalankan dengan sampel $Z_{offset} = 4 \text{ cm}$ bisa dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. Perbandingan hasil perhitungan dan percobaan pada pergerakan robot

No.	Arah Gerakan	Jarak tempuh ideal	Jarak yang berhasil ditempuh robot percobaan ke-...			
			1	2	3	4
1.	Maju	10,68 cm	3 cm	3,5 cm	4 cm	4,5 cm
2.	Mundur	10,68 cm	4 cm	3,5 cm	4 cm	4,5 cm
3.	Ke Kanan	10,68 cm	4,5 cm	3 cm	4,7 cm	4 cm
4.	Ke Kiri	10,68 cm	4 cm	4,5 cm	4 cm	3,5 cm

Dari tabel 4 bisa diketahui bahwa jarak tempuh yang dilakukan pada percobaan memiliki selisih yang sangat besar dibawah 50% jarak tempuh ideal yang dimana hasil tempuh pada percobaan rata-rata hanya sampai pada 4,0125 cm. Hal ini disebabkan aktuator yang kurang kuat torsinya sehingga jarak yang diinginkan

tidak bisa tercapai. Penulis juga membuat sebuah kendali menggunakan Smartphone untuk mengontrol robot *tetrapod* secara langsung.



Gambar 17. Kendali robot *tetrapod*

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan ini dapat diambil beberapa kesimpulan ,yaitu:

1. Dengan menggunakan kinematika pada robot yang bersendi, maka akan semakin mudah pengaturan gerak *end-effector* robot dengan lebih akurat dibandingkan mengatur dengan metode *trial error* pada setiap sendi yang ada.
2. *end-effector* yang dituju harus berapa dalam jangkauan kerja karena jika tidak maka robot tidak akan bekerja sesuai yang diharapkan.
3. Semakin tinggi nilai Z_{offset} maka semakin rendah nilai *Pitch* yang berarti Z_{offset} sangat mempengaruhi lebar langkah robot ini.
4. Untuk hasil yang lebih baik dan presisi disarankan menggunakan aktuator yang lebih presisi, bertorsi kuat dan seragam posisinya dengan aktuator lainnya serta desain mekanik yang lebih baik tentunya.

Untuk rencana kedepannya penulis ingin mengembangkan robot ini bisa menjadi robot halang rintang, memiliki sistem kendali dan kecerdasan buatan yang lebih terintegrasi serta mekanik yang lebih baik.

Daftar Pustaka

- [1] Hessmer, Dr. Rainer 2009, Kinematics for Lynxmotion Robot Arm, diambil 25 Mei 2018, dari <http://www.hessmer.org>.
- [2] ORJ, Official Robotic Japan atau Japan Industrial Robotics Association 1997, Robotics for Electronics Manufacturing, diakses 26 Mei 2018, dari <http://books.google.co.id>
- [3] RIA, Robot Institute of America 1979, Robot Definition, diakses 26 Mei 2018, dari <http://www.robotiksistem.com>
- [4] Donghyoen KANG, Michihisa IIDA, Mikio UMEDA, The walking control of a hexapod robot for collecting field information, JSAM 71 (1) 63-71, 2009
- [5] M.luneckas, T. Lucneckas, D. Udris, N. M. F. Ferreira, Hexapod Robot Energy Consumption Dependence on Body Elevation and Step Height, Elektronika IR Elektrotechnika ISSN: 1392-1215 vol 20 no.7 2014
- [6] Oak, Sachin, and Vaibhav Narwane. "Design, Analysis and Fabrication of Quadruped Robot with Four bar Chain Leg Mechanism." *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* 1.6 (2014): 340-345.
- [7] Ding, Xilun, et al. "Locomotion analysis of hexapod robot." *Climbing and walking robots*. InTech, 2010.
- [8] Sproewitz, Alexander, et al. "Compliant leg design for a quadruped robot." *Abstracts of Dynamic Walking 2009*. No. BIOROB-CONF-2008-014. 2009.
- [9] Umar asif, Improving The Navigability of a Hexapod Robot Using a Fault Tolerant Adaptive Gait, In Tech, 2012
- [10] Kusuma, Johan Wijaya. "Penerapan Inverskinematik Terhadap Pergerakan Kaki Pada Robot Hexapod." (2013).
- [11] Rosario SINATRA, fengfeng XI, Stefan STAICU, Kinematics of Hexapod Parallel Robot, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol.71, Iss. 4, ISSN : 1454-2358, 2009
- [12] Duan, Q. J., et al. "Modeling Tetrapods Robot and Advancement." *Global Design to Gain a Competitive Edge*. Springer, London, 2008. 499-507.