

Penerapan Algoritma *Wall Following* Pada Robot *Quadruped* di Lintasan Tidak Rata Berbasis Arduino Nano dan STM32F4 *Discovery*

Firman Maulana Arif

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
email : firman.19004@mhs.unesa.ac.id

Muhammad Syariffuddin Zuhrie, Miftahur Rohman, Lusiarakhmawati

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
email : zuhrie@unesa.ac.id, miftahurrohman@unesa.ac.id, lusiarakhmawati@unesa.ac.id

Abstrak

Robot *quadruped* merupakan robot berkaki empat, robot ini menggunakan dua jenis mikrokontroler yaitu STM32F4Discovery sebagai *master* pengontrol utama *input* atau *output* dan Arduino Nano V3 sebagai *slave*. Robot dibekali dengan sensor *ultrasonic* sebagai pendeteksi jarak objek dinding dengan robot dan sensor *gyroscope* sebagai pendeteksi sudut euler untuk mengetahui adanya gangguan pada lintasan arena serta untuk menentukan arah jalannya robot. Kontrol proporsional dan *inverse kinematics* digunakan untuk membantu robot dalam bermanuver. Penerapan algoritma *wall following* pada robot *quadruped* bertujuan untuk membantu robot saat bermanuver menyusuri arena pengujian dengan cara mendeteksi objek dinding untuk ditelusuri. Arena pengujian dilengkapi dengan lima rintangan yang berbeda, untuk menyulitkan robot ketika berjalan. Metode *sprawling up* digunakan untuk membantu robot dalam menyelesaikan rintangan, dimana robot akan meninggikan postur kakinya untuk mencegah *body* robot mudah tersangkut dan memperlebar langkah kakinya agar tidak mudah tersandung. *Sprawling up* akan aktif jika mendeteksi nilai *set point* sudut euler *pitch* $>7^\circ$ dan $<1^\circ$, sedangkan nilai sudut *roll* $>3^\circ$ dan $<-3^\circ$, nilai *set point* tersebut didapatkan dari pengujian tanpa rintangan sejauh 135cm. Hasil akhir pengujian ini, robot berhasil menyelesaikan *full misi* atau menyusuri semua rintangan dengan capaian waktu rata-rata 37,6 detik.

Kata Kunci: Robot *Quadruped*, Kontrol Proporsional, *Inverse Kinematics*, Algoritma *Wall Following*, Lintasan Tidak Rata.

Abstract

A quadruped robot is a four-legged robot, this robot uses two types of microcontrollers, namely STM32F4Discovery as the master input or output main controller and Arduino Nano V3 as a slave. Robot is equipped with ultrasonic sensor as a distance detector of wall object with robot and gyroscope sensor as an euler angle detector to determine the disturbance in the arena trajectory and to determine direction of robot. Proportional control and inverse kinematics are used to assist robot in maneuvering. Implementation of the wall following algorithm on the quadruped robot aims to help the robot when maneuvering through the testing arena by detecting wall objects to be traced. The testing arena is equipped with five different obstacles, to make it difficult for robot when walking. The Sprawling Up method is used to assist the robot in completing obstacles, where a robot will elevate its leg posture to prevent the robot's body from easily getting stuck and widen its footsteps so that it does not trip easily. Sprawling up will be active if it detects the euler pitch angle set point value $>7^\circ$ and $<1^\circ$, while the roll angle value is $>3^\circ$ and $<-3^\circ$, set point value is obtained from testing without obstacles as far as 135cm. The final result of this test, robot successfully completed full mission or along all obstacles with an average time of 37.6 seconds.

Keywords: Quadruped Robot, Proportional Control, Inverse Kinematics, Wall Following Algorithm, Uneven Trajectory.

PENDAHULUAN

Dizaman modern ini pengembangan teknologi robotika yang begitu pesat membawa perubahan positif bagi kehidupan manusia, diantaranya yaitu meningkatkan keamanan dan kenyamanan dalam berkerja untuk meminimalisir kecelakaan dari suatu pekerjaan. Dalam hal ini, robot juga dikembangkan untuk mampu membantu manusia dalam proses penanggulangan bencana hingga

evakuasi korban bencana yang memiliki resiko berbahaya yang cukup tinggi.

Menanggapi hal tersebut Indonesia melalui Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia pada setiap tahunnya mengadakan acara tahunan yaitu Kontes Robot Indonesia (KRI) dalam kompetisi ini terdapat kategori perlombaan Kontes Robot SAR Indonesia (KRSRI). Suatu misi penyelamatan dan penanggulangan bencana seperti kebakaran dan lain

sebagainya (Kusumoputro, dkk, 2021). Salah satu jenis robot yang sering diikuti sertakan dalam perlombaan ini yaitu robot *quadruped* atau robot berkaki empat yang tersusun dari motor servo yang dapat dikontrol sudut putarannya menggunakan nilai *set point*. Robot ini memiliki karakteristik bermanuver jalan yang baik yaitu robot mampu berbelok tanpa harus memutar badan sehingga tidak membutuhkan haluan belok yang lebar untuk berbelok.

Robot berkaki empat ini menggunakan tipe bentuk kaki *sprawling* yaitu postur kaki bagian paha berada pada posisi arah horizontal dan kaki bagian betis berada pada arah posisi vertikal (Kitano, dkk, 2016). Tipe kaki ini juga dapat dikembangkan menjadi *sprawling up mode* yaitu ketika robot mempertinggi postur kakinya agar dapat mempermudah dalam melintasi rintangan dataran tidak rata, *mode* ini akan aktif jika robot mendeteksi nilai *set point* dari nilai sudut euler sensor *gyroscope* yang telah ditentukan. Dataran yang tidak rata merupakan salah satu faktor utama yang dapat menghambat proses bermanuvernya robot dalam menyelesaikan misi, gangguan ini dapat menyebabkan robot mudah tersandung, tergelincir, hingga tersangkut.

Algoritma *wall following* merupakan metode navigasi yang digunakan oleh robot dengan cara mendeteksi objek dinding atau labirin untuk ditelusuri agar dapat menyelesaikan suatu misi tertentu (Purnama, 2017). Algoritma ini dapat diterapkan pada robot *quadruped* agar robot mampu menelusuri arena penelitian dengan mendeteksi objek dinding dibantu oleh sensor *ultrasonic* sebagai pendeteksi jarak objek dinding. Mikrokontroler yang digunakan oleh robot *quadruped* ini adalah Arduino Nano dan STM32F4Discovery.

Dalam membahas penelitian ini, terdapat beberapa penelitian terdahulu yang serupa mengenai bagaimana mengoptimalkan cara bergerak atau berjalannya robot saat melewati rintangan dataran tidak rata dengan metode yang berbeda-beda. Seperti, penelitian yang dilakukan oleh Prayogo, dkk, tahun 2018. Mengenai keseimbangan robot *quadruped* saat melewati dataran tidak rata menggunakan algoritma *stabilization*. Algoritma ini memiliki konsep penyesuaian *body* robot dengan cara meninggikan masing-masing kaki robot satu persatu dengan pendeteksian kemiringan menggunakan sensor *gyroscope* dan *accelerometer* yang diolah oleh kontrol PID, serta dibutuhkan *inverse kinematics* sebagai pengatur sudut x, y, dan z disetiap *joint* pada kaki robot. Penelitian ini memiliki keunggulan dalam menyeimbangkan badan robot hingga mampu meningkatkan kestabilan pada sudut *pitch* sebesar 75,58% dan sudut *roll* sebesar 71,15%. Namun, untuk mendapatkan hasil keseimbangan tersebut membutuhkan waktu yang relatif lama sekitar 105-160 detik dengan

ukuran langkah kaki yang berbeda-beda disetiap pengujiannya di lintasan *uneven floor* sepanjang 70 cm.

Sedangkan pada penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Rudy dan Lukas tahun 2017 mengenai penerapan algoritma *gait* dan *inverse kinematics* pada robot *hexapod* agar dapat melewati rintangan tidak rata dengan cara mengontrol keseimbangan badan robot. Algoritma *gait* yang dikolaborasikan dengan program *inverse kinematics* akan menghasilkan pergerakan kaki robot yang baik, sebab mikrokontroler membaca nilai dari sensor *gyroscope* dan *accelerometer* dimana nilai tersebut akan dijadikan nilai parameter pergerakan disetiap sumbu x, y, dan z pada algoritma *gait*, sehingga menghasilkan nilai *end effector* yang baru disetiap kaki. Kemudian, nilai *end effector* tersebut digunakan program *inverse kinematics* untuk menghitung nilai sudut setiap *joint* dari keenam kaki robot. Selanjutnya mikrokontroler akan mengirimkan nilai sudut tersebut ke modul pengendalian motor servo agar modul pengendalian motor servo dapat mengatur posisi motor servo sehingga sesuai dengan besar sudut yang ditetapkan melalui *inverse kinematics*. Metode ini memiliki keunggulan dalam menjaga keseimbangan badan robot *hexapod* saat melintasi dataran tidak rata yang memiliki tingkat kemiringan permukaan 6,83° hingga 12,12° dengan presentase kesalahan nilai *pitch* 1,53% dan nilai *roll* 2,49%. Namun, pemilihan konsep robot *hexapod* atau berkaki 6 memiliki kelemahan dalam bermanuver belok yang membutuhkan sudut yang relatif besar agar dapat berbelok sehingga membutuhkan lintasan yang lebar.

Pada penelitian yang saya lakukan mengenai robot *quadruped* yaitu menerapkan algoritma *wall following* sebagai penuntun jalan robot saat berada di dalam arena. Sedangkan pada metode penyelesaian masalah melewati rintangan tidak rata ini menggunakan metode *sprawling up*, metode ini bekerja dengan cara meninggikan postur kaki robot untuk mencegah badan dan kaki robot tidak mudah tersangkut maupun tersandung. Dalam perancangan sistem kontrol robot digunakan kontrol proporsional dan *inverse kinematics*, dimana kontrol proporsional digunakan robot untuk membantunya dalam bernavigasi ketika berjalan agar robot tetap berada diposisi yang diinginkan ketika melintasi arena pengujian, sedangkan pada *inverse kinematics* digunakan untuk membantu robot dalam mengatur sudut putaran servo pada kaki robot agar robot mampu berjalan dengan baik. Kelebihan dari konsep penelitian yang saya lakukan adalah robot *quadruped* dapat melintasi rintangan tidak rata dengan durasi waktu relatif cepat, sekitar 10 detik. Namun pada penelitian yang saya lakukan memiliki kekurangan yaitu tidak disediakan sistem keseimbangan badan secara otomatis.

\

METODE

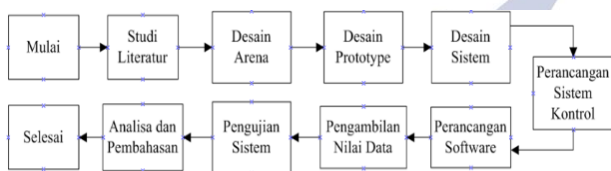
Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif merupakan metode penelitian yang memanfaatkan nilai angka dan statistik dalam pengumpulan data untuk dianalisis agar menemukan apa yang ingin diketahui.

Untuk mendukung keberhasilan penelitian ini diperlukan *Software* CoCoX CoIDE dan Arduino IDE untuk memprogram robot, serta untuk men-*setting* servo digunakan *Software* Roboplus.

Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah dari perancangan penelitian ini dapat dijelaskan dalam Gambar 1.



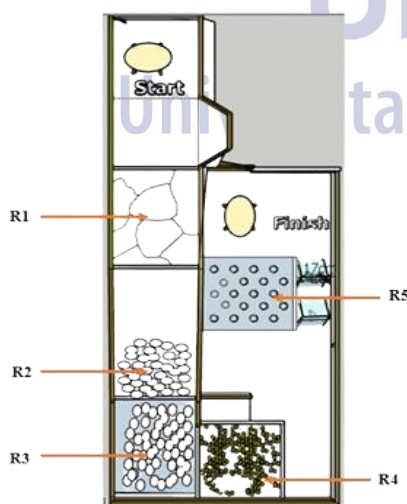
Gambar 1. Diagram Alir Rancangan Penelitian

Studi Literatur

Pada studi literatur ini dilakukan tahap pengumpulan data referensi objek yang berkaitan dengan apa yang sedang diteliti. Data atau materi referensi dapat ditemukan seperti pada jurnal, artikel ilmiah, skripsi, internet, dan buku-buku yang memiliki kaitan dengan apa yang sedang diteliti (Tumbel, dkk, 2018).

Desain Arena

Perancangan arena dan rintangan diperlukan, sebagai tempat untuk men-*trial* robot dan sebagai sarana untuk mengetahui tingkat keberhasilan pada penelitian ini. Bahan pembuatan arena penelitian ini terbuat dari kayu multipleks yang tersusun sesuai dengan desain arena yang telah dibuat. Desain arena dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Arena Penelitian Robot

(Kusumoputro, dkk. Buku Pedoman KRI, 2023)

Desain arena penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2 memiliki spesifikasi, diantaranya:

Dimensi ukuran arena luar: 285cm × 120cm

Dimensi ukuran arena dalam: 281cm × 116cm

Ketinggian tembok disetiap sisi: 10cm

Ketebalan dinding multiplex: 2cm

Lebar lorong atau lintasan *start*: 45cm

Lebar lorong atau lintasan berbelok: 45cm

Lebar lorong atau lintasan *finish*: 73cm

Dalam arena lintasan pengujian terdapat beberapa rintangan yang harus dilalui oleh robot. Rancangan rintangan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Rintangan Jalan Pecah (R1)

Rintangan pertama merupakan representasi dari jalan pecah yang mudah bergoyang. Rintangan ini memiliki luas 55x45cm dengan ketebalan puing 1cm. Dalam setiap puing terdapat penyangga puing dengan diameter 3-4cm dan ketebalan penyangga puing 2cm, puing-puing ini memiliki jarak antar puing ± 5mm.

2. Rintangan Dataran Menurun 12° (R2)

Pada rintangan kedua terdapat dataran menurun sekitar 12° dengan ketinggian 20cm dan luas lintasan 80x45cm. Rintangan ini juga memiliki gangguan berupa koral sebanyak 40% yang terletak diujung bawah lintasan dengan ukuran ± 3-5cm.

3. Rintangan Jalan Berpuing (R3)

Rintangan ketiga yaitu rintangan yang merepresentasikan jalanan berpuing-puing dengan memanfaatkan batu koral sebanyak 90% sebagai puing-puingnya yang memiliki ukuran ± 3-5cm dan luas zona 60x45cm. Rintangan ini juga diapit oleh tanggul dengan lebar 2cm dan tinggi 2cm.

4. Rintangan Jalan Berlumpur (R4)

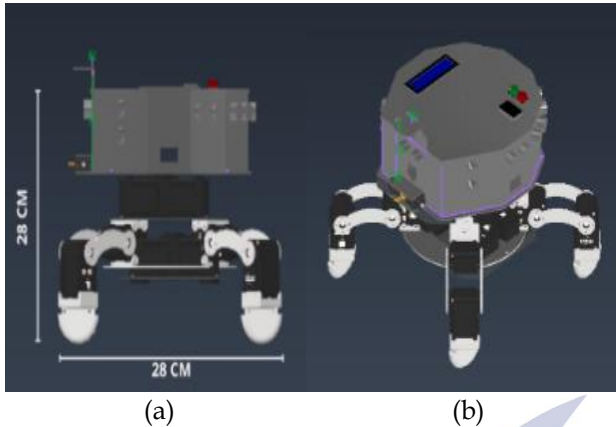
Rintang keempat merupakan rintangan yang merepresentasikan jalan berlumpur dengan memanfaatkan kelereng sebagai lumpurnya. Kelereng akan ditumpuk sebanyak dua tingkat dengan lebar zona 45x45cm, rintangan ini juga diapit oleh tanggul lebar 2cm dan tinggi 2cm.

5. Rintangan Jalan Kontur Tanah Distorsi (R5)

Rintangan kelima merupakan rintangan yang merepresentasikan kondisi jalan yang memiliki kontur tanah distorsi. Untuk merepresentasikan kondisi tanah tersebut dapat memanfaatkan papan berukuran 54x45cm dipasang pada bagian permukaan bawah dengan ketebalan 1cm dan ditumpuk dengan papan berukuran 50x45cm dengan ketebalan 1cm dibagian permukaan atas. Pada permukaan atas juga dipasang halangan silinder dengan diameter 2cm dan ketinggian 2cm.

Desain Prototype

Desain *prototype* robot *quadruped* dapat dilihat pada Gambar 3.



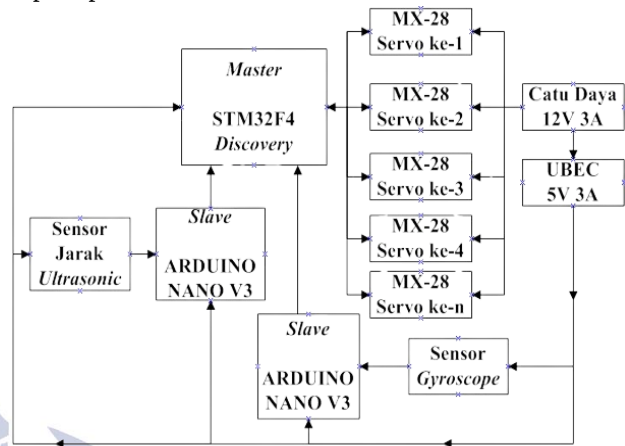
Gambar 3. (a) Sisi Samping Robot, (b) Sisi Atas Robot

Robot *quadruped* ini memiliki berat 3,8kg, terbuat dari bahan akrilik ketebalan 2mm pada bagian *body* robot, dan pada bagian penopang servo serta bentuk lengan 2 atau femur untuk mengatur sudut servo terbuat dari plat besi dengan ketebalan 2mm. Pondasi robot menggunakan *spacer* plastik dan besi dengan panjang 0.5cm, 1cm, 2cm, 4cm dan 5cm serta lebar *spacer* 3mm yang dilengkapi baut dan mur untuk mengunci bagian robot. Bagian *body* robot terdapat 4 sensor *ultrasonic* yang dipasang paralel mengelilingi robot dari depan, belakang, samping kanan, dan samping kiri. Tampak atas terdapat voltmeter, tombol *reset*, tombol *start*, LCD 16x2, dan bagian samping saklar *on/off*. Pada bagian bawah terdapat 4 kaki, 1 kaki terdiri dari 3 servo, servo dihubungkan menggunakan plat besi untuk derajat kebebasannya.

Desain Sistem

Pada bagian desain sistem robot *quadruped* ini terdiri dari rancangan blok *hardware* dan perancangan pengolahan data. Pada rancangan blok *hardware* terdiri dari *power supply* 12V, UBEC 5V 3A, Sensor *Gyroscope*, STM32F4Discovery, Arduino Nano V3, Sensor *Ultrasonic*, dan Servo MX-28. *Power supply* 12V digunakan untuk sumber penyediaan listrik. UBEC 5V 3A sebagai penurun tegangan 5V 3A dari *power supply* 12V. Sensor *gyroscope* digunakan sebagai navigasi arah jalan robot sekaligus pendeteksi gangguan dataran tidak rata. Sensor *ultrasonic* difungsikan sebagai pendeteksi jarak dinding terhadap posisi robot. Servo MX-28 merupakan aktuator yang digunakan sebagai penggerak tangan atau kaki pada robot (*mobile robot in joint*). Pada robot *quadruped* ini menggunakan 2 jenis mikrokontroler yaitu STM32F4Discovery sebagai *master* pengontrol utama *input* atau *output* dan Arduino Nano V3 sebagai *slave*.

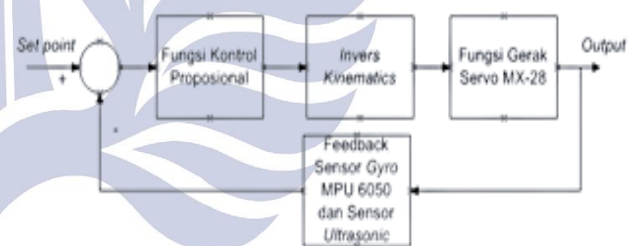
Desain sistem secara garis besar dapat dijelaskan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem Robot

Kontrol Proporsional

Kontrol proporsional merupakan salah satu kontrol umpan balik yang dapat digunakan pada sistem kontrol *loop* tertutup. Kontrol proporsional dapat meminimalisir fluktuasi dalam variabel proses. Hal ini dapat memberikan respons yang lebih cepat daripada sistem kontrol integral dan derivatif untuk mendekati *set point*. Diagram blok dari sistem kontrol proporsional yang diterapkan pada robot, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Blok Sistem Kontrol Proporsional

Pada penerapan sistem kontrol proporsional dibutuhkan sistem kontrol proporsional dalam bentuk digital, maka dibutuhkan pembuatan program kontrol proporsional ini berdasarkan persamaan kontrol proporsional digital. Persamaan matematis dari kontrol proporsional, dapat dilihat pada persamaan (1).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1)$$

Dimana:

$u(t)$ ialah sinyal kontrol

K_p ialah konstanta proporsional

$e(t)$ ialah sinyal *error*

Dalam bentuk laplace dapat ditulis seperti pada persamaan (2).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2)$$

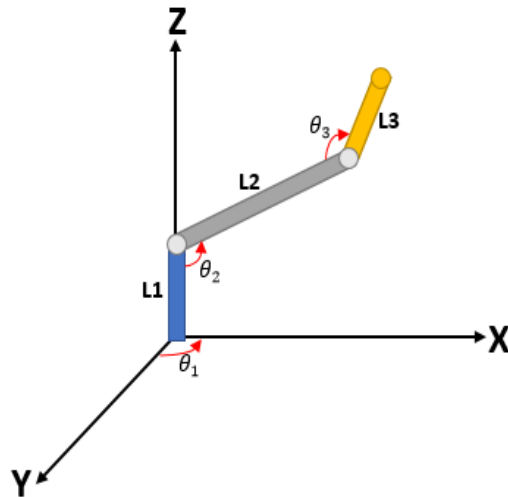
Dimana:

$U(s)$ ialah transformasi laplace dari sinyal kontrol $u(t)$

$E(s)$ ialah transformasi laplace dari sinyal *error* $e(t)$

Inverse Kinematics

Model *inverse kinematics* 3 DoF yang diterapkan pada robot *quadruped* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Model Koordinat *Inverse Kinematic* 3 DoF

Inverse kinematics merupakan metode yang digunakan untuk menentukan sudut-sudut sendi (*joint*) dari orientasi dan posisi *end-effector* kaki robot yang diinginkan. Dalam menggunakan *inverse kinematics* dapat menggunakan rumus trigonometri untuk mendapatkan data posisi koordinat dari *end-effector* (Wibowo, 2017). Untuk dapat menghitung nilai setiap sudut sendi (*joint*) $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ seperti pada Gambar 6, maka dibutuhkan rumus perhitungan trigonometri.

Untuk mencari nilai *joint* ke - 1 (θ_1) dapat dilihat pada persamaan (3).

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) \quad (3)$$

Dimana:

θ_1 ialah *joint* ke - 1

x ialah nilai koordinat x

y ialah nilai koordinat y

Setelah mendapatkan nilai θ_1 , maka selanjutnya yaitu mencari θ_2 dan θ_3 dengan memerlukan nilai $c3$ dan $s3$. Nilai $c3$ dan $s3$ adalah variabel bantu untuk menyelesaikan rumus θ_2 dan θ_3 . Rumus untuk mencari nilai $c3$ dan $s3$ dapat dilihat pada persamaan (4) dan (5).

$$c3 = \frac{(x^2 + y^2 + (z - L1)^2 - L2^2 - L3^2)}{(2 \times L2 \times L3)} \quad (4)$$

$$s3 = \sqrt{1 - c3^2} \quad (5)$$

Dimana:

z ialah nilai koordinat z

$L1$ ialah panjang *link* pertama

$L2$ ialah panjang *link* kedua

$L3$ ialah panjang *link* ketiga

Selanjutnya mencari nilai θ_3 menggunakan rumus pada persamaan (6).

$$\theta_3 = \text{atan2}(s3, c3) \quad (6)$$

Pada persamaan (6) dengan memberikan nilai dari variabel $s3$ dan $c3$, maka akan didapatkan nilai θ_3 . Setelah mendapatkan nilai θ_3 , selanjutnya mencari nilai dari θ_2 dengan menggunakan rumus pada persamaan (7).

$$\theta_2 = \text{atan2}((L3 \times s3), (L2 + (L3 \times c3))) \quad (7)$$

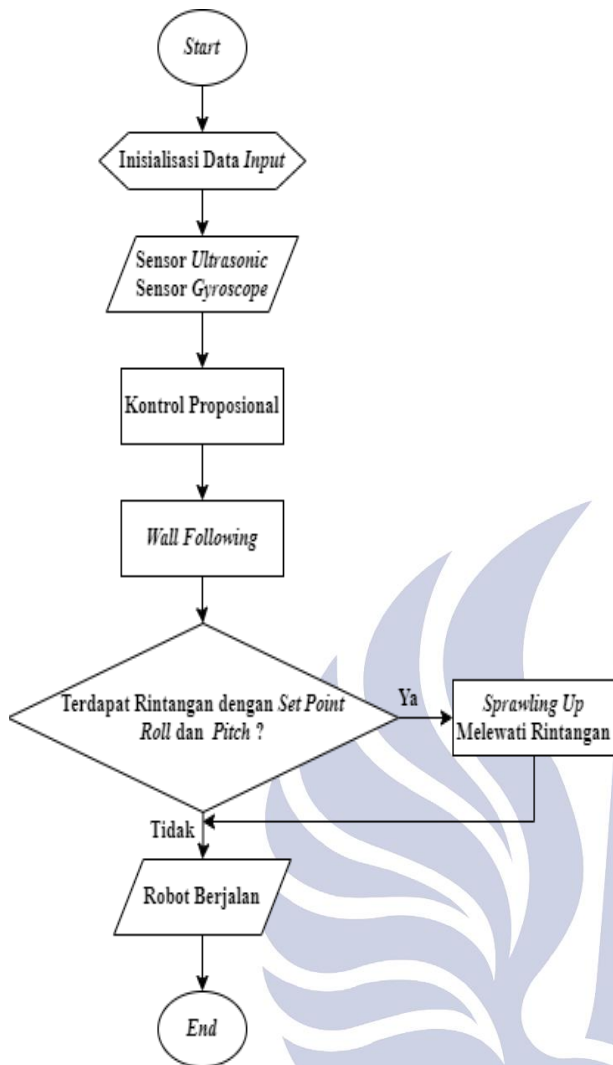
Pada persamaan (7) dengan memberikan nilai $L3, L2, c3$ dan $s3$ maka akan didapatkan nilai θ_2 .

Inverse kinematics digunakan pada robot *quadruped* sebagai sistem penggerak motor servo disetiap sendi secara otomatis sehingga tidak perlu mengaturnya secara manual (Nasrudin, dkk, 2019).

Perancangan Software

Rancangan *software* adalah sebuah rancangan program yang dikirimkan kedalam mikrokontroler STM32F4*Discovery* dan Arduino Nano. Pemrograman mikrokontroler STM32F4*Discovery* menggunakan *software* Coocox CoIDE dimana pemrogramannya menggunakan bahasa C, sedangkan pada mikrokontroler Arduino Nano menggunakan *software* Arduino IDE dimana bahasanya merupakan turunan dari C++. *Flowchart* perancangan *software* dapat dilihat pada Gambar 7.

Saat tombol *start* ditekan robot berjalan bersamaan dengan aktifnya sensor *ultrasonic* dan *gyroscope*. Sensor *ultrasonic* difungsikan sebagai pendeteksi jarak dinding terhadap posisi robot ketika berada di lintasan arena. Jalannya program pola langkah robot ini, dengan membaca dan membandingkan nilai jarak refrensi atau *set point*. Langkah jalannya robot dapat terus menyesuaikan kondisi sistem robot saat menyusuri lintasan menggunakan algoritma *wall following*. Nilai *set point* akan diberikan pada pengendali proporsional, sebagai masukan sistem. Nilai *set point* dalam hal ini merupakan nilai jarak dinding yang akan disesuaikan oleh pola langkah terhadap jarak dinding agar gerak jalan robot dapat berada dibagian posisi yang diinginkan. Namun, pada saat proses jalannya robot belum dapat mencapai posisi tersebut, maka sensor akan membaca nilai kecenderungan beban yang diterima.



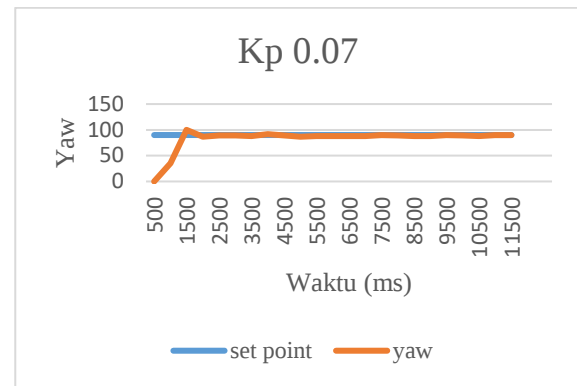
Gambar 7. Flowchart Rancangan Software

Ketika proses robot berjalan dengan mendeteksi guncangan atau perubahan nilai dibatas normal dari sensor *gyroscope* pada nilai *pitch* dan *roll* saat melewati rintangan, maka robot akan melakukan postur *sprawling up mode* untuk melewati rintangan tersebut agar robot tidak mudah untuk tersangkut. *Sprawling up mode* digunakan untuk menjangkau langkah dan *body* robot agar meninggi sehingga tidak mudah tersangkut rintangan atau dataran yang tidak rata.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kontrol Proporsional

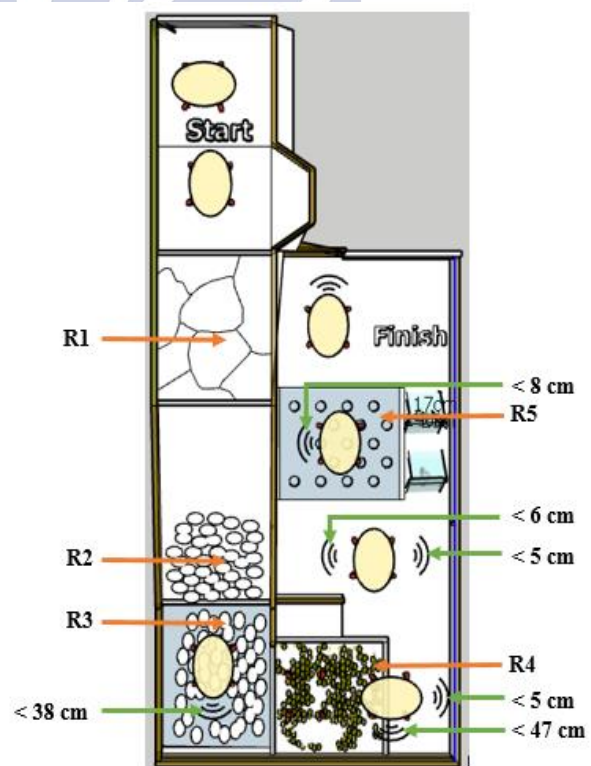
Perancangan sistem kontrol proporsional dilakukan untuk mendapatkan parameter K_p . Metode yang digunakan yaitu metode *tuning trial and error* dengan cara memasukkan nilai secara acak, namun bertahap dari nilai terendah hingga tertinggi untuk mendapatkan respon yang baik. Hasil pengujian kontrol proporsional menemukan nilai $K_p = 0.07$ sebagai nilai parameter terbaik dari berbagai nilai yang telah diuji. Hasil pengujian parameter $K_p = 0.07$ dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8. Grafik Pengujian Nilai Parameter Sudut Yaw dengan $K_p = 0.07$

Hasil respon pada Gambar 8 menunjukkan bahwa robot *quadruped* memberikan respon yang cukup cepat untuk mencapai kondisi *steady state* di nilai sudut yaw 90° dengan waktu 7,5 detik.

Pengujian Wall Following

Skema pengujian algoritma *wall following* yang diterapkan pada robot *quadruped* dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema Pengujian Algoritma Wall Following

Pada pengujian algoritma *wall following*, robot akan diuji dengan berjalan menyusuri arena tanpa diberikan rintangan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon dan keberhasilan robot dalam menyusuri arena pengujian ketika diterapkan algoritma *wall following*. Agar

penerapan metode algoritma *wall following* dapat berjalan dengan baik, dibutuhkan sistem navigasi sudut *yaw* dari sensor *gyroscope* untuk menentukan arah jalan robot (Natakusuma, 2018), sedangkan sensor *ultrasonic* digunakan untuk mendeteksi jarak objek dinding. Pengujian ini dilakukan sebanyak lima kali percobaan.

Dapat diketahui pada Gambar 9, bahwa ketika robot diletakan diatas arena pengujian di zona *start* dan robot diaktifkan maka robot akan mengkalibrasi nilai sudut sensor *gyroscope*. Ketika tombol *start* robot ditekan maka robot akan langsung memutar badan 90° dan berjalan lurus melewati zona rintangan kesatu hingga ketiga menggunakan sudut *yaw* 90° , saat robot sudah berada di zona rintangan ketiga maka sensor *ultrasonic* bagian depan robot aktif mendeteksi objek dinding dengan jarak $<37\text{cm}$ untuk mengaktifkan gerak berbelok ke kiri, kembali keawal sudut kalibrasi 0° untuk melewati zona rintangan keempat dengan berjalan lurus menggunakan sudut *yaw* 0° . Ketika robot sudah melewati zona rintangan keempat sensor *ultrasonic* bagian depan robot aktif mendeteksi nilai jarak objek dinding $<5\text{cm}$, ketika sensor depan robot telah mendeteksi nilai jarak objek dinding $<5\text{cm}$ maka sensor *ultrasonic* bagian kanan robot akan aktif mendeteksi objek dinding untuk bergeser ke kiri dengan jarak $<47\text{cm}$ sekaligus memutar badan hingga -90° . Ketika robot sudah berada diarah posisi -90° maka sensor *ultrasonic* bagian kanan dan kiri robot aktif, dimana sensor *ultrasonic* bagian kanan robot bertugas sebagai pendeteksi nilai jarak objek dinding kanan robot agar robot bergeser ke kiri dengan jarak $>5\text{cm}$, sedangkan sensor *ultrasonic* sebelah kiri digunakan untuk memonitoring robot agar berhenti bergeser ke kiri di jarak $<6\text{cm}$. Jika robot sudah berhenti maka robot berjalan lurus dengan menggunakan sudut *yaw* -90° dan mendeksi objek dinding sebelah kiri dengan jarak $<8\text{cm}$, hingga robot mendeteksi objek dinding depan robot dengan jarak $<7\text{cm}$ menggunakan sensor *ultrasonic* bagian depan dan robot berhenti di zona *finish*.

Ketika algoritma *wall following* diterapkan pada robot *quadruped*, robot mampu menyelesaikan lintasan arena sebanyak lima kali pengujian dengan status robot berhasil bermanuver diseluruh arena pengujian tanpa diberikan rintangan dan catatan waktu yang dapat dicapai oleh robot cukup singkat dengan rata-rata waktu 37,8 detik. Hasil pengujian algoritma *wall following* dapat dilihat pada Tabel 1.

Pengujian Metode *Sprawling Up*

Sprawling up merupakan metode yang digunakan untuk memudahkan robot dalam melintasi dataran tidak rata agar *body* dan kaki robot tidak mudah tersangkut. Metode ini memanfaatkan postur kaki robot dengan cara meninggikan postur kaki, dimana kondisi normal atau awalnya *body* robot memiliki jarak 3,5cm diatas tanah, hingga dapat

ditinggikan menjadi 8,2cm diatas tanah secara otomatis menggunakan metode *sprawling up*.

Tabel 1. Hasil Pengujian Algoritma *Wall Following*

Percobaan	Waktu Ditempuh	Hasil
1	38 detik	Manuver Berhasil
2	37 detik	Manuver Berhasil
3	38 detik	Manuver Berhasil
4	38 detik	Manuver Berhasil
5	38 detik	Manuver Berhasil
Rata-rata	37,8 detik	

Pengambilan nilai data *set point* didapatkan dari pengujian robot saat robot melintasi sebagian arena tanpa rintangan sepanjang 135cm untuk mengetahui nilai batas sudut gangguan normal dan tidak normal terhadap robot. Nilai sudut ini akan digunakan robot sebagai *set point* untuk mengaktifkan *sprawling up mode* agar robot mampu melewati rintangan dengan baik. Pengujian melewati rintangan ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian Tanpa Rintangan (TR) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Tanpa Rintangan (TR)

Pengujian	Nilai Data Pitch		Nilai Data Roll		Waktu
	Max	Min	Max	Min	
1	6°	1°	3°	-1°	10 detik
2	7°	1°	2°	-3°	10 detik
3	7°	1°	2°	-3°	8 detik
4	6°	1°	2°	-2°	9,5 detik
5	5°	1°	3°	0°	6,5 detik
Rata-rata					8,8 detik

Dapat diketahui bahwa batas nilai gangguan normal yang didapatkan pada saat robot melewati dataran tanpa rintangan mendapatkan nilai sudut *pitch* maksimal 7° dan minimal 1° , sedangkan nilai sudut *roll* maksimal 3° dan minimal -3° . Maka dapat disimpulkan nilai *set point* yang akan digunakan pada pengujian di lintasan tidak rata yaitu menggunakan nilai $>7^\circ$ dan $<1^\circ$ untuk sudut *pitch*, sedangkan nilai $>3^\circ$ dan $<-3^\circ$ untuk sudut *roll* sebagai nilai *set point* mengaktifkan *sprawling up mode* pada robot *quadruped* saat melewati rintangan tidak rata atau robot mendeteksi adanya gangguan dari batas sudut tidak normal. Langkah selanjutnya yang akan dilakukan adalah merancang rule atau aturan. Rule ini berfungsi untuk memetakan suatu kondisi agar robot dapat memahami suatu kondisi yang sedang dialami ketika bermanuver, terdapat empat rule yang diberikan kepada robot, diantaranya:

Jika *pitch* $>7^\circ$, maka robot akan *sprawling up*

Jika *pitch* $<1^\circ$, maka robot akan *sprawling up*

Jika *roll* $>3^\circ$, maka robot akan *sprawling up*

Jika *roll* $<-3^\circ$, maka robot akan *sprawling up*

Berikut ini merupakan pengujian dari masing-masing rintangan yang terdapat pada arena pengujian.

1. Pengujian Rintangan Jalan Pecah (R1)

Pengujian rintangan jalan pecah ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian rintangan jalan pecah dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Rintangan Jalan Pecah (R1)

Pengujian	Nilai Data Pitch		Nilai Data Roll		Status	Waktu
	Max	Min	Max	Min		
1	6°	-10°	0°	-4°	<i>Sprawling up</i>	4,5 detik
2	9°	-6°	2°	-1°	<i>Sprawling up</i>	5 detik
3	10°	-5°	2°	-3°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
4	9°	-4°	1°	-6°	<i>Sprawling up</i>	6 detik
5	9°	-4°	1°	-2°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
Rata-rata						5,3 detik

Pada pengujian rintangan pecah-pecah, robot mampu bermanuver dengan baik saat melintasi rintangan dan robot juga mampu menyelesaikan rintangan dengan rata-rata waktu 5,3 detik.

2. Pengujian Rintangan Dataran Menurun 12° (R2)

Pengujian pada rintangan dataran menurun 12° ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian rintangan dataran menurun 12° dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Rintangan Dataran Menurun 12° (R2)

Pengujian	Nilai Data Pitch		Nilai Data Roll		Status	Waktu
	Max	Min	Max	Min		
1	1°	-20°	1°	-6°	Tidak <i>Sprawling up</i>	9 detik
2	13°	-18°	0°	-6°	Tidak <i>Sprawling up</i>	8,5 detik
3	3°	-19°	1°	-4°	Tidak <i>Sprawling up</i>	9,5 detik
4	7°	-17°	3°	-3°	Tidak <i>Sprawling up</i>	9 detik
5	5°	-19°	1°	-5°	Tidak <i>Sprawling up</i>	8,5 detik
Rata-rata						8,9 detik

Pada pengujian rintangan dataran menurun 12°, robot mampu bermanuver dengan baik saat melintasi rintangan dan robot juga mampu menyelesaikan rintangan dengan rata-rata waktu 8,9 detik.

3. Pengujian Rintangan Jalan Berpuing (R3)

Pengujian rintangan jalan berpuing ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian rintangan jalan berpuing dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Rintangan Jalan Berpuing (R3)

Pengujian	Nilai Data Roll		Nilai Data Pitch		Status	Waktu
	Max	Min	Max	Min		
1	10°	-1°	2°	-2°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
2	9°	-2°	2°	-3°	<i>Sprawling up</i>	4 detik
3	13°	-1°	1°	-5°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
4	10°	-7°	1°	-2°	<i>Sprawling up</i>	6,5 detik
5	9°	-1°	3°	-4°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
Rata-rata						5,4 detik

Pada pengujian rintangan jalan berpuing, robot mampu bermanuver dengan baik saat melintasi rintangan dan robot juga mampu menyelesaikan rintangan dengan rata-rata waktu 5,4 detik.

4. Pengujian Rintangan Berlumpur (R4)

Pengujian rintangan berlumpur ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian rintangan berlumpur dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Rintangan Berlumpur (R4)

Pengujian	Nilai Data Pitch		Nilai Data Roll		Status	Waktu
	Max	Min	Max	Min		
1	3°	3°	1°	0°	<i>Sprawling up</i>	4 detik
2	3°	3°	0°	-1°	<i>Sprawling up</i>	4 detik
3	3°	1°	1°	-1°	<i>Sprawling up</i>	5 detik
4	6°	3°	1°	0°	<i>Sprawling up</i>	4,5 detik
5	4°	3°	0°	-2°	<i>Sprawling up</i>	4 detik
Rata-rata						4,3 detik

Pada pengujian rintangan jalan berlumpur, robot mampu bermanuver dengan baik saat melintasi rintangan dan robot juga mampu menyelesaikan rintangan dengan rata-rata waktu 4,3 detik.

5. Pengujian Rintangan Jalan Kontur Tanah Distorsi (R5)

Pengujian rintangan jalan kontur tanah distorsi ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian rintangan jalan kontur tanah distorsi dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Rintangan Jalan Kontur Tanah Distorsi (R5)

Pengujian	Nilai Data Pitch		Nilai Data Roll		Status	Waktu
	Max	Min	Max	Min		
1	12 °	-7°	2°	-3°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
2	12 °	-4°	2°	-4°	<i>Sprawling up</i>	7 detik
3	11 °	-5°	2°	-4°	<i>Sprawling up</i>	6,5 detik
4	8 °	0°	2°	-4°	<i>Sprawling up</i>	6,5 detik
5	11 °	-7°	1°	-3°	<i>Sprawling up</i>	5,5 detik
Rata-rata						6,2 detik

Pada pengujian rintangan jalan kontur tanah distorsi, robot mampu bermanuver dengan baik saat melintasi rintangan dan robot juga mampu menyelesaikan rintangan dengan rata-rata waktu 6,2 detik.

Pengujian *Wall Following Full Misi*

Pada pengujian algoritma *wall following* dengan *full misi*, robot menyusuri arena pengujian dengan melintasi kelima rintangan dan menerapkan metode *sprawling up* ketika robot mendeteksi gangguan dari dataran tidak rata yang dideteksi oleh sensor *gyroscope*. Pengujian ini dilakukan sebanyak lima kali pengujian. Hasil pengujian algoritma *wall following* dengan *full misi* dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian *Wall Following Full Misi*

Pengujian	Waktu	Status
1	36 detik	Berhasil
2	41 detik	Berhasil
3	36 detik	Berhasil
4	38 detik	Berhasil
5	37 detik	Berhasil
Rata-rata	37,6 detik	

Dapat diketahui berdasarkan Tabel 8 robot berhasil berjalan menyusuri arena pengujian seraya melintasi kelima rintangan dengan pencapaian waktu rata-rata 37,6 detik.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan penelitian dan pengujian mengenai penerapan algoritma *wall following* pada robot *quadruped* dilintasan tidak rata yang telah dilaksanakan, maka dapat disimpulkan bahwa robot *quadruped* berkaki empat yang dibekali dengan sensor *ultrasonic* dan sensor *gyroscope*. Dimana Sensor *ultrasonic* merupakan sensor pendukung penerapan algoritma *wall following*, sensor ini bekerja dengan cara mendeteksi jarak robot dengan tembok untuk menelusuri arena pengujian atau labirin. Sedangkan fungsi dari sensor *gyroscope* yaitu untuk membantu robot dalam bernavigasi arah jalan dan mendeteksi adanya gangguan dari dataran

tidak rata. Robot berhasil menerapkan algoritma *wall following* dengan baik saat melintasi arena pengujian dengan menggunakan sistem kontrol proporsional sebagai sistem kontrol navigasi robot dalam bermanuver dengan nilai $K_p = 0.07$ yang merupakan hasil pengujian *tuning P trial and error*, sedangkan *inverse kinematics* digunakan sebagai pengatur sudut putaran servo kaki robot untuk menciptakan pola langkah kaki robot dengan baik.

Terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan oleh robot untuk mengaktifkan *sprawling up mode* yaitu sudut *roll* dan *pitch*, dimana sudut tersebut dapat diukur menggunakan sensor *gyroscope*. Data *set point* sudut *roll* dan *pitch* untuk mengaktifkan *sprawling up mode* didapatkan dari pengujian batas gangguan normal di lintasan arena pengujian tanpa rintangan sepanjang 135cm, sehingga didapatkan nilai *set point* sudut *pitch* $>7^\circ$ dan $<1^\circ$ dan sudut *roll* $>3^\circ$ dan $<-3^\circ$.

Metode *sprawling up* yang diterapkan pada robot *quadruped* berhasil bekerja dengan baik. Robot mampu melewati kelima rintangan dataran tidak rata menggunakan metode *sprawling up* dan mampu menyelesaikan seluruh lintasan dengan baik, catatan durasi waktu rata-rata yang dibutuhkan oleh robot untuk menyelesaikan seluruh *misi* yaitu 37,6 detik.

Saran

Berdasarkan kesimpulan dari penelitian yang sudah dijelaskan, terdapat beberapa saran untuk peneliti selanjutnya agar penelitian ini dapat diperbaiki dan berkembang dengan hasil yang lebih maksimal. Penerapan metode *sprawling up* dapat dikembangkan menggunakan sistem kontrol lainnya. Metode pengambilan data dapat memanfaatkan fitur IoT yang dikoneksikan ke *smartphone* untuk mempermudah pengambilan dan pemantauan data *input* atau *output* dari sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- Kitano. Satoshi, Hirose. Shigeo, Horigome. Atsushi, dan Endo. Gen. 2016. *TITAN-XIII: Sprawling-Type Quadruped Robot With Ability Of Fast And Energy-Efficient Walking*. Robomech Journal, 3:8.
- Kusumoputro. Benyamin, Purnomo. Mauridhi Hery, Mozef. Eril, Rochardjo. Heru Santoso Budi, Prabowo. Gigih, Purwanto. Djoko, Pitowarno. Endra, Indrawanto, Mutijarsa. Kusprasapta, dan Muis. Abdul. 2021. *Petunjuk Pelaksanaan Kontes Robot Indonesia (KRI) Tahun 2021*. Buku Pedoman KRI 2021. Jakarta: Pusat Prestasi Nasional.
- Kusumoputro. Benyamin, Purnomo. Mauridhi Hery, Rochardjo. Heru Santoso Budi, Prabowo. Gigih, Purwanto. Djoko, Pitowarno. Endra, Mozef. Eril,

- Indrawanto, Mutijarsa. Kusprasapta, dan Muis. Abdul. 2023. *Buku Pedoman Kontes Robot Indonesia (KRI) Tahun 2023*. Buku Pedoman KRI 2023. Jakarta: Balai Pengembangan Talenta Indonesia.
- Natakusuma. Bagoes Prawira. 2018. *Aplikasi Sensor Inertia Measurement Unit (IMU) Untuk Memperbaiki Gerak Berjalan Lurus Pada Robot Quadruped*. Buku Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nasrudin. Ahmad Iqbal, Anam. Khairul, dan Negara. Mohamad Agung Prawira. 2019. *Evaluasi Invers Kinematics untuk Robot Quadruped Menggunakan Sensor Accelerometer*. Jurnal Rekayasa Elektrika, Vol. 15, No. 3.
- Prayogo. Rofiq Cahyo, Triwiyanto. Aris, dan Sumardi. 2018. *Perancangan Robot Berkaki 4 (Quadruped) Dengan Stabilization Algorithm Pada Uneven Floor Menggunakan 6-DoF IMU Berbasis Invers Kinematik*. Jurnal Transient, 544-551.
- Purnama. Hendril Satrian. 2017. *Implementasi PID Wall Following Pada Robot Hexapod Untuk Kontes Robot Pemadam Api Indonesia*. Buku Skripsi. Yogyakarta: Universitas Ahmad Dahlan.
- Rudy dan Lukas. 2017. *Pergerakan Jalan Stabil Robot Hexapod Di Atas Medan Yang Tidak Rata*. Jurnal Tesla, Vol. 19, No. 2.
- Tumbel. Bryan, Poekoel. Vecky C, dan Kambey. Feisy D. 2018. *Penerapan Algoritma Wall Following Pada Robot Quadruped Pemadam Api*. Jurnal Teknik Informatika, Vol. 13, No. 3.
- Wibowo. Wahyu Tri. 2017. *Implementasi Inverse Kinematics Pada Pergerakan Robot Quadruped*. Buku Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.