

Kontrol Navigasi Robot *Hexapod* berbasis *Inverse Kinematic* dan *Body Kinematic* untuk Stabilitas Optimal di Medan Ekstrem

Yovi Pratama^{1*}, Chindra Saputra², Afrizal Nehemia Toscani³, M. Irwan Bustami², Arahmad Taupiq¹

¹Fakultas Ilmu Komputer, Program Studi Teknik Informatika, Universitas Dinamika Bangsa, Kota Jambi, Indonesia

²Fakultas Ilmu Komputer, Program Studi Sistem Komputer, Universitas Dinamika Bangsa, Kota Jambi, Indonesia

³Fakultas Ilmu Komputer, Program Studi Sistem Informasi, Universitas Dinamika Bangsa, Kota Jambi, Indonesia

Email: ^{1,*}yovi.pratama@gmail.com, ²chindrasaputra@gmail.com, ³afrizalnehemia@gmail.com, ⁴irwan.sk05@gmail.com,

⁵arahmadtaupiq612@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: yovi.pratama@gmail.com

Submitted: 09/10/2024; Accepted: 25/12/2024; Published: 26/12/2024

Abstrak—Penelitian ini membahas penerapan *Inverse Kinematics* (IK), *Body Kinematics* (BK), dan *Kurva Bézier* pada robot *hexapod* untuk mengendalikan pergerakan kaki secara efisien dalam ruang tiga dimensi. IK digunakan untuk menghitung sudut sendi kaki berdasarkan posisi target yang diinginkan, sementara BK memungkinkan penyesuaian postur tubuh robot sehingga tetap stabil selama bergerak. Simulasi menunjukkan bahwa kedua pendekatan ini mampu menghasilkan pergerakan yang akurat dan terkontrol. Selain itu, Kurva Bézier diterapkan pada trajektori langkah kaki, yang secara signifikan meningkatkan kelancaran gerakan serta kestabilan robot selama bertransisi dari satu langkah ke langkah berikutnya. Pengujian robot *hexapod* yang berjalan sejauh 2,10 meter menunjukkan keberhasilan pada 70% percobaan dengan rata-rata kesalahan sebesar 4,2 cm. Pengujian selanjutnya terhadap stabilitas robot saat mengalami kemiringan sumbu X didapatkan bahwa robot mampu menyesuaikan diri pada kemiringan hingga 35 derajat, namun pada kemiringan lebih dari 35 derajat, robot tidak mampu menjaga keseimbangan. Berdasarkan hasil yang didapatkan dapat disimpulkan bahwa kombinasi metode IK, BK, dan Kurva Bézier secara efektif mendukung pergerakan robot *hexapod* dengan akurasi langkah yang baik pada angka 70% dan stabilitas yang tinggi ketika menyesuaikan diri pada kemiringan sampai 35 derajat. Peningkatan stabilitas pada medan yang lebih ekstrem serta perbaikan kinerja dalam lingkungan yang lebih beragam menjadi fokus utama dalam upaya memaksimalkan kemampuan robot *hexapod*.

Kata Kunci: Robot; Hexapod; Navigasi; Inverse Kinematics; Body Kinematics; Kurva Bézier

Abstract—This study discusses the application of Inverse Kinematics (IK), Body Kinematics (BK), and Bézier Curves in a hexapod robot to efficiently control leg movements in a three-dimensional space. IK is used to calculate joint angles based on the desired target position, while BK enables adjustments to the robot's body posture to maintain stability during movement. Simulations demonstrate that these two approaches can produce accurate and controlled movements. Additionally, Bézier Curves are applied to the foot trajectory, significantly enhancing the smoothness of movements and the robot's stability during transitions from one step to the next. Testing the hexapod robot over a distance of 2.10 meters showed a 70% success rate with an average error of 4.2 cm. Further testing of the robot's stability on an inclined X-axis revealed that the robot could adapt to inclines up to 35 degrees; however, at inclines exceeding 35 degrees, the robot was unable to maintain balance. Based on the results, it can be concluded that the combination of IK, BK, and Bézier Curves effectively supports the hexapod robot's movement with a step accuracy of 70% and high stability when adapting to inclines up to 35 degrees. Improving stability in more extreme terrains and enhancing performance in more diverse environments are the primary focuses for maximizing the hexapod robot's capabilities.

Keywords: Robot; Hexapod; Navigation; Inverse Kinematics; Body Kinematics; Bézier Curve

1. PENDAHULUAN

Dalam era modern ini, teknologi robotika telah mengalami perkembangan pesat dan memiliki peran penting dalam berbagai sektor, salah satunya dalam aplikasi pencarian dan penyelamatan (*Search and Rescue*, SAR). Kontes Robot SAR Indonesia (KRSRI) merupakan salah satu ajang kompetisi yang menantang inovasi robotika, terutama dalam pengembangan robot berkaki seperti *hexapod*. Robot ini dirancang untuk menjelajahi arena labirin dengan berbagai rintangan yang merepresentasikan kondisi bencana, seperti bangunan yang runtuh atau lingkungan yang tidak teratur. *Hexapod* memiliki enam kaki, yang secara teoritis memberikan stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan robot beroda, terutama di medan yang tidak rata. Namun, salah satu masalah utama yang dihadapi dalam penerapan robot *hexapod* dalam situasi nyata adalah kontrol pergerakannya yang kurang dinamis dan adaptif. Sebagian besar robot *hexapod* saat ini masih bergantung pada kontrol manual melalui perangkat lunak standar. Pendekatan ini membatasi kemampuan robot untuk beradaptasi secara cepat dan efisien terhadap perubahan kondisi medan yang tidak menentu [1][2][3].

Tantangan utama dalam navigasi robot *hexapod* adalah bagaimana membuat robot bergerak dengan lebih responsif, dinamis, dan efisien, terutama di lingkungan yang kompleks seperti arena kompetisi KRSRI atau situasi

bencana yang sesungguhnya. Kondisi yang terus berubah memerlukan sistem kontrol yang lebih canggih agar robot mampu menavigasi medan secara mandiri. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah tersebut dengan menerapkan metode *inverse kinematics* dan *body kinematics* pada sistem kontrol robot *hexapod*. Metode *inverse kinematics* digunakan untuk menentukan posisi kaki robot berdasarkan tujuan yang ingin dicapai, sementara *body kinematics* akan mengoordinasikan gerakan seluruh kaki dan tubuh robot agar tetap seimbang dan efisien. Dengan kombinasi kedua metode ini, robot diharapkan dapat bergerak dengan lebih fleksibel, efisien, dan mampu menghadapi berbagai kondisi lapangan yang tidak terduga [4][5][6].

Solusi yang ditawarkan melalui penerapan metode *inverse kinematics* dan *body kinematics* ini diharapkan dapat memberikan peningkatan yang signifikan dalam hal kontrol navigasi robot *hexapod*. Pada sistem kontrol tradisional, robot *hexapod* menggerakkan setiap kaki secara bergantian tanpa memperhitungkan dinamika medan secara real-time. Namun, dengan penerapan metode *inverse kinematics*, robot dapat secara otomatis menghitung posisi optimal dari setiap kaki untuk mencapai titik tertentu di medan yang kompleks. Sementara itu, *body kinematics* berperan penting dalam memastikan keseimbangan robot tetap terjaga selama pergerakan, sehingga robot tidak mudah terguling saat bergerak di medan yang curam atau berbatu. Kombinasi kedua metode ini diharapkan mampu meningkatkan fleksibilitas gerakan robot *hexapod*, mengurangi kesalahan pergerakan, dan mempercepat waktu respon terhadap perubahan kondisi lingkungan [4][5].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pengembangan robot berkaki, khususnya robot *hexapod*, dalam konteks pencarian dan penyelamatan. Misalnya, penelitian oleh Baldemir et al. [1] mengembangkan robot mobile yang dirancang untuk operasi pencarian dan penyelamatan di area reruntuhan. Meskipun robot tersebut menggunakan sistem roda, penelitian ini memberikan wawasan penting terkait kebutuhan robot yang mampu beradaptasi dengan medan yang penuh rintangan, seperti dalam misi SAR [1]. Penelitian lain oleh Sun et al [4] mengeksplorasi kontrol trotting tripod dinamis pada robot *hexapod* berukuran pony untuk misi penyelamatan bencana. Penelitian ini menunjukkan bahwa *hexapod* memiliki potensi besar untuk digunakan dalam situasi darurat, terutama karena stabilitas dan kemampuan bergerakinya di medan yang sulit [4].

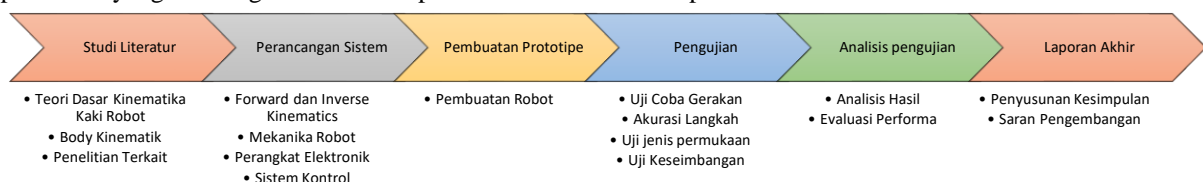
Penelitian oleh Zhang et al. [5] berfokus pada pengembangan kontrol posisi dan postur robot berkaki multikaki dengan memanfaatkan koreksi kinematik. Pendekatan ini relevan dengan penerapan metode *inverse kinematics* yang diusulkan dalam penelitian ini, terutama dalam konteks peningkatan efisiensi gerakan robot [5]. Selain itu, penelitian oleh Pillai dan Suthakorn [2] menyoroti tantangan yang dihadapi dalam pengembangan sistem kontrol robot penyelamat di medan yang kasar dan tidak teratur. Penelitian mereka menunjukkan pentingnya pengembangan metode kontrol yang lebih kompleks dan adaptif, seperti *inverse kinematics* dan *body kinematics*, yang dapat meningkatkan kinerja robot di medan yang penuh rintangan [2]. Megalingam et al. [7] dalam penelitiannya mengenai kontrol multimode pada robotik juga memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem kontrol yang lebih canggih untuk robot berkaki [7].

Berdasarkan analisis terhadap penelitian-penelitian terdahulu, terlihat bahwa masih terdapat celah (gap analysis) dalam hal integrasi metode *inverse kinematics* dan *body kinematics* untuk meningkatkan performa navigasi robot *hexapod*. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada salah satu aspek, seperti stabilitas atau efisiensi energi, namun belum menggabungkan keduanya secara komprehensif untuk menciptakan sistem kontrol yang dinamis, fleksibel, dan adaptif. Inilah yang menjadi fokus utama dari penelitian ini, yaitu mengisi celah tersebut dengan mengembangkan sistem kontrol yang lebih efisien dan adaptif, yang dapat meningkatkan performa robot *hexapod* dalam situasi pencarian dan penyelamatan di medan yang kompleks.

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode *inverse kinematics* dan *body kinematics* pada robot *hexapod* guna meningkatkan kemampuan navigasi dan kontrol gerakan robot. Dengan menerapkan kedua metode ini, diharapkan robot *hexapod* dapat bergerak dengan lebih responsif, lincah, dan mampu beradaptasi dengan berbagai kondisi medan yang tidak terduga. Harapan dari penelitian ini adalah untuk memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi robotika, khususnya dalam konteks pencarian dan penyelamatan. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas robot dalam misi-misi SAR, yang pada akhirnya dapat menyelamatkan lebih banyak nyawa di lapangan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk menjamin bahwa penelitian ini dapat dilaksanakan dan tujuan dari penelitian ini dapat dicapai, disusun kerangka penelitian yang sistematis dan terstruktur. Kerangka penelitian ini mencakup beberapa tahap penting yang akan dilaksanakan secara berurutan, dimulai dari studi literatur hingga evaluasi dan penyusunan laporan. Tahapan penelitian yang akan digunakan dalam penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.1 Studi Literatur

Tahap awal yang krusial dalam penelitian ini adalah melakukan studi literatur yang mendalam mengenai teori dasar kinematika kaki dan *body kinematics* pada robot *hexapod*. Penelitian ini akan mencakup analisis terhadap teknologi yang sudah ada, serta mempelajari penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya. Dengan memahami literatur yang ada, peneliti dapat mengidentifikasi kekurangan dan kelebihan dari sistem yang telah ada, serta merumuskan pendekatan yang lebih inovatif dalam pengembangan sistem kinematika dan *body kinematics* pada robot *hexapod* [8][9][10].

2.2 Perancangan Sistem

Setelah studi literatur, langkah selanjutnya adalah perancangan sistem kinematika kaki dan *body kinematics* pada setiap kaki robot *hexapod*. Proses perancangan ini meliputi beberapa aspek, yaitu:

- Perancangan Mekanik: Mendesain struktur mekanik kaki robot yang mampu mendukung pergerakan yang stabil dan efisien di berbagai jenis permukaan.
- Perancangan Elektronik: Mengembangkan rangkaian elektronik yang diperlukan untuk mengontrol aktuator dan sensor yang digunakan dalam robot.
- Sistem Kontrol: Merancang algoritma kontrol yang akan mengatur gerakan robot berdasarkan input dari sensor dan tujuan navigasi yang ditetapkan [9][11].

2.3 Pembuatan Prototipe

Setelah sistem kinematika dan *body kinematics* dirancang dengan detail, tahap berikutnya adalah pembuatan prototipe robot *hexapod*. Prototipe ini akan menjadi langkah penting dalam menguji hasil dari perancangan sistem, serta melihat bagaimana teori dan simulasi yang telah dilakukan dapat diterapkan pada perangkat fisik. Pada proses ini, prototipe akan dilengkapi dengan semua sistem yang telah dirancang, termasuk mekanisme *inverse kinematics* untuk mengendalikan sudut sendi kaki dan *body kinematics* untuk menjaga stabilitas tubuh robot selama bergerak di berbagai kondisi medan.

Tahap pembuatan ini dimulai dengan pemilihan material yang tepat. Material yang digunakan harus memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban dari seluruh struktur robot dan komponennya, namun tetap ringan agar tidak membebani motor dan sistem penggerak. Biasanya, bahan seperti aluminium, serat karbon, atau plastik yang diperkuat digunakan dalam konstruksi robot karena karakteristik tersebut. Pemilihan material ini sangat penting untuk memastikan bahwa robot tidak hanya mampu bergerak dengan efisien tetapi juga tahan terhadap beban dan tekanan selama penggunaan.

Selanjutnya, proses ini melibatkan integrasi semua komponen mekanik, seperti motor servo, sambungan kaki, dan rangka tubuh, serta komponen elektronik, termasuk mikroprosesor, sensor, dan aktuator. Integrasi ini harus dilakukan dengan cermat agar semua bagian robot bekerja secara harmonis. Setiap komponen harus terpasang dengan presisi, sehingga tidak ada kesalahan pada gerakan kaki, yang dapat mempengaruhi stabilitas dan akurasi pergerakan robot. Seluruh proses ini akan menghasilkan sebuah prototipe yang tidak hanya mampu bergerak, tetapi juga bisa diuji untuk melakukan tugas-tugas yang lebih kompleks sesuai dengan tujuan penelitian. [12].

2.4 Pengujian

Setelah prototipe selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap robot *hexapod*. Pengujian ini akan mencakup:

- Uji Coba Gerakan: Menguji kemampuan robot untuk bergerak di berbagai jenis permukaan, baik yang rata maupun yang tidak rata.
- Uji Keseimbangan: Menguji kemampuan robot untuk menjaga keseimbangan saat bergerak, terutama pada permukaan yang miring atau tidak stabil [13].
- Uji Akurasi Gerakan: Mengukur seberapa akurat robot dapat mencapai titik tujuan yang ditetapkan berdasarkan perhitungan kinematika yang telah dilakukan [14].

2.5 Analisis Data

Setelah pengujian dilakukan, langkah selanjutnya adalah analisis data dari hasil pengujian. Data yang diperoleh akan dievaluasi untuk menilai performa sistem kinematika kaki dan *body kinematics* yang telah dikembangkan. Analisis ini akan mencakup perbandingan antara hasil yang diharapkan dengan hasil yang diperoleh, serta identifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja robot [15].

2.7 Evaluasi dan Penyusunan Laporan

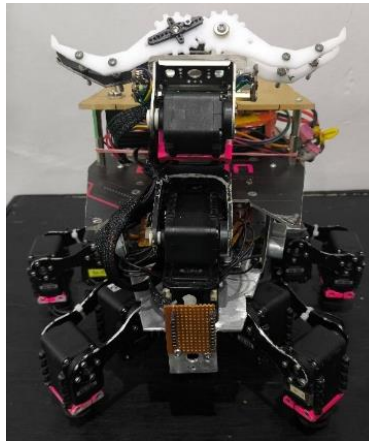
Tahap terakhir dalam metodologi ini adalah evaluasi terhadap hasil pengujian dan analisis data. Hasil evaluasi ini akan digunakan untuk menyusun kesimpulan dan saran untuk pengembangan sistem kinematika kaki dan *body kinematics* pada robot *hexapod*. Laporan akhir akan mencakup semua temuan, analisis, dan rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut di bidang ini [16].

Metodologi yang terstruktur ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi robotika, khususnya dalam konteks robot *hexapod* untuk aplikasi pencarian dan penyelamatan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Robot *Hexapod*

Sesuai dengan namanya, *hexapod* robot adalah jenis robot yang bergerak menggunakan enam kaki [17]. Keunikan dari desain ini terletak pada kemampuannya untuk mempertahankan stabilitas meskipun hanya menggunakan tiga kaki pada satu waktu. Hal ini memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan robot berkaki empat atau dua, karena jika salah satu kaki tidak berfungsi, robot masih dapat berjalan dengan menggunakan kaki lainnya [18]. Dengan demikian, robot *hexapod* memiliki keunggulan dalam hal fault tolerance, yang memungkinkan robot untuk beroperasi dalam kondisi yang tidak ideal, seperti saat salah satu kaki terhalang atau rusak. Gambaran bentuk fisik dari *hexapod* bisa dilihat pada Gambar 2, dimana robot terdiri dari 6 kaki, dan memiliki 1 lengan yang berguna untuk pengambilan korban.



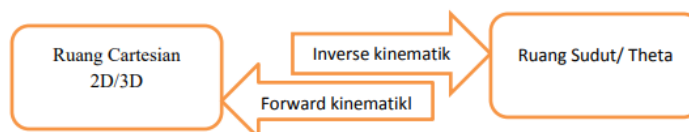
Gambar 2. Bentuk Fisik robot *Hexapod*

Robot berkaki enam seperti pada gambar 2 dirancang sedemikian rupa agar dapat bergerak dengan leluasa, berkat bentuk kaki yang mendukung pergerakan dan pencarian pijakan baru saat berjalan. Kelebihan utama dari robot *hexapod* dibandingkan dengan robot lainnya adalah kemampuannya untuk berjalan di permukaan yang tidak rata, yang sering kali menjadi tantangan bagi robot dengan desain yang lebih sederhana [19]. Dalam konteks ini, robot *hexapod* dapat beradaptasi dengan berbagai jenis medan, termasuk tanah berbatu, lumpur, dan permukaan miring, yang menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi di lingkungan yang sulit, seperti misi pencarian dan penyelamatan [20].

Pengaturan yang tepat pada kombinasi gerakan di setiap sendi diperlukan agar robot *hexapod* dapat bergerak secara efektif. Pengaturan ini melibatkan perhitungan kinematika yang kompleks untuk memastikan bahwa setiap kaki dapat berpindah tempat dengan efisien dan stabil [21]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan kinematika yang lebih baik dapat meningkatkan kemampuan robot dalam menavigasi medan yang tidak rata, serta meningkatkan stabilitas dan efisiensi gerakan [22]. Selain itu, pengembangan algoritma kontrol yang lebih canggih juga berkontribusi pada peningkatan performa robot *hexapod*, memungkinkan robot untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan kondisi medan [23].

3.2 *Inverse Kinematics*

Pada robot *hexapod*, *inverse kinematics* digunakan untuk menghitung sudut sendi yang diperlukan agar kaki mencapai posisi tertentu di ruang 3D seperti yang terlihat pada ilustrasi Gambar 3. Model *inverse kinematic* bergantung pada struktur mekanik robot, terutama panjang segmen kaki dan posisi sendi. *Hexapod* dengan tiga sendi pada setiap kaki (pangkal, lutut, dan pergelangan) menggunakan rumus *inverse kinematics* yang diturunkan dari persamaan geometris berdasarkan panjang segmen kaki.



Gambar 3. Model Kontrol Kinematik Robot

Kaki *hexapod* terdiri dari tiga segmen:

L_1 : panjang segmen dari pangkal kaki ke sendi lutut

L_2 : panjang segmen dari lutut ke sendi pergelangan

L_2 : panjang segmen dari pergelangan ke kaki

Posisi target kaki dalam koordinat Cartesian adalah (x, y, z) . Sudut-sudut sendi yang perlu dihitung adalah:

θ_1 : sudut pada pangkal kaki (rotasi horisontal)

θ_2 : sudut lutut

θ_3 : sudut pergelangan

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung *inverse kinematics*:

Sudut θ_1 (pangkal kaki):

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

Sudut θ_2 (lutut): Menggunakan aturan kosinus untuk menghitung sudut lutut menggunakan persamaan (2) – (4):

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

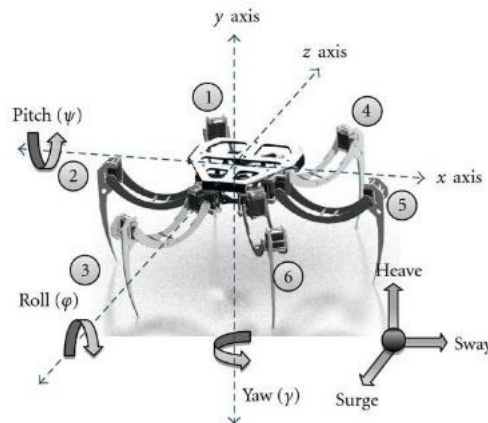
$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + d^2 - L_2^2}{2L_1d} \right) \quad (3)$$

Sudut θ_3 (pergelangan):

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - d^2}{2L_1L_2} \right) \quad (4)$$

3.3 Body Kinematics

Body kinematics pada *hexapod* digunakan untuk menghitung transformasi posisi tubuh robot berdasarkan gerakan masing-masing kaki. *Hexapod* menggunakan model 6 kaki yang mendukung tubuhnya, di mana setiap kaki berperan dalam menjaga keseimbangan dan stabilitas robot. Untuk *body kinematics*, sering digunakan transformasi matriks untuk menghitung posisi tubuh di ruang 3D. Transformasi ini termasuk translasi dan rotasi pada 3 sumbu yaitu x, y dan z seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Sumbu rotasi x, y, dan z [24]

Jika tubuh *hexapod* berada dalam posisi (x, y, z) dan mengalami rotasi α (*roll*), β (*pitch*), dan γ (*yaw*), maka transformasi posisi setiap kaki dihitung menggunakan matriks rotasi seperti pada persamaan (5)-(7).

a. Rotasi *Roll* (α) pada sumbu x :

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (5)$$

b. Rotasi *Pitch* (α) pada sumbu y :

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

c. Rotasi *Yaw* (α) pada sumbu z :

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & \sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Untuk mendapatkan posisi akhir tubuh atau kaki setelah rotasi dan translasi, digunakan kombinasi dari rotasi pada tiga sumbu dan translasi (x, y, z) . Kombinasi ini dihitung menggunakan persamaan (8) sebagai berikut:

$$P_{final} = T \cdot R_z(\gamma) \cdot R_y(\beta) \cdot R_x(\alpha) \cdot P_{initial} \quad (8)$$

Dimana :

T adalah vektor translasi

$P_{initial}$ adalah posisi awal kaki atau tubuh

3.4 Trajektori Kaki menggunakan Kurva Bézier

Kurva Bézier adalah kurva parametrik yang didefinisikan oleh beberapa titik kontrol. Dalam robotika, sering digunakan kurva Bézier kuadrat (3 titik kontrol) atau kurva Bézier kubik (4 titik kontrol) untuk mengendalikan gerakan langkah kaki.

Kurva Bézier kubik didefinisikan oleh empat titik kontrol $P_0, P_1, P_2,$ dan P_3 , di mana P_0 adalah titik awal, P_3 adalah titik akhir, dan P_1 dan P_2 mengontrol bentuk kurva. Rumus kurva bezier adalah seperti ditunjukkan pada persamaan (9):

$$B(t) = (1 - t)^3 P_0 + 3(1 - t)^2 t P_1 + 3(1 - t) t^2 P_2 + t^3 P_3 \tag{9}$$

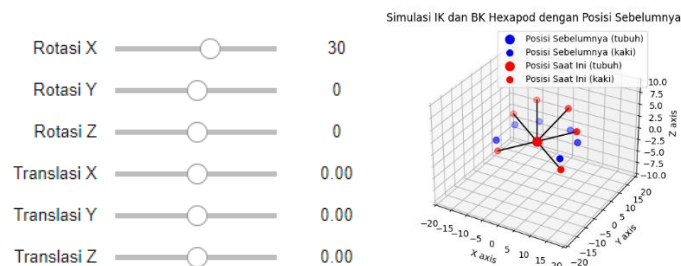
Dimana t adalah parameter yang bervariasi dari 0 hingga 1, menentukan posisi sepanjang kurva.

3.5 Simulasi Algoritma

3.5.1 Simulasi Inverse Kinematics dan Body Kinematics

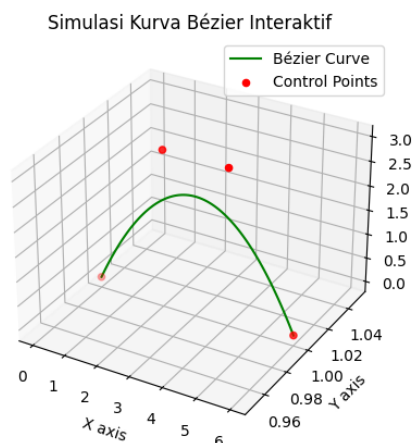
Hasil simulasi *Inverse Kinematics* dan *Body Kinematics* pada robot *hexapod* dengan visualisasi posisi kaki robot sebelum dan sesudah dilakukan rotasi bisa dilihat pada Gambar 5 menunjukkan. Pada Gambar 5, visualisasi memperlihatkan posisi kaki robot *hexapod* dalam keadaan normal, di mana keenam kakinya berada dalam posisi seimbang, mendukung tubuh robot secara simetris di atas permukaan ditandai dengan titik berwarna biru. Posisi ini merupakan konfigurasi default sebelum transformasi dilakukan.

Sementara itu, bagian titik berwarna merah merupakan tampilan perubahan posisi kaki robot setelah dilakukan rotasi sebesar 30 derajat pada sumbu X. Rotasi ini mempengaruhi orientasi tubuh robot, sehingga mengubah distribusi posisi kaki-kaki robot untuk menyesuaikan keseimbangan. Hasil dari rotasi ini mengilustrasikan bagaimana algoritma kinematika tubuh (*Body Kinematics*) dan kinematika invers (*Inverse Kinematics*) bekerja secara harmonis untuk menghitung sudut-sudut sendi yang tepat, agar robot tetap stabil meskipun tubuhnya mengalami perubahan orientasi.



Gambar 5. Simulasi *Inverse Kinematics* dan *Body Kinematics* dengan visualisasi *hexapod* (a) Posisi Kaki Robot Normal (b) Posisi kaki robot setelah dilakukan rotasi X sebesar 30°

3.5.2 Simulasi Trajektori kaki



Gambar 6. Simulasi Trajektori kaki saat melakukan Langkah dalam ruang 3 dimensi

Simulasi trajektori kaki robot *hexapod* saat melakukan langkah dalam ruang 3 dimensi dapat dilihat pada gambar 6. Pada visualisasi ini, jalur gerakan kaki diilustrasikan dengan jelas, memperlihatkan bagaimana kaki-kaki robot bergerak dari posisi awal hingga mencapai posisi akhir di setiap langkahnya. Trajektori ini dihitung



menggunakan kombinasi algoritma *inverse kinematics* dan kurva Bézier, yang memastikan bahwa gerakan kaki berlangsung secara halus dan presisi.

Gerakan kaki dalam ruang 3 dimensi melibatkan perubahan koordinat pada sumbu X, Y, dan Z, yang memungkinkan robot untuk bergerak maju, mundur, atau berbelok sesuai kebutuhan. Simulasi ini juga memperlihatkan bagaimana setiap langkah kaki diatur secara berurutan agar tetap menjaga keseimbangan tubuh robot, terutama saat beberapa kaki berada di udara selama fase langkah. Trajektori ini menggambarkan efisiensi pengaturan kinematika robot *hexapod* dalam lingkungan dinamis.

3.6 Implementasi dan Pengujian

3.6.1 Implementasi *Inverse Kinematics* dan *Body Kinematics*

Pseudo Code Inverse Kinematics dan Body Kinematics

```

FUNCTION InverseKinematics(x, y, z, L1, L2, L3):
    # Step 1: Hitung sudut pada pangkal kaki (rotasi horisontal)
    θ1 = arctan(y / x)

    # Step 2: Hitung jarak dari pangkal ke target posisi kaki
    d = sqrt(x^2 + y^2 + z^2)

    # Step 3: Hitung sudut lutut menggunakan aturan kosinus
    θ2 = arccos((L1^2 + d^2 - L2^2) / (2 * L1 * d))

    # Step 4: Hitung sudut pergelangan menggunakan aturan kosinus
    θ3 = arccos((L1^2 + L2^2 - d^2) / (2 * L1 * L2))

    RETURN θ1, θ2, θ3
END FUNCTION
    
```

Tabel 1. Pseudo Code untuk *Inverse Kinematics* pada Robot *Hexapod*

| Langkah | Pseudo Code | Deskripsi |
|---------|--|--|
| 1 | FUNCTION InverseKinematics(x, y, z, L1, L2, L3): | Mendefinisikan fungsi <i>Inverse Kinematics</i> dengan input posisi target (x, y, z) dan panjang segmen kaki L1, L2, L3. |
| 2 | θ1 = arctan(y / x) | Menghitung sudut θ1 pada pangkal kaki (rotasi horisontal) berdasarkan posisi target kaki pada sumbu X dan Y. |
| 3 | d = sqrt(x^2 + y^2 + z^2) | Menghitung jarak d dari pangkal kaki ke target posisi di ruang 3D. |
| 4 | θ2 = arccos((L1^2 + d^2 - L2^2) / (2 * L1 * d)) | Menghitung sudut θ2 pada sendi lutut menggunakan aturan cosinus berdasarkan panjang segmen dan jarak d. |
| 5 | θ3 = arccos((L1^2 + L2^2 - d^2) / (2 * L1 * L2)) | Menghitung sudut θ3 pada pergelangan kaki menggunakan aturan cosinus. |
| 6 | RETURN θ1, θ2, θ3 | Mengembalikan nilai sudut θ1, θ2, dan θ3 sebagai hasil dari <i>Inverse Kinematics</i> . |
| 7 | END FUNCTION | Akhir dari fungsi <i>Inverse Kinematics</i> . |

Tabel 1 menampilkan pseudo code yang digunakan untuk menghitung sudut-sudut sendi pada robot *hexapod* menggunakan metode *Inverse Kinematics*. Fungsi ini menerima input berupa posisi target kaki dalam koordinat 3D (x, y, z) serta panjang segmen kaki L1, L2, dan L3.

Langkah pertama adalah menghitung sudut rotasi horisontal θ1 pada pangkal kaki dengan menggunakan fungsi arctan untuk membandingkan posisi x dan y. Setelah itu, jarak dari pangkal kaki ke posisi target, yang dilambangkan dengan d, dihitung menggunakan rumus Euclidean distance dalam ruang 3D.

Selanjutnya, sudut pada lutut θ2 dihitung dengan menggunakan aturan cosinus, yang melibatkan panjang segmen kaki dan jarak d. Hal yang sama dilakukan untuk menghitung sudut pergelangan θ3. Akhirnya, fungsi ini mengembalikan ketiga sudut tersebut (θ1, θ2, θ3), yang diperlukan untuk menggerakkan kaki robot ke posisi target dengan tepat.

```

FUNCTION BodyKinematics(x, y, z, α, β, γ):
    # Step 1: Matriks rotasi untuk roll (α) pada sumbu x
    Rx = [1, 0, 0;
          0, cos(α), -sin(α);
          0, sin(α), cos(α)];
    
```

```

0, sin(α), cos(α)]

# Step 2: Matriks rotasi untuk pitch (β) pada sumbu y
Ry = [cos(β), 0, sin(β);
      0, 1, 0;
      -sin(β), 0, cos(β)]

# Step 3: Matriks rotasi untuk yaw (γ) pada sumbu z
Rz = [cos(γ), -sin(γ), 0;
      sin(γ), cos(γ), 0;
      0, 0, 1]

# Step 4: Kombinasikan semua matriks rotasi
R = Rz * Ry * Rx

# Step 5: Lakukan translasi (x, y, z) dan rotasi pada posisi kaki awal
P_final = T * R * P_initial

RETURN P_final
END FUNCTION
    
```

Tabel 2. Pseudo Code untuk *Body Kinematics* pada Robot *Hexapod*

| Langkah | Pseudo Code | Deskripsi |
|---------|---|---|
| 1 | FUNCTION BodyKinematics(x, y, z, α, β, γ): | Mendefinisikan fungsi <i>Body Kinematics</i> dengan input posisi tubuh (x, y, z) dan sudut rotasi α (roll), β (pitch), γ (yaw). |
| 2 | Rx = [1, 0, 0; 0, cos(α), -sin(α); 0, sin(α), cos(α)] | Menghitung matriks rotasi Rx untuk rotasi roll (α) pada sumbu X. |
| 3 | Ry = [cos(β), 0, sin(β); 0, 1, 0; -sin(β), 0, cos(β)] | Menghitung matriks rotasi Ry untuk rotasi pitch (β) pada sumbu Y. |
| 4 | Rz = [cos(γ), -sin(γ), 0; sin(γ), cos(γ), 0; 0, 0, 1] | Menghitung matriks rotasi Rz untuk rotasi yaw (γ) pada sumbu Z. |
| 5 | R = Rz * Ry * Rx | Menggabungkan semua matriks rotasi untuk mendapatkan rotasi total. |
| 6 | P_final = T * R * P_initial | Menghitung posisi akhir kaki setelah transformasi menggunakan translasi T dan rotasi R. |
| 7 | RETURN P_final | Mengembalikan posisi kaki setelah dilakukan rotasi dan translasi. |
| 8 | END FUNCTION | Akhir dari fungsi <i>Body Kinematics</i> . |

Tabel 2 menunjukkan pseudo code yang digunakan untuk menghitung transformasi posisi tubuh robot *hexapod* menggunakan metode *Body Kinematics*. Fungsi ini menerima input berupa posisi tubuh robot dalam koordinat (x, y, z) serta sudut rotasi α (roll), β (pitch), dan γ (yaw) yang menentukan orientasi tubuh robot.

Langkah pertama adalah menghitung matriks rotasi untuk masing-masing sumbu, yaitu sumbu X untuk rotasi roll (Rx), sumbu Y untuk rotasi pitch (Ry), dan sumbu Z untuk rotasi yaw (Rz). Matriks-matriks ini dihitung menggunakan fungsi trigonometri berdasarkan sudut rotasi yang diberikan. Setelah semua matriks rotasi dihitung, langkah selanjutnya adalah menggabungkan rotasi pada ketiga sumbu untuk mendapatkan rotasi total.

Posisi akhir kaki-kaki robot dihitung dengan mengalikan vektor translasi (T) dan matriks rotasi gabungan (R) dengan posisi awal (P_initial). Hasil akhir adalah posisi baru kaki robot setelah transformasi. Fungsi ini kemudian mengembalikan posisi kaki yang telah diperbarui, yang menunjukkan bagaimana tubuh robot berinteraksi dengan kakinya untuk menjaga keseimbangan dan bergerak secara efektif dalam ruang 3 dimensi.

3.6.2 Pengujian

a. Pengujian langkah kaki (Trajektori dan *Inverse Kinematics*)

Tabel 3. Hasil Pengujian Langkah *Hexapod*

| Percobaan | Jarak Aktual | Jarak Tempuh (meter) | Selisih Error (cm) | Selisih absolut (cm) |
|-----------|--------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 2.1 | 2.07 | -3 | 3 |
| 2 | 2.1 | 2.13 | 3 | 3 |
| 3 | 2.1 | 2.15 | 5 | 5 |
| 4 | 2.1 | 2.14 | 4 | 4 |
| 5 | 2.1 | 2.08 | -2 | 2 |
| 6 | 2.1 | 2.16 | 6 | 6 |

| Percobaan | Jarak Aktual | Jarak Tempuh (meter) | Selisih Error (cm) | Selisih absolut (cm) |
|-----------|--------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 7 | 2.1 | 2.01 | -9 | 9 |
| 8 | 2.1 | 2.12 | 2 | 2 |
| 9 | 2.1 | 2.09 | -1 | 1 |
| 10 | 2.1 | 2.17 | 7 | 7 |

Tabel 3 menampilkan hasil pengujian robot *hexapod* saat berjalan sejauh 2,10 meter dalam 10 kali percobaan. Dari hasil pengujian ini, ada variasi kecil dalam jarak yang ditempuh oleh robot, dengan selisih error yang bervariasi. Terdapat 7 percobaan yang menunjukkan selisih error sebesar $\pm 2-5$ cm, sementara 3 percobaan lainnya memiliki selisih yang lebih besar, yaitu $\pm 5-10$ cm.

Pengujian ini memperlihatkan bahwa robot umumnya dapat berjalan dengan akurasi yang baik, di mana mayoritas percobaan menghasilkan error yang relatif kecil dalam rentang $\pm 2-5$ cm. Namun, pada beberapa percobaan, robot mengalami deviasi yang lebih besar, dengan error hingga ± 10 cm, menunjukkan bahwa ada variabel tertentu yang dapat memengaruhi kinerja langkah robot *hexapod*.

Akurasi Pengujian:

Akurasi dihitung sebagai persentase percobaan yang berada dalam rentang error terkecil ($\pm 2-5$ cm).

$$Akurasi = \left(\frac{\text{Jumlah percobaan dalam rentang } \pm 2-5 \text{ cm}}{\text{Total Percobaan}} \right) \times 100\%$$

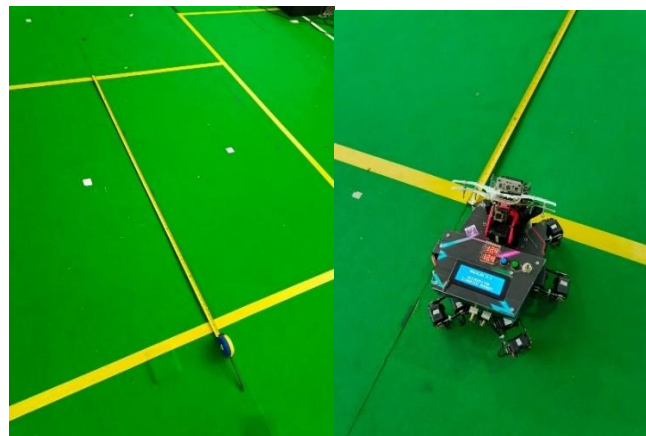
$$Akurasi = \left(\frac{7}{10} \right) \times 100\% = 70\%$$

Rata-rata Error:

Rata-rata error dihitung dengan mengambil nilai rata-rata dari semua selisih error.

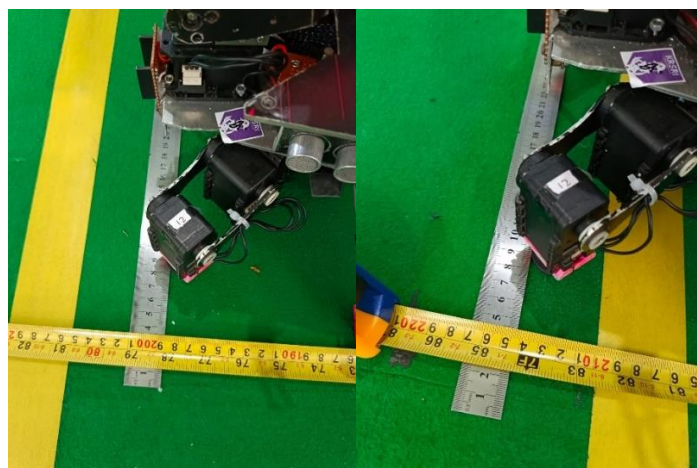
$$\text{Rata - rata Error} = \frac{\sum \text{Selisih absolut Error}}{\text{Total percobaan}}$$

$$\text{Rata - rata Error} = \frac{(3+3+5+4+2+6+9+2+1+7)}{10} = \frac{42}{10} = 4.2 \text{ cm}$$



(a)

(b)



(c)

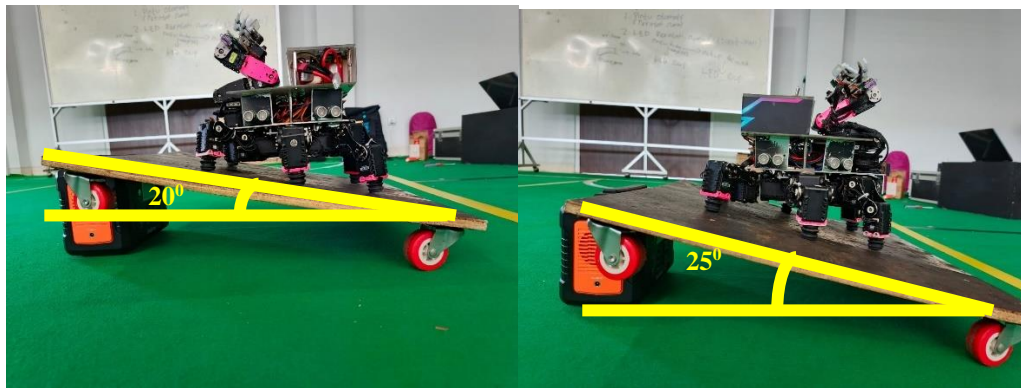
(d)

Gambar 7. Eksperimen pengujian Langkah robot (Inverse kinematic dan Kurva Bézier)

Gambar 7 menunjukkan eksperimen pengujian langkah robot *hexapod* dengan menggunakan dua metode utama, yaitu Inverse Kinematic dan Kurva Bézier. Gambar 7.a menunjukkan jarak pengukuran langkah robot sejauh 2.1 meter dari *start* (garis kuning) dan *finish* (garis kuning), gambar 7.b menunjukkan robot bersiap jalan, gambar 7.c dan 7.d merupakan sampel dari pengujian ketepatan langkah sejauh 2.01 m dan 2.17m. Inverse Kinematic digunakan untuk menghitung sudut-sudut sendi pada masing-masing kaki robot sehingga dapat mencapai posisi yang ditargetkan dalam ruang 3D, sementara Kurva Bézier digunakan untuk merancang trajektori langkah yang halus dan optimal.

Eksperimen ini juga mengilustrasikan bagaimana kedua metode tersebut saling melengkapi untuk mencapai gerakan yang akurat dan halus pada robot *hexapod*. Hasil visualisasi menunjukkan trajektori kaki robot yang mengikuti pola gerakan yang telah dioptimalkan melalui Kurva Bézier dan perhitungan Inverse Kinematic, sehingga menghasilkan langkah yang lebih stabil dan presisi dalam setiap gerakan.

b. Pengujian *Body Kinematics*



Gambar 8. Pengujian *Body Kinematics* menggunakan variasi sudut kemiringan axis X

Gambar 8 menunjukkan sampel pengujian untuk kemiringan 20 derajat dan kemiringan 25 derajat, dapat terlihat robot masih mampu menyesuaikan diri. Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian *body kinematics* pada robot *hexapod* ketika tubuhnya dimiringkan pada sumbu X dengan sudut mulai dari 10 hingga 45 derajat. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati kemampuan robot dalam menyesuaikan keseimbangan tubuhnya ketika dimiringkan.

Tabel 4. Tabel pengujian *Body Kinematics*

| Sudut Kemiringan (derajat) | Hasil |
|----------------------------|-------------------|
| 10 | Bisa menyesuaikan |
| 15 | Bisa menyesuaikan |
| 20 | Bisa menyesuaikan |
| 25 | Bisa menyesuaikan |
| 30 | Bisa menyesuaikan |
| 35 | Bisa menyesuaikan |
| 40 | Tidak |
| 45 | Tidak |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot *hexapod* mampu menyesuaikan diri dan menjaga keseimbangan tubuh pada kemiringan sumbu X hingga sudut 35 derajat. Pada sudut kemiringan 10 hingga 35 derajat, robot dapat beradaptasi dengan baik dan menjaga stabilitasnya, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil "Bisa menyesuaikan". Namun, ketika kemiringan ditingkatkan ke 40 derajat dan 45 derajat, robot tidak dapat menyesuaikan diri, yang ditunjukkan dengan hasil "Tidak". Ini menunjukkan bahwa batas kemampuan robot dalam menjaga keseimbangan adalah pada kemiringan sumbu X sebesar 35 derajat.

Pengujian ini penting untuk memahami batas stabilitas robot *hexapod* dalam situasi medan yang miring dan menentukan sudut kemiringan maksimum di mana robot masih dapat berfungsi secara optimal tanpa kehilangan keseimbangan.

3.7 Pembahasan

Dalam penelitian ini, telah dilakukan serangkaian eksperimen dan simulasi untuk menguji kemampuan robot *hexapod* menggunakan pendekatan *Inverse Kinematics* (IK), *Body Kinematics* (BK), dan trajektori berbasis *Kurva Bézier* dalam pergerakan kakinya. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa pendekatan IK dan BK berhasil menghitung sudut-sudut sendi dengan akurasi yang cukup tinggi, serta memastikan setiap langkah dapat mengikuti pola pergerakan yang diinginkan. Kombinasi dari IK dan BK memungkinkan robot *hexapod* untuk mengontrol kaki-kakinya secara tepat berdasarkan input posisi dan orientasi dalam ruang 3D.

Pengujian trajektori langkah menggunakan *Kurva Bézier* menghasilkan gerakan yang halus dan stabil. Pada Gambar 7, ditunjukkan bagaimana kurva Bézier membantu mengoptimalkan pergerakan kaki robot sehingga langkah-

langkah yang dihasilkan lebih stabil, dengan transisi yang lembut antara posisi awal dan akhir. Hal ini penting untuk memastikan bahwa robot *hexapod* dapat menjaga keseimbangan selama berjalan di permukaan yang berbeda, mengurangi getaran yang dapat mempengaruhi stabilitas keseluruhan robot.

Pengujian *Body Kinematics* untuk kemiringan pada sumbu X mengungkapkan bahwa robot *hexapod* mampu menyesuaikan diri hingga sudut kemiringan 35 derajat, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Pada kemiringan lebih besar dari 35 derajat, robot tidak mampu lagi menjaga keseimbangan, mengindikasikan bahwa robot memiliki batas kemampuan dalam menghadapi medan yang miring. Ini menunjukkan bahwa robot *hexapod* memiliki potensi yang baik dalam menjaga stabilitas pada kemiringan moderat, tetapi pada sudut yang lebih ekstrem, diperlukan metode stabilisasi tambahan.

Selain itu, hasil pengujian langkah robot sejauh 2.10 meter menunjukkan akurasi sebesar 70%, dengan rata-rata *error* sebesar 4.2 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa robot *hexapod* dapat melakukan gerakan yang cukup akurat dalam kondisi percobaan yang dilakukan, meskipun terdapat beberapa percobaan yang mengalami deviasi lebih besar dari yang diharapkan, seperti yang dijelaskan pada Tabel 3.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi antara IK, BK, dan kurva Bézier merupakan pendekatan yang efektif untuk mengendalikan pergerakan kaki robot *hexapod*. Namun, beberapa keterbatasan, terutama dalam menjaga keseimbangan pada sudut kemiringan yang besar, masih perlu ditangani.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pendekatan *Inverse Kinematics* (IK) dan *Body Kinematics* (BK) berhasil diaplikasikan dengan baik pada robot *hexapod* untuk mengontrol pergerakan kaki dalam ruang tiga dimensi. IK memungkinkan penghitungan sudut sendi secara akurat berdasarkan posisi target kaki, sementara BK mengatur postur tubuh robot agar tetap seimbang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi IK dan BK mampu menghasilkan kontrol gerakan yang presisi, yang menjadi fondasi penting bagi pergerakan robot *hexapod* di berbagai medan. Selain itu, penggunaan *Kurva Bézier* dalam perancangan trajektori langkah terbukti memberikan peningkatan yang signifikan dalam hal kehalusan dan stabilitas gerakan. *Kurva Bézier* memungkinkan robot untuk membuat langkah yang lebih halus dengan transisi yang terkontrol antar titik pergerakan, sehingga mengurangi guncangan dan memperbaiki keseimbangan tubuh. Robot *hexapod* mampu berjalan dengan akurat sejauh 2.10 meter dalam 70% percobaan, dengan rata-rata *error* sebesar 4.2 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengendalian *hexapod* memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk aplikasi yang membutuhkan gerakan presisi. Pengujian terhadap stabilitas robot pada kemiringan sumbu X juga menunjukkan bahwa robot dapat menyesuaikan diri dengan baik hingga sudut kemiringan 35 derajat. Namun, pada sudut kemiringan yang lebih besar, seperti 40 dan 45 derajat, robot kehilangan keseimbangan dan tidak mampu menyesuaikan posturnya. Hal ini menunjukkan bahwa batas stabilitas robot perlu diperhatikan lebih lanjut jika robot akan dioperasikan di medan yang lebih ekstrem atau tidak rata. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memahami mekanisme kontrol pergerakan pada robot *hexapod*. Kombinasi IK, BK, dan *Kurva Bézier* dapat menjadi solusi efektif dalam menghadapi tantangan stabilitas dan keakuratan gerakan pada robot berkaki. Untuk pengembangan lebih lanjut, peningkatan stabilitas pada kemiringan yang lebih tajam serta pengujian di lingkungan yang lebih beragam sangat dianjurkan. Ini akan memperluas kapabilitas robot *hexapod* dalam situasi dunia nyata yang lebih kompleks.

REFERENCES

- [1] Y. Baldemir, S. Iyigün, O. Musayev, and C. Ulu, "Design and Development of a Mobile Robot for Search and Rescue Operations in Debris," *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, vol. 8, no. 4, pp. 133–137, 2020, doi: 10.18100/ijamec.800840.
- [2] B. M. Pillai and J. Suthakorn, "Challenges for Novice Developers in Rough Terrain Rescue Robots: A Survey on Motion Control Systems," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2019, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1155/2019/2135914.
- [3] Y. Pratama *et al.*, "Implementasi Kontrol PID untuk Percepatan Rotasi pada Robot Hexapod," *JURNAL MEDIA INFORMATIKA BUDIDARMA*, vol. 7, no. 4, pp. 1869–1876, 2023.
- [4] Q. Sun, F. Gao, and X. Chen, "Towards Dynamic Alternating Tripod Trotting of a Pony-Sized Hexapod Robot for Disaster Rescuing Based on Multi-Modal Impedance Control," *Robotica*, vol. 36, no. 7, pp. 1048–1076, 2018, doi: 10.1017/s026357471800022x.
- [5] L. Zhang, Y. Zhu, F. Zhang, and S. Zhou, "Position-Posture Control of Multilegged Walking Robot Based on Kinematic Correction," *Journal of Robotics*, vol. 2020, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1155/2020/8896396.
- [6] M. R. Borroek, E. Rasywir, Y. Pratama, and M. Istoningtyas, "Analysis on Knowledge Layer Application for Knowledge Based System," *2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science ...*, 2018.
- [7] R. K. Megalingam, R. Geesala, R. Chanda, and K. Nigam, "Multimode Control and Simulation of 6-Dof Robotic Arm in ROS," *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 306–316, 2020, doi: 10.25046/aj050340.
- [8] M. S. Kurnia, "Kontrol PID Untuk Navigasi Robot Berkaki Berbasis Sensor TOF Dan BNO055," *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, vol. 10, no. 3, pp. 462–470, 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i3.1952.
- [9] R. Rendyansyah and K. J. Miraswan, "Sistem Navigasi Robot Hexapod Menggunakan Behavior Dan Learning Vector Quantization," *Elkha*, vol. 11, no. 1, p. 33, 2019, doi: 10.26418/elkha.v11i1.31147.



- [10] Y. Hartiwi, E. Rasywir, Y. Pratama, and P. A. Jusia, “Eksperimen Pengenalan Wajah dengan fitur Indoor Positioning System menggunakan Algoritma CNN,” *Jurnal Khatulistiwa Informatika*, vol. 22, no. 2, pp. 109–116, 2020.
- [11] R. Rendyansyah, A. P. P. Prasetyo, K. Exaudi, A. W. Sempurna, and B. Sudrajat, “Pengembangan Olfactory Hexapod Robot Untuk Mendeteksi Kebocoran Sumber Aroma,” *Jtev (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional)*, vol. 7, no. 2, p. 160, 2021, doi: 10.24036/jtev.v7i2.112851.
- [12] K. Nonami, R. K. Barai, A. Irawan, and M. R. Daud, “Hydraulically Actuated Hexapod Robots,” 2014, doi: 10.1007/978-4-431-54349-7.
- [13] I. K. Wibowo, D. Preistian, and F. Ardilla, “Kontrol Keseimbangan Robot Hexapod EILERO Menggunakan Fuzzy Logic,” *Elkomika Jurnal Teknik Energi Elektrik Teknik Telekomunikasi & Teknik Elektronika*, vol. 9, no. 3, p. 533, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i3.533.
- [14] M. D. Dzulfiqar and N. S. Widodo, “Implementasi PID Navigasi Pelacakan Titik Api Dengan Sensor Flame Array Pada Robot Hexapod Untuk Kontes Robot Pemadam Api Indonesia,” *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, vol. 1, no. 3, p. 131, 2019, doi: 10.12928/biste.v1i3.1126.
- [15] L. A. Sutawati, I. N. S. Kumara, and W. Widiadha, “Pengembangan Three Degree of Freedom Hexapod Sebagai Robot Pemadam Api Dengan Sensor UVTron Hamamatsu,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 17, no. 3, p. 417, 2018, doi: 10.24843/mite.2018.v17i03.p17.
- [16] D. A. Patriawan, B. P. Natakusuma, A. A. Arifin, H. S. Maulana, H. Irawan, and B. Setyono, “Uji Presisi Dari Nonholonomic Mobile Robot Pada Rancang Bangun Sistem Navigasi,” *Journal of Mechanical Engineering Science and Innovation*, vol. 1, no. 1, 2021, doi: 10.31284/j.jmesi.2021.v1i1.1760.
- [17] L. Fućek, Z. Kovačić, and S. Bogdan, “Analytically Founded Yaw Control Algorithm for Walking on Uneven Terrain Applied to a Hexapod Robot,” *Int J Adv Robot Syst*, vol. 16, no. 3, p. 172988141985799, 2019, doi: 10.1177/1729881419857997.
- [18] Z. Feng, S. Zhang, Q. Wang, Y. Yang, and B. Jin, “Straight Gait Research of a Small Electric Hexapod Robot,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, p. 3714, 2021, doi: 10.3390/app11083714.
- [19] S. Mohamed, “Design and Modeling of Hexapod Robot Using Telescopic Legs Connected to Pivot Joints at the Hips,” *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 238, no. 8, pp. 3480–3497, 2023, doi: 10.1177/09544062231198383.
- [20] L. F. P. de Oliveira and F. L. Rossini, “Modeling, Simulation and Analysis of Locomotion Patterns for Hexapod Robots,” *Ieee Latin America Transactions*, vol. 16, no. 2, pp. 375–383, 2018, doi: 10.1109/tla.2018.8327389.
- [21] P. Risma, M. Bagaskara, N. H. Latifah, M. Anisah, and A. Rialita, “The Application of Push Button Switch as Inverse Kinematics Input on Adaptive Walking Method for Hexapod Robot,” *Computer Engineering and Applications Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1–16, 2020, doi: 10.18495/comengapp.v9i1.313.
- [22] T. F. Abaas, A. A. Khleif, and M. Abbood, “Inverse Kinematics Analysis and Simulation of a 5 DOF Robotic Arm Using MATLAB,” *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.22153/kej.2020.12.001.
- [23] H. Li, C. Qi, F. Gao, X. Chen, Y. Zhao, and Z. Chen, “Mechanism Design and Workspace Analysis of a Hexapod Robot,” *Mech Mach Theory*, vol. 174, p. 104917, 2022, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104917.
- [24] U. Asif and J. Iqbal, “An approach to stable walking over uneven terrain using a reflex-based adaptive gait,” *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 11, 2011, doi: 10.1155/2011/783741.