

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KENDALI LINGKAR TERTUTUP GAIT ROBOT HEXAPOD UNTUK MENDETEKSI, MENAIKI DAN MENURUNI TANGGA

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HEXAPOD GAIT CLOSE-LOOP CONTROL FOR DETECTING, ASCENDING AND DESCENDING STAIRS

Nicholas Ferdian Lawrence¹, Ahmad Qurthobi², Muhammad Hablul Barri³
Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
nicholaslauw@telkomuniversity.student.ac.id

Abstrak

Robot berkaki semacam *Hexapod* memiliki tantangan sendiri dalam melewati sebuah medan tak rata. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan implementasi algoritma kendali sistem PID dalam menaiki tangga dan menuruni tangga, dan mendeteksi tangga. Perancangan sistem kendali robot dilakukan dengan mendesain pergerakan kaki dari masing-masing kaki dengan membuat regresi tiap kaki. Setelah didapatkan regresinya, maka akan diimplementasikan ke dalam algoritma dengan merancang kendalinya menggunakan PID yaitu menentukan K_p , K_i , K_d dengan mengendalikan nilai pitch diharapkan mendapatkan setpoint 0° . Proses tuning dilakukan dengan metode Ziegler-Nichols. Hasil dari proses tuning adalah sistem yang paling stabil merupakan sistem PI yang sesuai karena *time settling* dan *overshoot* paling kecil masing-masing 0,11759 detik dan 66,67% dengan nilai K_u 0,5, K_p 0,081, dan K_i adalah 1,082504 detik akan tetapi terdapat *steady-state error* dengan nilai 3° , tuning yang belum sempurna. Pada melewati tangga dilakukan perbandingan lama melewati tangga saat sebelum diberikan kontrol dan setelah diberikan kontrol. Hasil dari perbandingan proses melewati tangga menunjukkan bahwa saat diberikan kontrol memiliki waktu tempuh yang lebih singkat dari pada tanpa diberikan kontrol dengan efisiensi sebesar 15,3%.

Kata kunci – CMPS12, sudut pitch,
Propotional Integral Differential(PID), metode *tunning* Zeagler-Nichols .

Abstract

A legged robot such as the Hexapod has its own challenge to travel an uneven terrain. Therefore, in this study, I carry out the implementation of the PID control system algorithm for climbing, descending, and detecting the stair's slopes. The control system of robot design was helded by designing linear regression in each legs for obtaining a well balancing process. After obtaining the regression, it was implemented to PID control algorithm. Furthermore, tunning the K_p , K_i , and K_d by controlling the pitch angle, it is determined for getting the desire value to 0° pitch angle by using Ziegler-Nichols method for tunning method. The result is the most stable system that possible to apply to system is a PI system because the settling time and the percent overshoot in the smallest values respectively at 0.11759 seconds and 66%, by the K_u values is 0.5, K_p is 0,081, and K_i is 1,082504. However, it got 3° *steady-state error* that yet still incomplete tunning product. Passing stairs test was tested by comparing the length of time passing the stairs without control and using control. The results of comparison process of passing the stairs shows that when using control has a shorter travel time than without control with an efficiency of 15.3%.

Keywords – Zero Moment Point (ZMP), Support Polygon, CMPS12, pitch angle,
Proportional Integral Differential(PID), Zeagler-Nichols tunning method

1. Pendahuluan

Kemajuan teknologi dalam dunia robotika memiliki banyak arti dalam membantu kegiatan manusia dalam banyak hal terutama dalam sektor industri. Sebuah robot umumnya memiliki sistem kendali dan digerakkan otomatis, tidak menutup kemungkinan digerakkan secara manual.

Robot Hexapod merupakan robot berkaki enam, dengan cara jalan seperti serangga. Robot Hexapod memiliki manfaat lebih dalam mekaniknya untuk melalui rintangan jalan tak rata dan kasar dibandingkan robot beroda [1]. Medan tak rata dapat berupa jalan bebatuan, tangga, tanah, maupun tumpukan pasir. Pada penelitian ini menggunakan tangga sebagai studi kasus pada medan yang tak rata terkhususnya pada medan tangga. Terdapat beberapa referensi yang telah dilakukan sebelumnya dalam kasus robot menaiki tangga. Kasus-kasus disini diambil berdasarkan ukuran robot yang mirip dengan robot yang diteliti. Antara lain, penelitian mengenai penelitian tentang body levelling [2]. Selanjutnya, terdapat robot dengan menggunakan citra kamera stereo untuk memetakan medan tak rata [3]. Robot ini dapat melewati panggung secara otomatis menggunakan sensor ultrasonik untuk mendeteksi tangga dan sensor MPU9050 untuk mendeteksi inklinasi pada robot [4]. Dan yang terakhir mengenai pergerakan robot Hexapod medan tak rata yang penelitiannya digunakan dalam keadaan bencana [5]. Penelitian ini akan mengembangkan kasus dari menaiki panggung menjadi kasus menaiki tangga yaitu dengan menentukan langkah kaki pada robot Hexapod untuk mendeteksi, menaiki, dan menuruni tangga. Robot Hexapod dalam mendeteksi, menaiki dan menuruni tangga merupakan tantangan tersendiri dalam menentukan langkah kaki menapakkan tangga secara otomatis.

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan rancangan gait dan sistem kendali PID kestabilan untuk menaiki, dan menuruni tangga dengan mengimplementasi algoritma PID dan parameter nilai K_p, K_i, K_d yang tepat agar robot dapat berjalan stabil dengan sudut inklinasi 0° dari permukaan tanah serta mendapatkan keandalan perbandingan lama robot melewati tangga dengan membandingkan saat diberikan kendali PID dan tidak diberikan kendali PID.

Terdapat batasan masalah yang harus ditentukan yaitu medan tangga yang dibuat dibuat disesuaikan dengan peraturan Kontes Robot Pemadam Api Indonesia 2020. Yang pasti ukuran anak tangga lebih kecil dari ukuran skala manusia disesuaikan dengan ukuran kaki robot. Lalu, robot dibuat sedemikian rupa dengan peraturan KRPAI 2020, robot sebenarnya memiliki banyak sensor, akan tetapi sensor yang digunakan dalam penelitian ini hanya CMPS12.

2. Dasar Teori dan Perancangan

2.1. Tinjauan Pustaka

Telah dilakukan beberapa penelitian sebelumnya yang serupa dengan dengan penelitian ini yaitu penelitian yang dilakukan oleh tim riset gabungan *Dynamical System and Control* Universitas Ghent dan Universitas Antwerp di Belgia (2017) yaitu melakukan bangun rancang sistem Body Levelling pada robot Hexapod dengan konsep sensor fusion akselerometer dan giroskop. [2] Penelitian selanjutnya adalah berjudul *Terrain-dependant Control of Hexapod Vision* yang dilakukan oleh tim riset dari beberapa negara yaitu dari Australia, Jerman, dan Swiss (2016). Pada penelitian ini digunakan kamera untuk mencitrakan medan tak beraturan yang akan dilewati. Proses pencitraan ini menggunakan metode Digital Elevation Model untuk merepresentasikan medan tak rata. Selanjutnya adalah penelitian tugas akhir dari mahasiswa Universitas Linköping Swedia yang berjudul *Konstruktion Av En Autonom Sexbent Reparationsrobot* (2016) [6]. Robot yang dibuat oleh para mahasiswa ini bernama Spider Pig. Robot Spider Pig ini memiliki misi untuk melewati medan berupa terowongan yang mengharuskan melewati terowongan seperti. Setelah melewati terowongan robot melewati panggung. Penelitian ini belum dilakukan pengujian apakah algoritmanya berhasil saat melalui permukaan tangga.

Terdapat beberapa dasar teori yang diperlukan dalam penelitian ini. Invers Kinematik merupakan proses matematika untuk menentukan nilai posisi joint pada robot yang berfungsi sebagai manipulasi posisi *end of effector* robot dalam melakukan perpindahan posisi dengan mengubah sudut joint robot hanya dengan posisi yang diinginkan [7] [8] Pada hasil penurunan Invers Kinematik menghasilkan persamaan yang mengubah nilai koordinat kartesius *end-of-effector* x, y, z menjadi

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ yang merepresentasikan sudut yang membentuk masing-masing *joint* robot tersebut. Dari persamaan berikut dapat dituliskan sebagai:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{x}{y} \right] \dots \dots \dots (1)$$

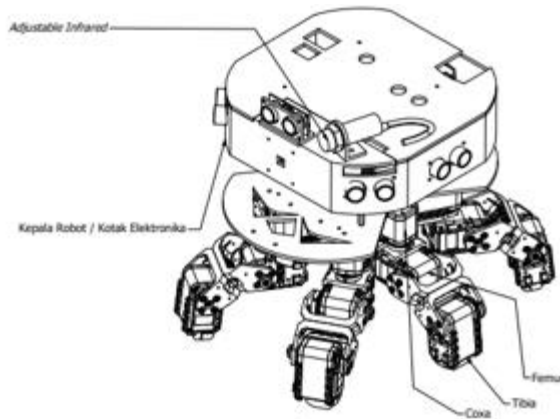
$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{z(l_2 \cos \theta_3 + l_1) - \sqrt{x^2 + y^2}(l_2 \cos \theta_3)}{(\sqrt{x^2 + y^2})(l_2 \cos \theta_3 + l_1) + z l_2 \cos \theta_3} \right] \dots \dots \dots (2)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[\frac{x^2 + y^2 + z^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right]$$

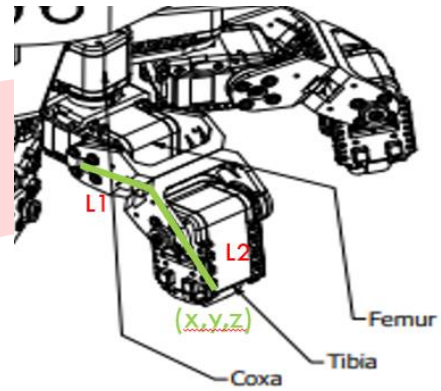
Dimana l_1 dan l_2 adalah lengan segmen kaki dari model kinematik robot yang digunakan. Nilai l_1 dan l_2 ditunjukkan masing-masing 7,5cm dan 6,2cm. [9]

2.2. Perancangan

Pada perancangan diperlukan merancang mekanik yang dapat digambarkan sebagai berikut:

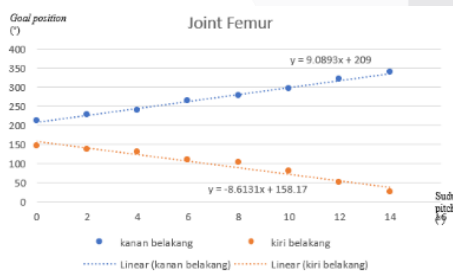


Gambar 1.a. desain mekanik robot.

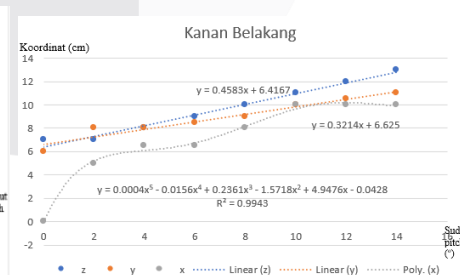


Gambar 1.b. model invers kinematik pada robot

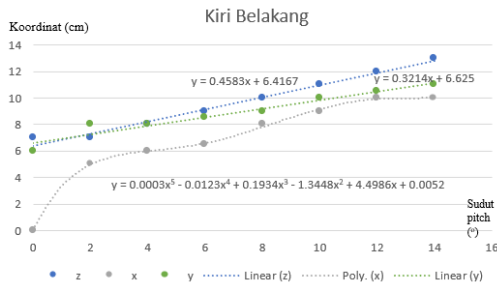
Untuk merancang kendali keseimbangan robot maka diperlukan sebuah strategi kendali keseimbangan robot. Kendali keseimbangan diperlukan membuat robot bergerak mendekati sudut *pitch* 0° dengan cara , melakukan penyesuaian joint femur, koordinat x, y, z, Mengubah nilai *offset joint femur* dan koordinat x,y,z hingga mencapai keseimbangan 0°, dan Membuat pola regresi dari masing-masing *offset joint femur* dan x,y,z.



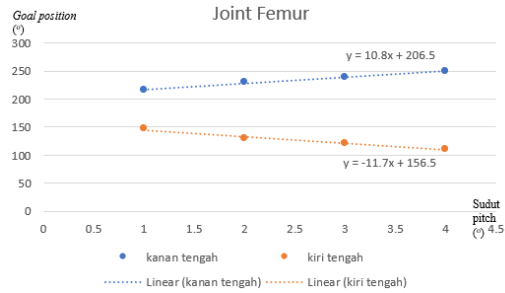
Gambar 2.a. regresi pada *joint femur*.



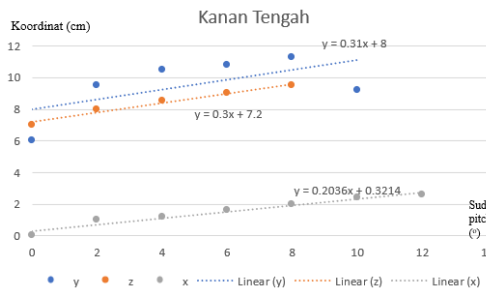
Gambar 2.b. regresi pada koordinat *end-of-effector*



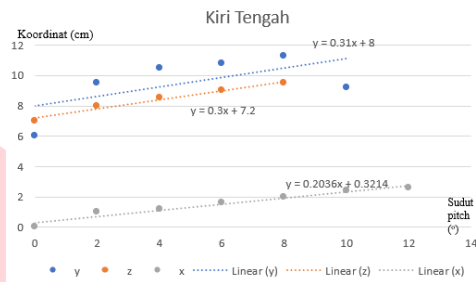
Gambar 2.c. regresi pada koordinat end-of-effector pada kiri belakang



Gambar 2.d. regresi goal position servo pada joint femur



Gambar 2.e. regresi pada koordinat end-of-effector pada kiri belakang



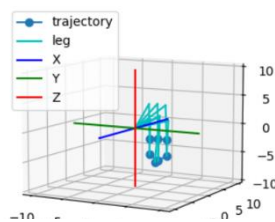
Gambar 2.f. regresi pada koordinat end-of-effector pada kiri tengah

kaki depan tidak dilakukan pengambilan data dikarenakan kaki depan berperan sebagai penyeimbang gerakan dari kaki belakang, sehingga kaki depan menggunakan nilai dengan tanda berlawanan dengan kaki belakang. Sedangkan kaki tengah berfungsi sebagai penyokong bantu gerakan kaki. Sehingga nilai PID diimplementasikan sebagai berikut:

Tabel 1 rumus regresi kaki

Rumus Regresi Kaki				
kaki	Joint femur	x	y	z
Kanan Depan	-18.607 MV Pitch	-	-0.6429 MV Pitch	-0.9167 MV Pitch
Kiri Depan	17.452 MV Pitch	-	-0.6429 MV Pitch	-0.9167 MV Pitch
Kanan Tengah	1 MV Pitch	$\frac{8}{1 + e^{-0.5 MV Pitch} - 4}$	0.59 MV Pitch	0.5 MV Pitch
Kiri Tengah	- MV Pitch	$\frac{8}{1 + e^{-0.5 MV Pitch} - 4}$	0.59 MV Pitch	0.5 MV Pitch
Kanan Belakang	18.607 MV Pitch	-	0.6429 MV Pitch	0.9167 MV Pitch
Kiri Belakang	-17.452 MV Pitch	-	0.6429 MV Pitch	0.9167 MV Pitch

Gerakan yang akan digunakan menggunakan gerakan kotak dengan trajektori seperti gambar di bawah ini



Gambar 3 bentuk Gerakan kotak pada kaki disimulasikan di matplotlib

Pola pergerakan ini dilakukan karena menyesuaikan medan tangga yang berbentuk siku-siku. Pergerakan pola kaki menggunakan pola 3-on-3 pada gerak kaki.

3. Pembahasan

3.1. Pengujian Akurasi sudut Pitch (0x04, 0x1C, 0x1D) pada Modul CMPS12

Pada sub-bab ini akan melakukan pengujian sensor CMPS12. Pengujian ini bertujuan mengetahui akurasi dari nilai pitch dan kompas dari CMPS12. Pengujian akurasi sudut pitch dilakukan dengan percobaan berubah dengan membandingkan dengan sensor inklinometer dari handphone dengan dua angka di belakang koma.

Tabel 2 performa akurasi sensor pitch

Sensor Pitch			
Pembacaan sensor	Aktual (sensor handphone)	Error (e)	Error kuadrat (e ²)
2	2.4	0.4	0.16
4	4.2	0.2	0.04
6	6.6	0.6	0.36
8	8.8	0.8	0.64
10	10.4	0.4	0.16
12	12.6	0.6	0.36
14	14.8	0.8	0.64
16	17.4	1.4	1.96
18	18.6	0.6	0.36
penjumlahan e ²			4.68
Rata-rata e ²			0.52
RMSE (Root mean square error)			0.72111

3.2. Pengujian Sistem Kendali Kestabilan Hexapod

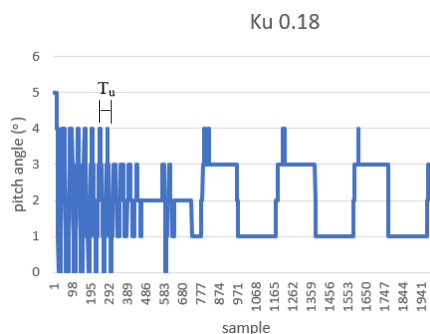
Sistem kendali ini menggunakan PID dengan metode *tunning* Zeagler-Nichols metode II. Proses pencarian osilasi menggunakan rumus berikut

Tabel 3 rumus Zeagler-Nichols

Tipe Kontrol	K _p	K _i	K _d
P	0,5K _u	-	-
PI	0,45K _u	0,54K _u / T _u	-
PD	0,8K _u	-	0,1K _u T _u
Classic PID	0,6K _u	1,2K _u / T _u	0,075K _u T _u
Passen Integral Rule	0,7K _u	1,75K _u / T _u	0,105K _u T _u
Some Overshoot	0,33K _u	0,66K _u / T _u	0,11K _u T _u
No Overshoot	0,20K _u	0,4K _u / T _u	0,066K _u T _u

Percobaan *tunning* PID ZN, mendapatkan osilasi nilai *pitch* pada robot *hexapod* dengan mencari osilasi pada nilai *pitch*. Hasil *tunning* K_u = 0,18, t_s (*Time Sample*) = 0,002138s, dan T_u = (sampel puncak kedua – sampel puncak pertama) * t_s = (286-244)*0,002138s = 0,089792s.

Hasil Perhitungan rumus *tunning* ZN sebagai berikut

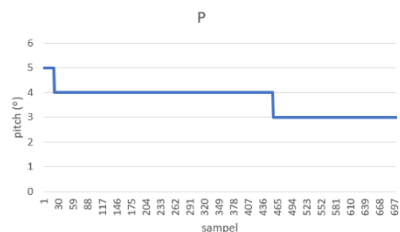


Gambar 4 *tunning* PID yang mendapatkan osilasi dengan K_u 0,18

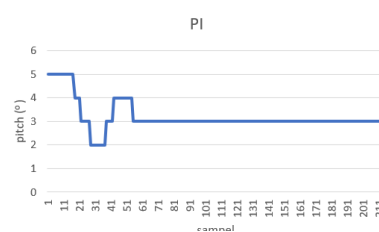
Tabel 4 Hasil Perhitungan rumus tuning ZN

Ku 0.18	Kp	Ki	Kd
P	0.09	-	-
PI	0.081	1.082504	-
PD	0.144	-	0.004849
PID	0.108	2.405566	0.001212

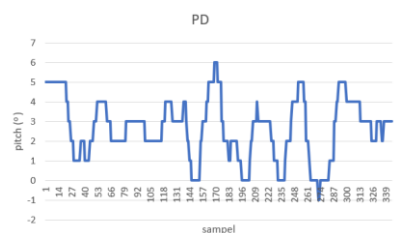
Pengujian PID ini dilakukan dengan memasukkan nilai PID satu persatu dengan melihat respon dari gerakan robot tersebut ketika diberikan PID. Pengujian ini dilakukan dengan prosedur memasukkan nilai kontrol yang akan dipakai, memberikan step respon kemiringan sebesar sebesar 5°, menunggu hingga mendapatkan nilai *steady-state*, mencatat nilai yang didapatkan, mengulangi lagi percobaan dengan jenis kontrol yang berbeda.



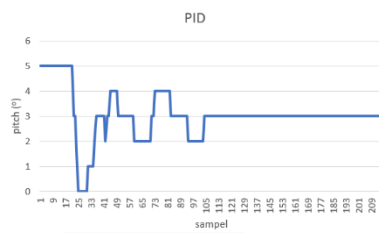
Gambar 5.a. grafik kontrol P



Gambar 5.b. grafik kontrol P



Gambar 5.c. grafik kontrol PD



Gambar 5.c. grafik kontrol PID

Tabel 5 perbandingan hasil kontrol tuning Zeagler-Nichols

Kriteria	P-Controller	PI-Controller	PD-Controller	PID-Controller
Rise Time T_r (s)	0,989894	0,025656	-	-0,1164
Damping ratio ζ	58408	0,215453	-	-0,12800
Settling Time $T_{s2\%}$	0,97706	0,11759	-	0,226628
Percent Overshoot %OS (%)	0	66,66	-	150
Steady-state error e_{ss} (°)	3	3	-	3
Keterangan <i>damping</i>	<i>overdamped</i>	<i>underdamped</i>	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>

Dari hasil pengujian di atas kontrol P memiliki keadaan overdamped sehingga tidak cocok untuk diterapkan pada sistem karena respon robot sangat lambat. Sedangkan kontrol PI memiliki *damping ratio*, *time settling*, *percent overshoot* yang paling kecil ada berada sistem kontrol PI. Kontrol PD mustahil digunakan untuk proses menaiki tangga dikarenakan robot mendapatkan respon yang tidak stabil. Yang terakhir, kontrol PID memiliki *time settling* yang lebih lama dari pada kontrol PI serta memiliki overshoot yang sangat besar sehingga performa kontrol PID lebih buruk dari pada kontrol PI. Sehingga kesimpulannya sistem kontrol PI yang akan digunakan untuk proses berjalan. *Steady-state error* yang didapatkan adalah sebanyak 3°. Hal ini dikarenakan *tuning* nilai K_i yang belum sesuai untuk mengurangi nilai *steady-state error* pada robot.

3.3. Pengujian proses melewati tangga

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui performa robot Hexapod dalam melewati tangga melakukan percobaan berulang sebanyak lima kali dengan memperhitungkan lama waktu melewati tangga dan pergeseran arah robot dengan membandingkannya antara menggunakan kontrol dan tidak menggunakan kontrol. Kecepatan robot menggunakan kecepatan sudut pertambahan sebesar 20° pada pengaturan *gait pattern*-nya. Pengujian ini dilakukan lima kali jalan saat melewati tangga. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga kriteria. Pertama, lama waktu melintasi tangga, kedua selisih kompas saat sebelum dan sesudah melintasi tangga, dan ketiga nilai puncak eror *pitch* saat melintasi tangga.

Dari pengujian ini dapat dirangkumkan sebagai berikut:

Tabel 6 Hasil pengujian lima kali percobaan

Kriteria	Keadaan	Percobaan ke-					Rata- rata
		1	2	3	4	5	
Waktu melintasi tangga (detik)	Menggunakan kontrol	96.74	53.41	111.07	98.87	99.81	91.98
	Tidak menggunakan kontrol	95.55	110.60	100.97	113.62	122.3	108.61
Selisih nilai kompas sebelum dan sesudah melewati tangga (derajat)	Menggunakan kontrol	37.3	12.1	65	50.7	14.4	35.9
	Tidak menggunakan kontrol	50.8	28.8	38	17.5	13.4	29.7
Nilai puncak eror <i>pitch</i> saat melintasi tangga (derajat)	Menggunakan kontrol	7	8	11	6	7	7.8
	Tidak menggunakan kontrol	14	11	12	11	10	11.6

Pengujian lama proses melewati tangga menunjukkan bahwa perbandingan saat menggunakan kontrol dan tidak menggunakan kontrol menunjukkan bahwa waktu saat melewati tangga lebih cepat menggunakan kontrol daripada tidak menggunakan kontrol yaitu sebesar lama rata-rata melewati tangga sebesar 91,8 detik dengan mengefisiensikan waktu sebesar 15,3%. Dari hasil data ini menunjukkan bahwa kestabilan robot memiliki peran penting dalam kecepatan robot dalam melintasi tangga.

Nilai selisih kompas pada sebelum dan sesudah melewati tangga menunjukkan bahwa pembelokan robot saat melewati tangga lebih menyimpang saat diberikan kontrol. Hal ini, dikarenakan pergerakan proses kestabilan robot mengakibatkan adanya gesekan dari masing-masing kaki dan pergeseran gerakan yang tidak sesuai *trajectory*-nya yang mengakibatkan mengubah arah robot dan tidak bergerak lurus melewati tangga.

Pada nilai puncak nilai *pitch* yang didapat saat menaiki tangga (tidak termasuk nilai tertinggi dari masing-masing perbandingan) menunjukkan perbedaan yang signifikan. Perbedaan ini menunjukan terdapat proses keseimbangan saat berjalan dengan nilai kemiringan pada robot berhasil disetimbangkan. Pada perbandingan nilai puncak *pitch* rata-rata menunjukkan adanya pengurangan derajat kemiringan sebesar $3,8^\circ$ atau sebesar 32,75%.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, diperoleh kesimpulan bahwa yang pertama PID dilakukan dengan metode tuning Zeagler-Nichols yang mendapatkan hasil percobaan pengujian sistem kontrol P, PI, PD, PID saat diimplementasikan ke sistem, menghasilkan kesimpulan bahwa sistem yang cocok dengan sistem kesetimbangan robot adalah sistem PI dengan time settling 0,11759 dan overshoot sebesar 66,7%. Akan tetapi, pada semua sistem yang diimplementasikan memiliki steady-state error sebesar 3° dikarenakan perancangan gerakan kestabilan robot tiap kaki yang kurang baik saat diimplementasikan oleh PID. Yang kedua, implementasi kendali kestabilan saat berjalan, perbandingan saat robot diberikan kontrol dan robot tidak diberikan kontrol menghasilkan kesimpulan bahwa pengendalian inklinasi robot dapat terjadi dengan baik dengan mengurangi derajat kemiringan yang terjadi pada robot. Pengurangan derajat kemiringan ini sebesar 8° atau sebesar 32,75%. Sedangkan waktu melintasi tangga sedangkan waktu melintasi tangga memiliki perbedaan yang sangat signifikan yaitu selisih 16,63 detik dengan mengefisienkan waktu sebesar 15,3%. Sedangkan kemiringan jalan kompas lebih miring saat berjalan menggunakan kontrol. Hal ini, dikarenakan pergerakan proses kestabilan robot mengakibatkan adanya gesekan dari masing-masing kaki dan pergeseran gerakan yang tidak sesuai trajektorinya yang mengakibatkan mengubah arah robot dan tidak bergerak lurus melewati tangga.

REFERENSI

- [1] Y. Yang, L. Ding dan A. Rovetta, "Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot," *Robotica*, vol. 28, no. 6, p. 1, 2010.
- [2] Cosmin Copot, Clara M Ionescu, Robin De Keyser, "Body Leveling of Hexapod Robot using the Concept of Sensor Fusion," dalam *21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Belgium, 2017.
- [3] Timon Homberger, Marko Bjelonic, Navinda Kottege, Paulo V. K. Borges, "Springer Proceedings in Advanced Robotics," *Terrain-Dependant Control of Hexapod Robots Using Vision*, vol. 1, pp. 92-102, 2016.
- [4] J. B. J. E. K. K. E. L. C. M. a. J. M. Fredrik K. Gustafsson, "Youtube," Linköping University, Juni 2016. [Online]. Available: <http://www.fregu856.com/project/spiderpig/>. [Diakses 21 November 2020].
- [5] Rudy dan Lukas, "Pergerakan Jalan Stabil Robot Hexapod di Atas Medan yang Tidak Rata," *TESLA*, vol. 19, no. 2, pp. 214 - 223, 2017.
- [6] J. Bertils, J. Ehn, F. Gustafsson, K. Kjellén, E. Ljungzell, C. Malmgren dan J. Månsson, "Konstruktion Av En Autonom Sexbent Reparationsrobot," Fredrik K. Gustafsson, Linköping, 2016.
- [7] D. L. Pieper, "The kinematics of manipulators under computer control," Clearinghouse, Stanford, 1968.
- [8] B. Siciliano and O. Khatib, "Inverse Kinematics," in *Springer Handbook of Robotics 2nd Edition*, Berlin, Springer-Verlag, 2016, p. 29.
- [9] "A Geometric Approach to Inverse Kinematics of a 3-DOF Robotic Arm," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 6, no. I, p. 352, 2018.