

Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 15 NOMOR 3

Desember 2019

Evaluasi Inverse Kinematics untuk Robot Quadrupe Menggunakan Sensor Accelerometer 186-194

Ahmad Iqbal Nasrudin, Khairul Anam, dan M. Agung Prawira N

JRE	Vol. 15	No. 3	Hal 157–202	Banda Aceh, Desember 2019	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	-------------	------------------------------	--------------------------------------

Evaluasi Inverse Kinematics untuk Robot Quadruped Menggunakan Sensor Accelerometer

Ahmad Iqbal Nasrudin¹, Khairul Anam², dan M. Agung Prawira N²

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

²Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Jl. Kalimantan 37, Jember 68121

e-mail: khairul@unej.ac.id

Abstrak—Robot *Quadruped* merupakan salah satu jenis robot yang bergerak dengan menggunakan empat kaki yang disusun oleh beberapa motor servo sebagai penggerakannya di masing-masing kaki tergantung DOF yang digunakan. Namun permasalahan muncul ketika robot ini dihadapkan pada bidang miring, dikarenakan beban yang dipikul setiap motor servo pada kaki berbeda, sehingga dapat membuat motor servo cepat mengalami kerusakan. Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem robot *quadruped* untuk kestabilan pada bidang miring menggunakan sensor accelerometer dan penerapan metode *inverse kinematics* dengan kontrol PID Ziegler-Nichols. Dari hasil pengujian robot pada bidang miring dengan berbagai macam sudut kemiringan *pitch* dan *roll* didapatkan respon dalam menyeimbangkan *body* robot. Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian robot *quadruped*, yaitu pengujian statis dan pengujian dinamis. Pengujian pertama, yaitu pengujian statis robot terhadap sudut *pitch* dan *roll* dalam keadaan *standby* hasilnya diperoleh respon rata-rata dalam menyeimbangkan *body* robot masing-masing sebesar 245 ms dan 280 ms, sedangkan pengujian statis robot terhadap sudut *roll* dalam keadaan berjalan diperoleh osilasi terbesar yaitu 10°. Pengujian kedua yaitu pengujian dinamis robot terhadap *roll* dan *pitch* dalam keadaan *standby* diperoleh respon rata-rata dalam menyeimbangkan *body* sebesar 8 s, sedangkan pengujian dinamis dalam keadaan berjalan terhadap sudut *roll* diperoleh respon rata-rata dalam menyeimbangkan *body* robot sebesar 490 ms.

Kata kunci: *inverse kinematics, PID ziegler-nichols, robot quadruped*

Abstract—Quadruped robot is one of the types of robots that move using legs 4 compiled by some of the servo motor as a driving force on each foot fit the DOF is used. However, problems arise when this robot is confronted on the inclined plane, because the burden is borne out every servo motor on the feet will be different, so can make a fast servo motor damaged. This research was conducted on the design of the quadruped robot system for stability on the inclined plane using the accelerometer sensor and the application of inverse kinematics method with PID control of Ziegler-Nichols. The results of tests obtained response robot in stabilizing the body when faced with the inclined plane with some degree of slope of the pitch and roll. In this research was conducted some test for quadruped robot: static Testing robot against the angel of the pitch in the standby retrieved response average robot in stabilizing the body is 245 ms, static Testing robot against the angle of roll in standby retrieved response average robot in stabilizing the body is 280 ms, dynamic Testing robot against the roll and pitch in standby retrieved response average robot in stabilizing the body is 8 seconds, Static Testing robot to stabilizing the body against the angel of roll in running the largest robot oscillations obtained 10 degrees, dynamic Testing robot to stabilizing the body against the angle of roll in run retrieved response average robot in stabilizing the body is 490 ms.

Keywords: *inverse kinematics, PID control of ziegler-nichols, quadruped robot*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Revolusi industri telah memasuki era 4.0 yang ditandai dengan adanya beberapa lembaga penelitian yang melakukan pengembangan di bidang robotika, salah satunya adalah pengembangan robot berkaki. Pengembangan robot berkaki biasanya digunakan untuk misi pencarian dan penyelamatan [1] pada wilayah yang tidak terjangkau atau berbahaya bagi manusia [2]. Menggunakan robot beroda sangat efisien, namun hanya terbatas pada medan yang halus, sementara itu lingkungan

sekitar kita tidak cocok untuk robot beroda [3]–[5]. Mobilitas dan kemampuan yang dimiliki robot berkaki untuk berjalan di medan yang kasar dan tidak terstruktur lebih baik dibandingkan dengan robot beroda [6], [7].

Robot berkaki yang sering digunakan adalah *biped* (2 kaki), *quadruped* (4 kaki), dan *hexapod* (6 kaki) [8]. Robot *Quadruped* merupakan salah satu jenis robot berkaki yang memiliki empat kaki untuk menyeimbangkan diri saat bergerak [6]. Robot *quadruped* memiliki beberapa keuntungan, yaitu konsumsi energi yang lebih sedikit, stabilitas yang baik, dan dapat bergerak di medan yang

tidak terstruktur dan kasar [9].

Secara umum robot berkaki *humanoid* memiliki tiga sendi tanpa mempertimbangkan struktur kaki yang digunakan untuk berjalan. Kaki robot menggunakan 3 DoF (memiliki *Degree of Freedom*) karena memiliki pergerakan yang lebih kompleks dibandingkan 2 DoF, yaitu dapat bergerak maju-mundur, kiri-kanan, dan naik-turun. Struktur kaki robot *quadruped* memiliki DoF mencapai 12 menyerupai struktur kaki mamalia [10]. Semakin banyak aktuator yang digunakan maka semakin banyak *Degree of Freedom* (DoF), sehingga robot berkaki lebih mudah beradaptasi dengan lingkungan [5]. Motor servo sering digunakan sebagai aktuator karena memiliki kelebihan, yaitu memiliki kekuatan yang tinggi, inersia rendah dan kecepatan yang tinggi [11].

Kinematika merupakan cara untuk menggerakkan tiap-tiap servo pada kaki robot. Kinematika pada robot *quadruped* membutuhkan analisa stabilitas dan sistem perencanaan medan atau lintasan dengan menggunakan metode *forward kinematics* dan *inverse kinematics* [9]. Untuk mengetahui posisi atau keadaan robot *quadruped* dapat menggunakan *accelerometer* pada sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) dengan mengambil data *roll* dan *pitch* dari *body* robot terhadap medan yang dilalui [12]. Sistem kendali keseimbangan robot berkaki pada berbagai kondisi medan adalah bidang riset yang masih menantang. Oleh karena itu, artikel ini membahas tentang bagaimana implementasi metode *inverse kinematics* terhadap robot *quadruped* menggunakan *accelerometer* dalam kondisi statis dan dinamik terhadap *roll* dan *pitch* yang diberikan terhadap bidang horizontal dengan sudut kemiringan tertentu.

II. STUDI PUSTAKA DAN METODE

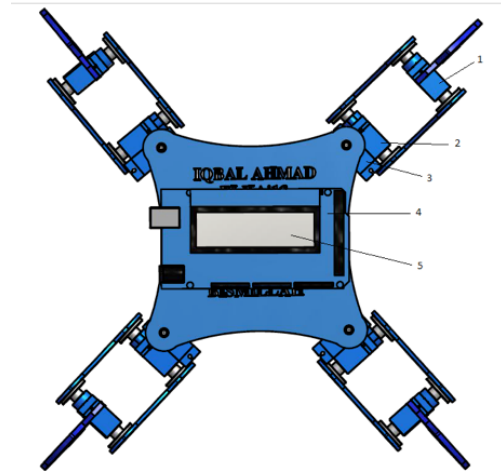
A. Sensor Accelerometer

Penelitian ini menggunakan sensor IMU MPU-6050 yang berisikan sebuah sensor accelerometer dan sebuah sensor Gyroscope yang masing-masing adalah 3 axis dan saling terintegrasi. Dengan fasilitas hardware internal 16 bit ADC untuk setiap kanalnya membuat sensor ini sangat akurat dalam pembacaannya. Sensor menangkap nilai kanal axis X, Y, dan Z secara bersamaan dalam satu waktu.

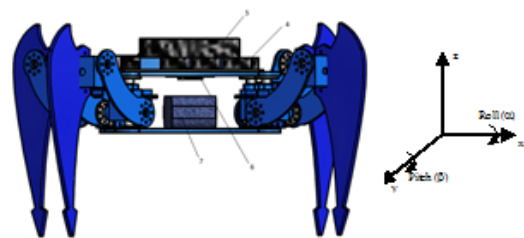
Sensor accelerometer berfungsi sebagai pendeteksi kemiringan dari robot dari arah *roll* (terhadap sumbu x) dan *pitch* (terhadap sumbu y). Data pembacaannya dibandingkan dengan nilai referensi kemiringan yang kemudian nilai selisihnya digunakan sebagai input dari sistem kontrol PID. Penjelasan lebih lanjut terkait peran penting dari *accelerometer* akan dijelaskan pada sub bagian sistem kontrol.

B. Desain Mekanik Robot

Penelitian ini merupakan implementasi *inverse kinematics* robot *quadruped* dengan menggunakan *accelerometer* yang dilakukan di Laboratorium Sistem



Gambar 1. Desain robot quadruped tampak atas



Gambar 2. Desain robot quadruped tampak depan

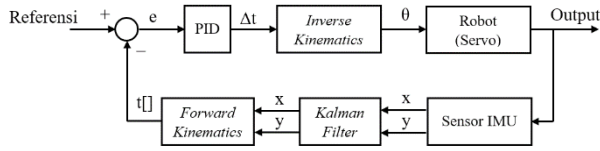
Kendali Universitas Jember. Gambar 2, merupakan desain robot *quadruped* yang memiliki spesifikasi ukuran *body* = 20 cm (*l*) x 20 cm (*w*) x 15,5 cm (*h*), lengan *coxa* (l_c) = 2 cm, lengan *femur* (l_f) = 8 cm, dan lengan *tibia* (l_t) = 10,2 cm.

Adapun keterangan dari Gambar 1 dan Gambar 2 sesuai dengan nomor-nomor yang ada adalah sebagai berikut:

1. Servo 1, Aktuator yang fungsinya adalah untuk menggerakkan kaki robot quadruped bagian Tibia.
2. Servo 2, Aktuator yang fungsinya adalah untuk menggerakkan kaki robot quadruped bagian Femur.
3. Servo 3, Aktuator yang fungsinya adalah untuk menggerakkan kaki robot quadruped bagian Coxa.
4. Arduino Mega 2560, Mikrokontroler yang digunakan robot quadruped sebagai kontrolernya.
5. LCD, fitur robot quadruped untuk menampilkan data sensor juga hasil sudut-sudut yang diperoleh dari proses inverse kinematics.
6. Sensor MPU-6050, sensor accelerometer yang digunakan untuk setpoint robot quadruped untuk memperoleh keseimbangan.
7. Battery LiPo 12V, sebagai catu daya robot quadruped.

C. Sistem Kontrol Robot

Pada Gambar 3 dan Gambar 4, diperlihatkan bahwa *input* dari kontrol robot *quadruped* berupa *roll* dan *pitch* pada kemiringan bidang horizontal. Nilai *roll* (α) dan *pitch* (β) diukur dengan menggunakan *accelerometer* dalam sensor IMU untuk menunjukkan posisi robot (α_r , β_r) terhadap bidang horizontal. *Kalman filter* digunakan



Gambar 3. Diagram blok kontroler

pada sistem dinamis, seperti pembacaan data pada sensor yang terganggu oleh *noise* [13]. Data yang didapatkan dari *accelerometer* diproses dengan menggunakan metode *kalman filter* didalam mikrokontroler untuk menghilangkan *noise* sehingga mendapatkan nilai sudut (α_2 , β_2) yang stabil. Nilai β_2 digunakan sebagai *input* pada metode *forward kinematics* untuk mengetahui tinggi ujung *body* robot atau *end effector* (h_1).

Kontrol PID *ziegler-nichols* digunakan untuk mendapatkan gerakan yang halus pada aktuator kaki robot. Nilai *error* (e) digunakan sebagai *input* dengan nilai referensi (ref_n) sebesar 0° , lihat persamaan 3. *Output* dari PID adalah perubahan tinggi ujung *body* robot (Δh) terhadap bidang horizontal. Nilai Δh digunakan sebagai *input* metode *inverse kinematics* merupakan konversi Δh menjadi besaran sudut (θ_n) untuk mengatur sistem penggerak aktuator di setiap sendi secara otomatis dan keseimbangan robot terhadap medan yang dilalui.

D. Kalman Filter

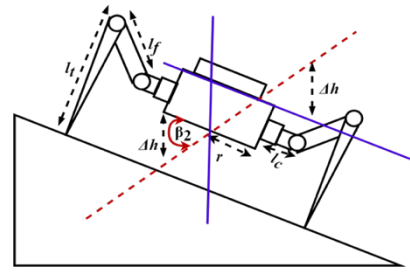
Accelerometer digunakan untuk mendeteksi kemiringan suatu bidang. Secara umum, sinyal *output accelerometer* terdapat *noise* [14]. Maka, diperlukan metode *kalman filter* untuk mendapatkan posisi sudut robot (α_2 , β_2) yang presisi, menggunakan persamaan (1).

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k - b.dt + u_{\alpha k}.dt \quad (1)$$

$$\beta_{k+1} = \beta_k - b.dt + u_{\beta k}.dt \quad (2)$$

$$b_{k+1} = b_k \quad (3)$$

dimana ($u_{\alpha}u_{\beta}$)=(α_1,β_1), merupakan hasil pembacaan sensor *accelerometer* yang dipilih secara acak. Parameter α_k dan β_k merupakan estimasi sudut, b merupakan *gyro rate* pada



Gambar 5. Representasi posisi tubuh robot pada bidang miring

sensor IMU, dan dt merupakan estimasi waktu.

E. Forward Kinematics

Inverse Kinematics merupakan kebalikan dari *Forward Kinematics*. *Forward Kinematics* adalah metode untuk menentukan orientasi dan posisi *end-effector* dari besarnya sudut sendi dan panjang *link* lengan yang diberikan. Sebaliknya, *invers kinematik* adalah metode untuk menentukan sudut-sudut sendi dari orientasi dan posisi *end-effector* yang diinginkan. Persamaan *forward kinematics* didapatkan berdasarkan jumlah DOF dan jenis *kinematics chain* dari kaki-kaki robot berkaki.

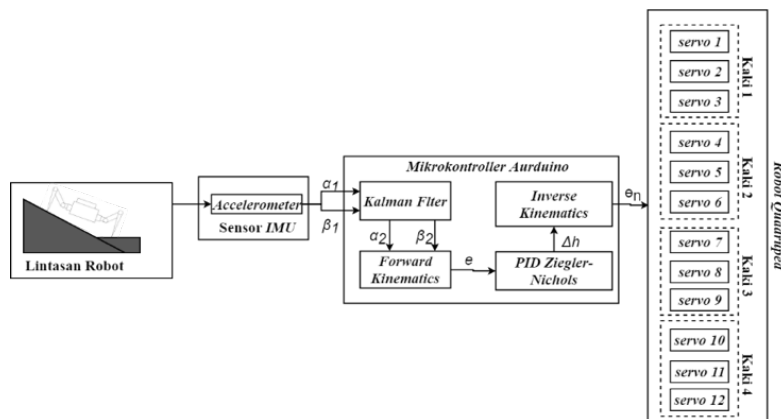
Metode *forward kinematics* merupakan metode perhitungan posisi (x,y,z) *end effector* robot dari sudut sendi robot (α,β,γ) [15], [16]. Sebagaimana tampak pada Gambar 5, metode *forward kinematics* digunakan untuk mengetahui ketinggian robot (Δh) terhadap bidang horizontal, menggunakan persamaan (4).

$$\Delta h = r \times \sin \beta_2 \quad (4)$$

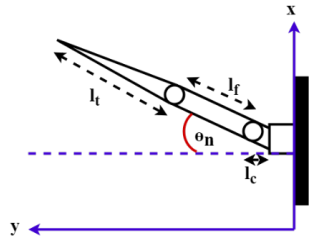
dimana r adalah setengah dari panjang *body* robot ($\frac{1}{2} l$).

F. PID Ziegler-Nichols

PID (*Propotional, Integral, Derivative*) merupakan salah satu kontroler yang sering digunakan untuk sistem kontrol industri [17]. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan menggunakan proses *tunning* [11]. *Tunning* PID digunakan untuk memperoleh konstanta *propotional* (K_p), *integral* (K_i), dan *derivative* (K_d), salah satunya dengan menggunakan metode *ziegler-nichols*.



Gambar 4. Diagram blok sistem elektronik implementasi inverse kinematics pada robot quadruped menggunakan accelerometer



Gambar 6. Grafik representasi sudut

$$K_p = 0.6 \times K_c \quad (5)$$

$$K_i = 2 \times (K_p / P_c) \quad (6)$$

$$K_c = (K_p \times P_c) / 8 \quad (7)$$

$$PID = K_p + K_i + K_c \quad (8)$$

Persamaan 8, merupakan persamaan PID *ziegle-nichols* dimana K_c merupakan *gain* untuk *propotional control*, P_c merupakan periodik atau waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik kritis.

G. Inverse Kinematics

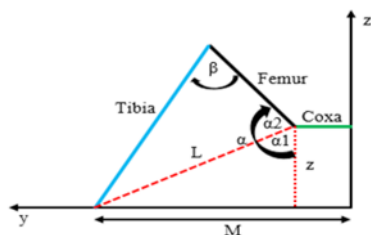
Inverse kinematics pada robot berkaki adalah sebagai sistem penggerak motor servo di tiap-tiap sendi secara otomatis sehingga tidak perlu mengatur secara manual. Pada artikel ini, robot didesain menggunakan 2 *inverse kinematics* yaitu *inverse kinematics* untuk robot berjalan dan *inverse kinematics* untuk keseimbangan robot. Untuk keperluan keseimbangan, ada penambahan sensor IMU sebagai umpan baliknya. Keseimbangan robot sangat diperlukan untuk mempertahankan posisinya terhadap bidang yang dilaluinya.

1. Inverse kinematics untuk jalan

Metode *inverse kinematics* merupakan salah satu cara untuk tetap stabil dengan berorientasi pada gerakan kinematika robot berdasarkan posisi robot (x, y, z) dalam sudut ($\theta_n = [\alpha, \beta, \gamma]$) [18], [16]. Sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 5, untuk keperluan jalan, semua lengan robot diasumsikan lurus sehingga hanya membentuk satu sudut saja yaitu θ_n . Dengan demikian persamaan sudutnya adalah:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (9)$$

Gambar 6 merupakan representasi metode *inverse*



Gambar 7. Grafik representasi sudut keseimbangan robot

kinematics yang digunakan untuk mengontrol jalan robot menggunakan persamaan 9 dimana θ adalah sudut *joint* robot, x dan y adalah posisi robot dalam *cartesian*.

2. Inverse kinematics untuk keseimbangan

Berbeda dengan invers kinematik untuk jalan, invers kinematik untuk keseimbangan melibatkan persamaan yang lebih detail dan lengkap, sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 7.

Tujuan dari inverse kinematik adalah mencari sudut-sudut α dan β . Untuk memudahkan, sudut α dibagi menjadi dua yaitu sudut α_1 dan α_2 . Sudut dapat diperoleh dengan persamaan berikut ini.

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{z}{L} \quad (10)$$

Dengan z adalah tinggi dari robot. Pada persamaan (10), nilai L dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$L = \sqrt{z^2 + (M - coxa)^2} \quad (11)$$

Dengan mendapatkan L , nilai α_2 juga dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)} \quad (12)$$

Dengan menjumlahkan persamaan 10 dan 12, maka didapatkan persamaan 13 berikut ini:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (13)$$

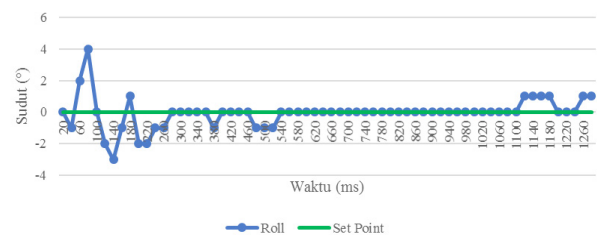
Pada akhirnya, sudut beta dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 11, persamaan untuk β juga didapatkan yaitu:

$$\beta = \cos^{-1} \frac{L^2 - tibia^2 - femur^2}{-2(tibia)(femur)} \quad (14)$$

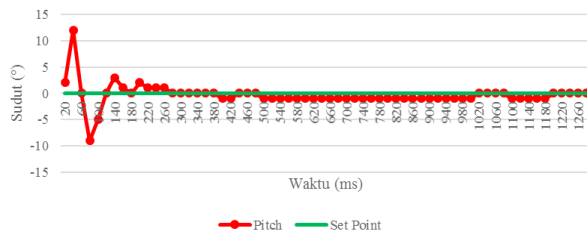
Untuk memudahkan, berikut ini keterangan untuk persamaan-persamaan:

- z = tinggi body robot
- L = Jarak titik tumpu robot terhadap lengan *coxa*
- M = Jarak titik tumpu sampai *body* robot
- Coxa* = Panjang lengan *coxa*
- Femur* = Panjang lengan *femur*
- Tibia* = Panjang lengan *tibia*
- α = Sudut total lengan *femur*
- β = Sudut lengan *tibia*

H. Tuning PID Ziegler-Nichols



Gambar 8. Grafik respon quarter-decay sudut roll



Gambar 9. Grafik respon quarter-decay sudut pitch

Pada robot *quadruped* ini digunakan kontrol PID dimana untuk memperoleh konstanta K_p , T_i , dan T_d digunakan teori *ziegler-nichols*, teori ini memiliki 2 cara untuk memperoleh konstanta yaitu yang pertama dengan menggunakan kontrol *open loop* dan yang kedua dengan menggunakan kontrol *close loop*. Pada penelitian ini digunakan kontrol *close loop* untuk memperoleh konstanta yaitu *Quarter-decay* dengan langkah awal robot diberikan nilai K_p secara bertahap sampai diperoleh grafik sehingga amplitudo pertama memiliki besar 4 kali dari amplitudo yang kedua, sebagaimana tampak pada Gambar 8 dan Gambar 9.

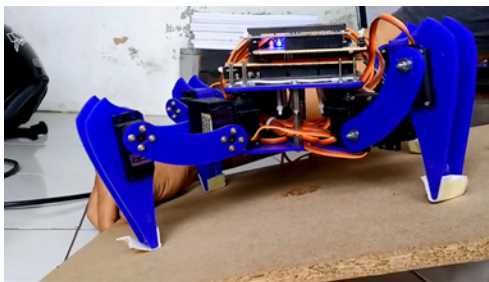
$$\begin{aligned} K_p &= 0,6 \times K_p & T_i &= 0,5 \times T_p & T_d &= 0,125 \times T_p \\ &= 0,6 \times 3 & &= 0,5 \times 0,1 & &= 0,125 \times 0,1 \\ &= 1,8 & &= 0,05 & &= 0,0125 \end{aligned}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

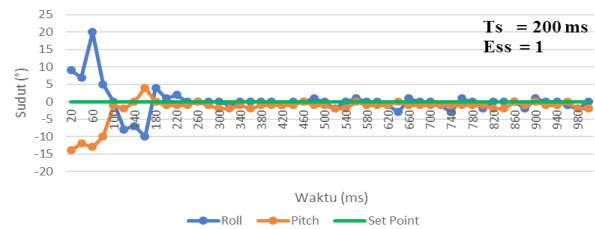
Hasil mekanik robot *quadruped* dengan menerapkan perumusan invers kinematics dengan kontrol PID *ziegler-nichols*, dapat dilihat pada Gambar 10.

Selanjutnya dilakukan pengambilan data dan analisis data sesuai dengan metode penelitian. Pengujian robot berkaki disesuaikan dengan tujuan desain pengendalian. Jika tujuannya adalah untuk keperluan navigasi, pada pengujian berfokus pada kemampuan navigasi dan manuver robot pada lingkungan uji maupun lingkungan sebenarnya. Pada artikel ini, fokus dari pengendalian robot adalah kemampuan robot dalam melakukan keseimbangan dari bidang datar dan miring pada saat diam ataupun pada saat berjalan baik pengujian statis atau dinamis. Pada beberapa sub bagian berikut, dihadirkan hasil dan analisa pengujian kestabilan robot dalam keadaan statis dan dinamis.

Pengujian dilakukan dalam keadaan yaitu keadaan *standby* berdiri dan keadaan berjalan. Pada keadaan



Gambar 10. Hasil mekanik robot quadruped



Gambar 11. Grafik respon kestabilan robot pada sudut pitch 15°

standby, dilakukan dua pengujian yaitu statis dan dinamis. Pada keadaan statis, kemiringan bidang robot tetap, sedangkan pada keadaan dinamis, sudut kemiringan bidang diubah-ubah secara *real-time*. Demikian pula pada keadaan berjalan, dilakukan dua pengujian yaitu statis dan dinamis. Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan bidang berupa papan yang kemiringannya dapat diubah-ubah secara manual. Pengujian dilakukan rata-rata selama 2,5 menit.

A. Pengujian statis terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby

Pada pengujian ini, dilakukan pengujian terhadap sudut *pitch* dari robot yaitu alas yang digunakan sebagai pijakan robot yang diberikan gangguan berupa *pitch* dengan sudut yang telah ditentukan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 11.

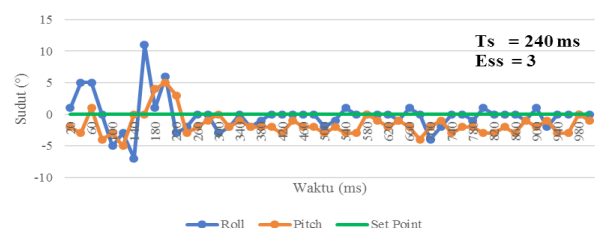
Dapat dilihat grafik pada Gambar 11 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *pitch* sebesar 15°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* (T_s) 200 ms dan *error steady state* (Ess) atau kesalahan keadaan tunak sebesar 1°.

Dapat dilihat grafik pada Gambar 12 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *pitch* sebesar 5°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* 240 ms dan Ess sebesar 3°.

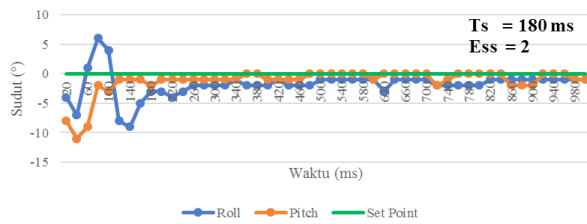
Dapat dilihat grafik pada Gambar 13 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *roll* sebesar 15°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* 180 ms dan Ess sebesar 2°.

Dapat dilihat grafik pada Gambar 14 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *roll* sebesar 5°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* 320 ms dan Ess sebesar 2°.

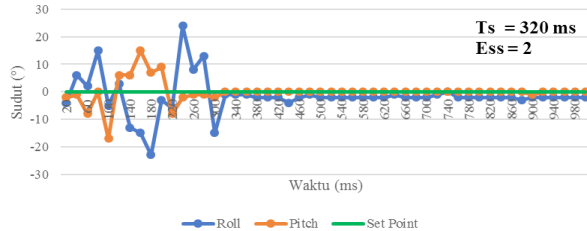
B. Pengujian dinamis terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby



Gambar 12. Grafik respon kestabilan robot pada sudut pitch 5°



Gambar 13. Grafik respon kestabilan robot pada sudut roll 15°

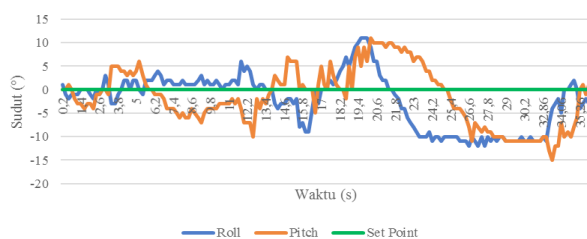


Gambar 14. Grafik respon kestabilan robot pada sudut roll 5°

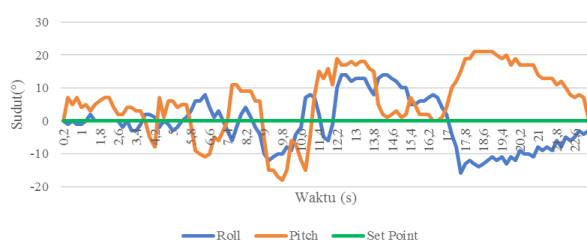
Pada pengujian ini robot *quadruped* diuji dinamis terhadap sudut *roll* dan sudut *pitch* dimana dalam keadaan *standby*, alas atau bidang pijakan robot dibuat miring beberapa kali dengan sudut tertentu.

Dapat dilihat Gambar 15 pada grafik terdapat 4 kali lonjakan data di detik ke-11 robot diberikan kemiringan *roll* 7°, di detik ke-14 robot diberikan kemiringan *pitch* -10°, di detik ke-18 robot diberikan kemiringan *pitch* 15°, dan di detik ke-26 robot diberikan kemiringan *roll* *pitch* 15°.

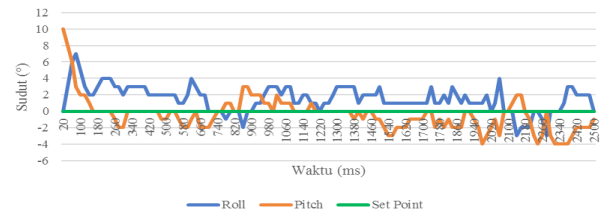
Dapat dilihat Gambar 16 pada grafik juga terdapat 4 kali lonjakan data di detik ke-7 robot diberikan kemiringan *pitch* -10°, di detik ke-9 robot diberikan kemiringan *roll* *pitch* -10°, di detik ke-11 robot diberikan kemiringan *roll* -15°, dan di detik ke-17 robot diberikan kemiringan *roll* 15°.



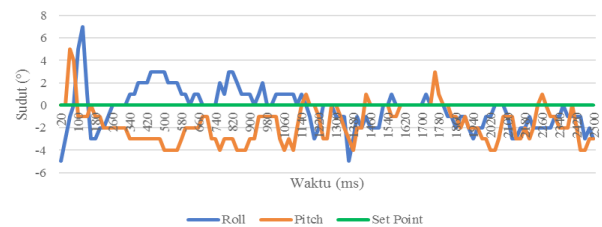
Gambar 15. Grafik pengujian dinamis 1 robot terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby



Gambar 16. Grafik pengujian dinamis 2 robot terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby



Gambar 17. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll -15°



Gambar 18. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll -7°

C. Pengujian statis robot menstabilkan body terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan berjalan

Pada pengujian ini robot *quadruped* dilakukan pengujian dimana robot dalam keadaan berjalan pada bidang miring yaitu berupa sudut *roll* dengan sudut yang telah ditentukan.

Dari Gambar 17 dapat dilihat bahwa pada pengujian statis sudut *roll* -15° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar 4°.

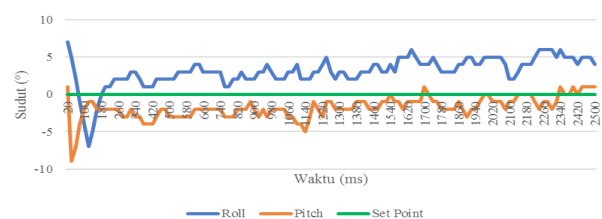
Grafik pada Gambar 18 tampak bahwa pada pengujian statis sudut *roll* -7° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar -5°.

Pada Gambar 19 dapat dilihat bahwa pada pengujian statis sudut *roll* 7° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar 6°.

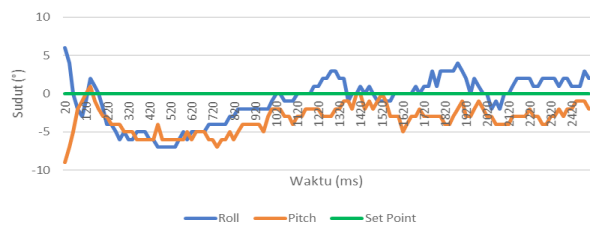
Dari grafik pada Gambar 20 dapat dilihat bahwa pada pengujian statis sudut *roll* 15° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar -6°.

D. Pengujian Dinamis Robot Menstabilkan Body terhadap Sudut Roll dan Pitch dalam Keadaan Berjalan

Pada pengujian ini robot *quadruped* diuji dinamis



Gambar 19. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll 7°



Gambar 20. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll 15°

ketika berjalan yaitu dengan gangguan sudut *roll* 7° dan sudut *roll* -7° , berjalan dalam waktu 2200 ms dengan *data sampling* 20 ms. Dapat dilihat respon robot *quadruped* dalam menjaga kestabilan *body* pada Gambar 21 dan Gambar 22.

Dari grafik pada Gambar 21 dapat dilihat respon robot *quadruped* ketika berjalan diberi gangguan *roll* sebesar 7° pada detik ke-1540 ms, dengan waktu kurang lebih 580 ms robot mampu menstabilkan *body* yaitu pada detik ke-2120 ms.

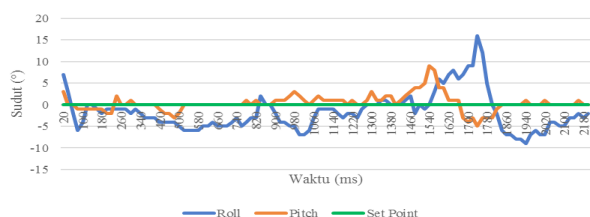
Dari grafik pada Gambar 22 dapat dilihat respon robot *quadruped* ketika berjalan diberi gangguan *roll* sebesar -7° pada detik ke-1740 ms, dengan waktu kurang lebih 400 ms robot mampu menstabilkan *body* yaitu pada detik ke-2140 ms.

E. Perbandingan Kinerja Robot Quadruped Menggunakan Kalman Filter dan Tanpa Menggunakan Kalman Filter

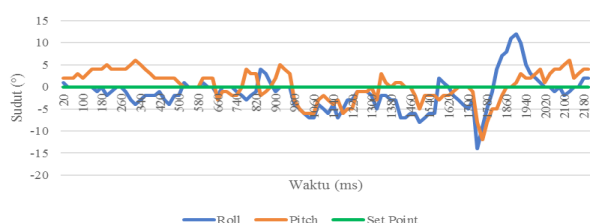
Pada pengujian ini dilakukan perbandingan kinerja robot *quadruped* yang telah menggunakan *kalman filter* dengan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter* dalam keadaan berjalan, terdapat 2 pengujian yaitu:

a. Pengujian statis

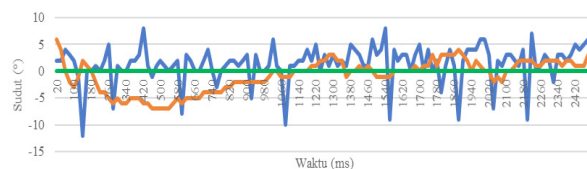
Pada pengujian ini robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dan robot *quadruped* yang



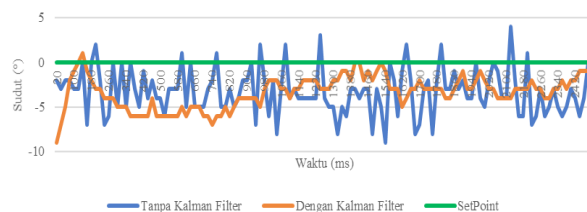
Gambar 21. Grafik kestabilan robot saat berjalan dengan gangguan sudut roll 7°



Gambar 22. Grafik kestabilan robot saat berjalan dengan gangguan sudut roll -7°



(a)



(b)

Gambar 23. Pengujian statis 15° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch

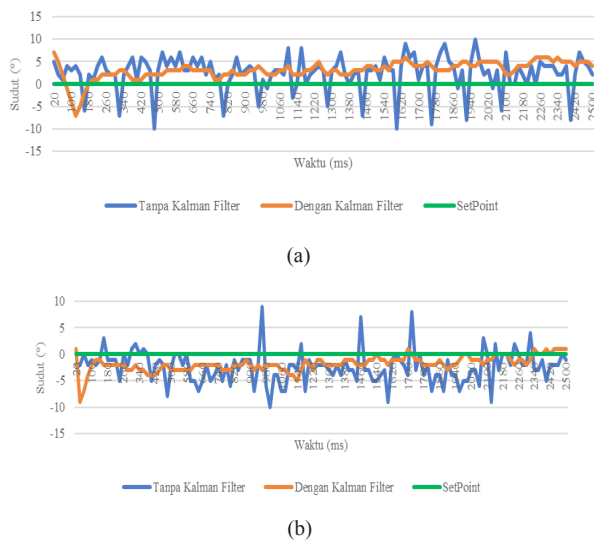
tanpa menggunakan *kalman filter* diuji dengan keadaan berjalan pada bidang yang memiliki kemiringan *roll* 15° , 7° , -7° , dan -15° . Dari pengujian ini diperoleh respon robot *quadruped* dalam mempertahankan *body* untuk tetap stabil.

Pada Gambar 23 pengujian statis 15° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut *roll* dan (b) adalah perbandingan sudut *pitch*, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga, Pada garis biru masih terdapat banyak *noise* atau osilasi yang cukup besar pada pembacaan sensor sehingga memberikan efek pergerakan goyang pada robot *quadruped* sampai -12° . Pada garis jingga grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal -7° .

Pada Gambar 24 pengujian statis 7° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut *roll* dan (b) adalah perbandingan sudut *pitch*, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga, Pada garis biru masih terdapat banyak *noise* atau osilasi yang cukup besar pada pembacaan sensor sehingga memberikan efek pergerakan goyang pada robot *quadruped* sampai -10° . Pada garis jingga grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal 6° .

b. Pengujian dinamis

Pada pengujian ini robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter* diuji dengan keadaan berjalan pada bidang



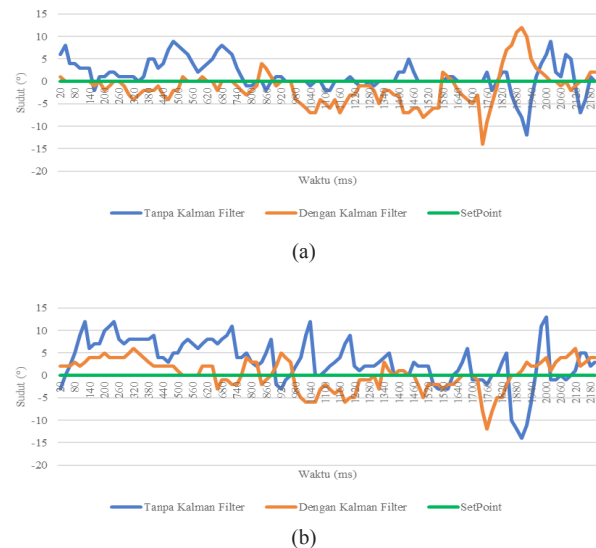
Gambar 24. Pengujian Statis 7° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch

data yang kemudian diberikan gangguan kemiringan sudut roll 7°, dan -7°. Dari pengujian ini diperoleh respon robot *quadruped* dalam mempertahankan *body* untuk tetap stabil dengan pemberian gangguan sudut roll ketika berjalan.

Pada Gambar 25 pengujian dinamis 7° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut roll dan (b) adalah perbandingan sudut pitch, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga seperti pada pengujian statis, hal ini terjadi karena pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang datar tidak terdapat *noise* yang besar, sedangkan pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang miring memiliki *noise* yang cukup besar. Pada garis biru masih terdapat sedikit *noise* pada pembacaan sensor sehingga pergerakan pada robot *quadruped* tidak terlalu goyang dengan osilasi maksimal yaitu -8°. Pada garis jingga



Gambar 25. Pengujian dinamis 7° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch



Gambar 26. Pengujian dinamis -7° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch

grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal -7°. Sehingga pada pengujian ini tidak memiliki perbedaan grafik yang signifikan antara robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dengan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter*.

Pada Gambar 26 pengujian dinamis -7° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut roll dan (b) adalah perbandingan sudut pitch, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga seperti pada pengujian statis, hal ini terjadi karena pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang datar tidak terdapat *noise* yang besar, sedangkan pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang miring memiliki *noise* yang cukup besar. Pada garis biru masih terdapat sedikit *noise* pada pembacaan sensor sehingga pergerakan pada robot *quadruped* tidak terlalu goyang dengan osilasi maksimal yaitu 12°. Pada garis jingga grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal -8°. Sehingga pada pengujian ini tidak memiliki perbedaan grafik yang signifikan antara robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dengan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter*.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan pada robot *quadruped*, kepresisian dari *design* atau ukuran robot *quadruped* sangat berpengaruh terhadap masukan pada metode *inverse kinematics*, semakin pendek desain kaki maka jarak langkah yang

dapat ditempuh juga akan semakin dekat. Pengujian respon robot dalam menstabilkan *body* terhadap sudut *roll* dan *pitch* dalam keadaan *standby* diperoleh *settling time* rata-rata yaitu 235 ms dengan Ess sebesar 2. Pada pengujian statis terhadap sudut *roll* dalam keadaan berjalan di sudut *roll* -15° terdapat osilasi terbesar yaitu 4°, di sudut *roll* -7° terdapat osilasi terbesar yaitu -5°, di sudut *roll* 7° terdapat osilasi terbesar yaitu 6°, dan di sudut 15° terdapat osilasi terbesar yaitu -6°. Pada pengujian dinamis terhadap sudut *roll* dalam keadaan berjalan diberikan gangguan sudut *roll* 7° diperoleh respon dalam menstabilkan *body* dalam waktu 580 ms dan saat diberikan gangguan sudut *roll* -7° diperoleh respon dalam menstabilkan *body* dalam waktu 400 ms.

REFERENSI

- [1] D. Belter, "Adaptive Foothold Selection for a Hexapod Robot Walking on Rough Terrain," in *7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, January 2009.
- [2] E. Burkus and P. Odry, "Autonomous Hexapod Walker Robot Szabad (ka)," *2007 5th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, vol. 5, pp. 103–106, September 2007.
- [3] C. Runbin, C. Yangzheng, L. Lin, W. Jian, and M. H. Xu, "Inverse kinematics of a new quadruped robot control method," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, pp. 46, 2013.
- [4] W. H. Chen, G. J. Ren, J. H. Wang, and D. Liu, "An adaptive locomotion controller for a hexapod robot: CPG, kinematics and force feedback," *Science China Information Sciences*, vol. 57, no. 11, pp. 1–18, 2014.
- [5] P. S. Pa and C. M. Wu, "Design of a hexapod robot with a servo control and a man-machine interface," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 3, pp. 351–358, 2012.
- [6] A. A. Bapat, "DESIGN, PROTOTYPING AND TESTING OF AN AUTONOMOUS HEXAPOD ROBOT WITH C SHAPED COMPLIANT LEGS : AbhisHex," The University Of Texas At San Antonio, 2016.
- [7] M. Bloesch *et al.*, "State Estimation for Legged Robots - Consistent Fusion of Leg Kinematics and," in *Robotics: Science and Systems VIII*, 2012.
- [8] E. Burkus and P. Odry, "Autonomous Hexapod Walker Robot Szabad (ka) Autonomous Hexapod Walker Robot," September, 2007.
- [9] M. A. Sen, V. Bakircioglu, and M. Kalyoncu, "Inverse Kinematic Analysis of a Quadruped Robot," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 6, no. 09, pp. 285–289, 2017.
- [10] S. Yeole, "Design of a Quadruped Robot and ITS Inverse Kinematics," 2017.
- [11] B. Jaganathan, R. Sharanya, S. K. Devi, and S. K. Sah, "Ziegler-Nichol's method of online tuning of PMSM for improved transient response," in *ICPCES 2010 - International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, 2010, pp. 1–5.
- [12] N. Rotella, M. Bloesch, L. Righetti, and S. Schaal, "State estimation for a humanoid robot," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 952–958.
- [13] S. Praesomboon, S. Athaphaisal, S. Yimman, R. Boontawan, and K. Dejhan, "Sensorless speed control of DC servo motor using Kalman filter," *ICICS 2009 - Conference Proceedings of the 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, 2009.
- [14] H. Ferdinando, H. Khoswanto, and U. K. Petra, "Embedded Kalman Filter For Inertial Measurement Unit (IMU) on the Atmega8535," *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, pp. 1–5, 2012.
- [15] A. Dasari and N. . Reddy, "Forward and Inverse Kinematics of a Robotic Frog," *2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI)*, 2012.
- [16] H. F. Abdulsada, "Proposed Algorithm to Solve Inverse Kinematics Problem of the Robot," *European Journal of Scientific Research*, vol. 149, no. July, pp. 376–384, 2018.
- [17] P. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID Controller using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor," *British Journal of Dermatology*, vol. 106, no. 4, pp. 455–460, 2012.
- [18] R. C. Prayogo, A. Triwiyanto, and Sumardi, "Quadruped Robot with Stabilization Algorithm on Uneven Floor using 6 DOF IMU based Inverse Kinematic," *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, pp. 39–44, 2018.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

