



Kinerja Sensor untuk Mendukung Kontrol Stabilitas *Pitch* dan *Roll* pada Robot Berkaki Enam di Medan Miring

Yusie Rizal¹, Ivan Maududy*²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: yusie.rizal@poliban.ac.id

Abstrak

Pengembangan robot berkaki enam (hexapod) menghadapi tantangan dalam menjaga stabilitas saat bergerak di permukaan miring, terutama dalam memantau sudut kemiringan pada arah pitch dan roll. Stabilitas ini bergantung pada akurasi sistem sensor dalam membaca orientasi robot terhadap kemiringan medan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem sensor yang terdiri dari akselerometer pada badan robot dan sensor sentuh pada kaki robot, dalam mendeteksi sudut kemiringan dan menjaga kestabilan robot pada berbagai permukaan miring. Robot diuji dalam simulator AnyCode Marilou dengan antarmuka Visual C++ 2008 berbasis ODE (Open Dynamic Engine), di mana berbagai skenario kemiringan permukaan diterapkan, termasuk permukaan datar serta permukaan dengan sudut elevasi 5° dan 10°. Pembacaan sensor akselerometer menunjukkan bahwa sudut pitch robot sesuai dengan sudut elevasi medan, sementara sudut roll tetap berada dalam rentang kecil antara 0,5° hingga 1°, menunjukkan bahwa elevasi medan tidak berpengaruh signifikan pada stabilitas roll robot. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem sensor dapat secara akurat mendeteksi dan menjaga stabilitas orientasi robot dalam arah pitch dan roll pada berbagai kemiringan permukaan, mendukung operasional yang stabil pada medan yang bervariasi.

Kata kunci—Robot berkaki enam, hexapod robot, simulator robot, permukaan miring

Abstract

The design of the six-legged walking robot (hexapods) gets complicated when there is a need to move on a slope as it requires the robot to monitor motions in the pitch and roll angles while walking. The stability of this robot depends on the accuracy of the sensor system to detect tilt angle. The aim of this paper is to evaluate the performance of the sensor system, i.e., the accelerometer attached to the body of the robot and touch sensors on the legs of the robot for tilt angles and robot's balance over surfaces with varied inclinations. The experiments were conducted in the AnyCode Marilou simulator with a Visual C++ 2008 as programming interface to access virtual robot where the inclination of the tested terrain was varied starting with a flat surface and going up to 5° or 10°. It has also been noted that the pitch of the robot at 10 degrees can be maintained on a elevated terrain at an angle of the same degrees, while the roll angle was noted to be constant at small degree. It suggests that the elevation had no impact on roll stability

and the sensor system is capable of measuring and maintaining orientation stability of the robot in the pitch and roll directions in the presence of different angles of incline.

Keywords—Six-legged robot, hexapod robot, robot simulator, inclined surface

1. PENDAHULUAN

Robot berkaki enam (*hexapod robot*) merupakan salah satu jenis robot yang memiliki keunggulan dalam navigasi pada medan yang tidak rata, dibandingkan dengan robot mobil (*mobile robot*) atau robot *humanoid*. Namun, menjaga stabilitas robot berkaki enam di permukaan miring masih menjadi tantangan utama, terutama dalam mempertahankan keseimbangan pada dua orientasi kritis: *pitch* dan *roll*. Dalam berbagai kompetisi, termasuk Kontes Robot SAR Indonesia (KRSRI) pada tahun 2024, tantangan medan yang berat sering kali menyebabkan robot kehilangan keseimbangan, terutama karena sebagian besar pendekatan yang digunakan masih bersifat statis dan berbasis *trial-and-error*. Pendekatan ini membuat robot sulit beradaptasi terhadap perubahan kemiringan lantai, sehingga respons stabilitas pada sudut *pitch* dan *roll* menjadi kurang optimal. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan sistem sensor yang andal, yang mampu mendeteksi perubahan sudut permukaan dan mempertahankan stabilitas robot secara dinamis di medan miring. Penelitian ini berfokus pada performa sensor dalam menjaga orientasi *pitch* dan *roll* pada robot berkaki enam, guna memastikan bahwa robot dapat beradaptasi dengan permukaan miring dan mempertahankan keseimbangan yang stabil.

Selain itu, robot berkaki enam umumnya tidak dilengkapi dengan mekanisme umpan balik pada ujung kakinya untuk mendeteksi kontak dengan permukaan lantai, yang mengakibatkan robot kekurangan informasi penting terkait kestabilan setiap langkahnya. Tanpa umpan balik ini, robot tidak dapat memastikan bahwa setiap ayunan kaki berhasil mencapai lantai sebelum melanjutkan gerakan berikutnya, yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan, terutama pada permukaan miring. Penerapan umpan balik melalui sensor, seperti *switch* pada setiap kaki yang aktif saat menyentuh lantai, dapat meningkatkan responsivitas dan akurasi gerakan, membantu robot menyesuaikan stabilitas *pitch* dan *roll* secara *real-time*. Kompleksitas pemrograman bertambah seiring dengan kebutuhan untuk mengendalikan banyak motor servo secara simultan menggunakan mikrokontroler, mendorong upaya mahasiswa untuk mengatur pergerakan kaki secara bergantian demi menjaga keseimbangan. Meskipun berbagai teknik kontrol, seperti kinematika balik dan perencanaan lintasan (*path following*) telah banyak dibahas, mahasiswa masih menghadapi tantangan dalam mengimplementasikan perhitungan teoritis ini ke dalam program praktis menggunakan Arduino atau C/C++. Penelitian ini berfokus pada peran sistem sensor dalam mengatasi kendala stabilitas *pitch* dan *roll* di medan miring, mengevaluasi performa sensor dalam menjaga keseimbangan robot berkaki enam di lingkungan yang dinamis.

Berdasarkan studi literatur, persoalan stabilitas robot berkaki enam dalam mempertahankan keseimbangan pada permukaan miring masih belum banyak diteliti, terutama dalam hal performa sistem sensor untuk stabilitas *pitch* dan *roll*. Topik penelitian yang berkaitan dengan robot berkaki enam mencakup berbagai persoalan, seperti analisis kinematika balik pada robot berkaki enam [3], pengendalian arah gerak (*posture*) [4],[5] termasuk dengan antarmuka manusia dan mesin [1], pengaturan kontrol gerak kaki robot untuk melangkah [6], serta simulasi robot [7],[8],[9] baik pada permukaan datar [10] maupun permukaan lunak [11]. Selain itu, penerapan metode kontrol tertentu untuk tujuan spesifik pada robot berkaki memiliki tantangan tersendiri, misalnya menggunakan pendekatan berbasis model (*model-based design*) [6] atau koreksi kinematika [12]. Dalam pengontrolan robot, pendekatan kontrol umumnya dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu estimasi parameter kontak antara robot dan lingkungan serta kontrol terhadap kaki robot berdasarkan parameter yang telah diestimasi tersebut [13].

Penelitian robot berkaki enam saat hingga kini masih relatif aktif dan menarik banyak peneliti [2]. Beberapa penelitian terkait menunjukkan fokus yang berbeda; Zhang et al. [14] meneliti robot berkaki yang diam (*stationary*) di atas permukaan lantai dengan kemiringan tertentu, namun tidak membahas secara spesifik pengaruh elevasi sudut kemiringan terhadap

stabilitas robot, dan eksperimen dilakukan langsung pada robot tanpa pendekatan simulasi. Sementara itu, Tiram et al. [4] mempelajari cara menjaga keseimbangan robot diam yang berdiri di permukaan tak beraturan. Berbeda dengan studi Zhang et al. [14] dan Tiram et al. [4] yang berfokus pada robot statis di medan tidak rata, penelitian Gao et al. [11] menitikberatkan pada pengontrolan pergerakan robot berkaki enam yang berjalan di permukaan lunak atau tidak rata dengan pengujian melalui simulasi. Meski demikian, penelitian-penelitian ini belum mengeksplorasi secara mendalam kinerja sensor dalam menjaga stabilitas orientasi *pitch* dan *roll* pada medan miring, yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Perkembangan simulator robot semakin pesat dengan hadirnya berbagai perangkat lunak, baik gratis maupun komersial, yang memungkinkan pengujian model, simulasi perilaku, dan evaluasi respons robot dalam berbagai kondisi. Salah satu perangkat lunak komersial yang digunakan adalah AnyCode Marilou, yang mampu mengintegrasikan aktuator dan sensor sehingga simulasi yang dihasilkan dapat mendekati kondisi operasional nyata. Simulator ini umumnya menggunakan pendekatan arsitektur modular dan terdistribusi, yang ideal untuk simulasi robot kompleks karena memudahkan pengelolaan komponen yang bekerja secara independen namun tetap terkoordinasi [8].

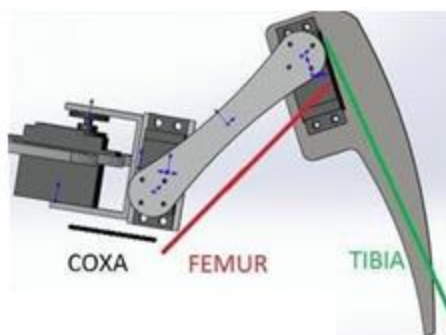
Penelitian ini bertujuan untuk menguji respons keseimbangan robot berkaki enam pada permukaan miring dalam arah *pitch* dan *roll*, menggunakan simulator AnyCode Marilou dan pendekatan modular terdistribusi. Melalui simulasi ini, kinerja sensor *accelerometer* dan sensor sentuh dievaluasi dalam menjaga stabilitas orientasi robot pada medan dengan kemiringan yang bervariasi. Temuan ini menunjukkan bahwa robot dapat mempertahankan kestabilan dalam arah *roll* meskipun berada di permukaan miring, yang mendukung efektivitas sistem sensor yang dikembangkan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada pengembangan robot berkaki yang lebih adaptif untuk operasi di medan nyata yang kompleks dan tidak rata.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Model Kinematika Robot Berkaki Enam

Dalam sistem kinematika pada robot, terdapat kinematika maju (*forward kinematics*) dan kinematika mundur (*inverse kinematics*). Pada kinematika maju yang diterapkan pada sebuah kaki robot, apabila setiap sudut pada masing-masing aktuator diberikan maka akan diperoleh posisi ujung kaki robot dalam koordinat tiga dimensi (x, y, z). Sebaliknya, pada kinematika mundur, apabila koordinat ujung kaki robot diketahui maka akan diperoleh berapa sudut-sudut yang harus dicapai oleh setiap servonya.

2.1.1 Forward Kinematics



Gambar 1 Struktur Sebuah Kaki *Robo Hexapod*

Pada Gambar 1 ditunjukkan salah satu bagian kaki robot berkaki enam yang terdiri dari *coxa*, *femur*, dan *tibia*. Pada bagian *coxa* dapat dianggap sebagai *base*, sedangkan ujung *tibia* disebut sebagai *end-effector*. Panjang *link* masing-masing komponen kaki robot di atas dapat

diberikan pada Tabel 1 sedangkan nilai *offset* atau nilai awal masing-masing sudut *joint* ditunjukkan pada Tabel 2. Persamaan kinematika maju apabila masing-masing *sudut joint* ($\theta_c, \theta_f, \theta_t$) diketahui dapat diberikan oleh persamaan (1) sampai dengan persamaan (4).

$$\begin{aligned}x &= x_0 \cos \theta_c \\y &= x_0 \sin \theta_c\end{aligned}\quad (1)$$

dimana:

$$x_0 = c + f \cos \theta_f + t \sin(\theta_f + \theta_t) \quad (2)$$

Sedangkan untuk posisi robot pada sumbu z diberikan oleh persamaan:

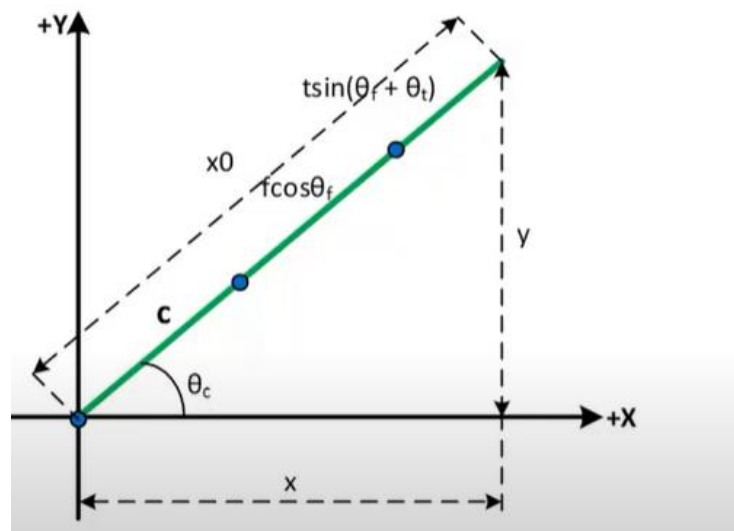
$$z = f \sin \theta_f - t \sin \theta_k + Z_0 \quad (3)$$

Dimana Z_0 diberikan pada Tabel 4.3, sedangkan sudut θ_k adalah:

$$\theta_k = (90 - \theta_f) - \theta_t \quad (4)$$

2. 1.2 Inverse Kinematics

Persamaan kinematika mundur (*inverse kinematics*) adalah bagaimana mendapatkan nilai masing-masing sudut *joint* robot (sudut servo) apabila koordinat dari *end-effector* atau ujung tibia diketahui. Persamaan ini dapat diturunkan berdasarkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

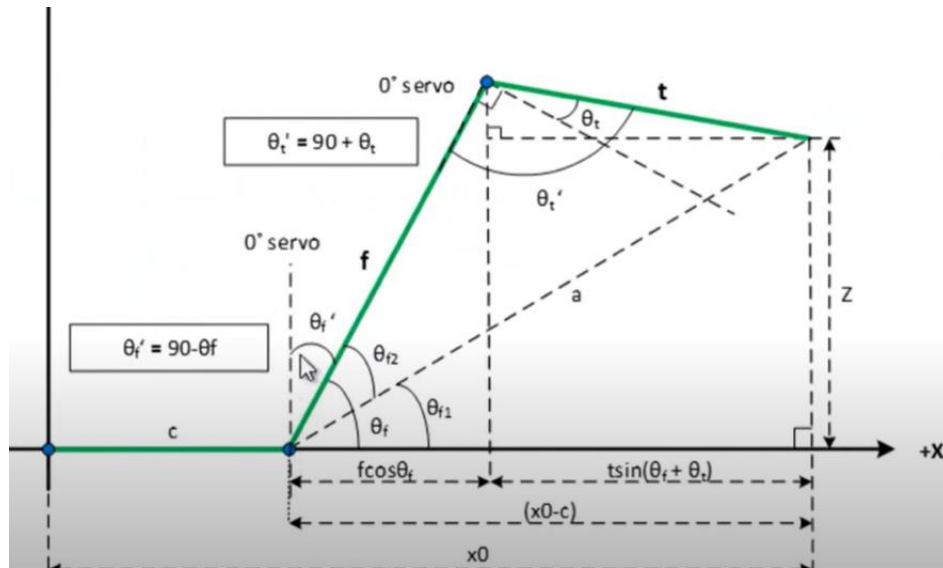


Gambar 2 Kinematika kaki robot untuk komponen *coxa*

Pada Gambar 1 diberikan contoh sebuah kaki kanan depan robot berkaki (RF) atau *Right Forward*. Pada bagian *coxa* dibuat sebuah kerangka koordinat sebagaimana Gambar 2 dimana persamaan kinematika mundur untuk sudut *joint coxa* diberikan oleh persamaan (5) dan persamaan (6).

$$x_0 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (6)$$



Gambar 3 Kinematika Kaki Robot untuk Komponen *Femur* dan *Tibia*

Berikutnya pada Gambar 3, diilustrasikan model kinematika kaki dalam arah depan dimana untuk mendapatkan persamaan kinematika mundur sudut *joint femur* dan *tibia*. Apabila posisi x , y , dan z diketahui, maka masing-masing persamaan sudut joint tersebut diberikan oleh persamaan (7) dan persamaan (8).

$$\begin{aligned}\theta_f &= \theta_{f1} + \theta_{f2} \\ \theta_{f1} &= \tan^{-1}\left(\frac{z}{x_0 - c}\right) \\ a &= \sqrt{z^2 + (x_0 - c)^2}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\theta_{f2} &= \cos^{-1}\left(\frac{f^2 + a^2 - t^2}{2af}\right) \\ \theta_t &= \cos^{-1}\left(\frac{f^2 + a^2 - t^2}{2af}\right) - 90^\circ\end{aligned}\quad (8)$$

Dimana masing-masing simbol θ_c , θ_f , dan θ_t adalah sudut untuk joint *coxa*, *femur*, dan *tibia*. Pada masing-masing sudut yang lain, seperti pada RM dan RR dapat pula diberikan kerangka koordinat yang sama dengan RF. Namun untuk kaki LF, LM, dan LR, kerangka koordinat yaitu sumbu x yang digunakan adalah sumbu negatif. Oleh karena itu, perlu dilakukan kalibrasi terhadap masing-masing kaki robot.

Tabel 1 Ukuran *Link* Robot Berkaki

Nama	Simbol	Ukuran
<i>Coxa</i>	c	4.470 cm
<i>Femur</i>	f	7.868 cm
<i>Tibia</i>	t	13.569 cm

Tabel 2 Nilai *offset* masing-masing sudut *joint robot*

Nama	Simbol	Sudut Awal
Sudut <i>coxa</i> *	θ_c	$\theta_{c_{r1}} = 45^\circ, \theta_{c_{r2}} = 0^\circ, \theta_{c_{r3}} = -45^\circ$ $\theta_{c_{l1}} = 45^\circ, \theta_{c_{l2}} = 0^\circ, \theta_{c_{l3}} = -45^\circ$
Sudut <i>femur</i>	θ_f	40.31°
Sudut <i>tibia</i>	θ_t	-19.1°

*) Sudut *coxa* pada masing-masing kaki robot mempunyai nilai awal yang berbeda

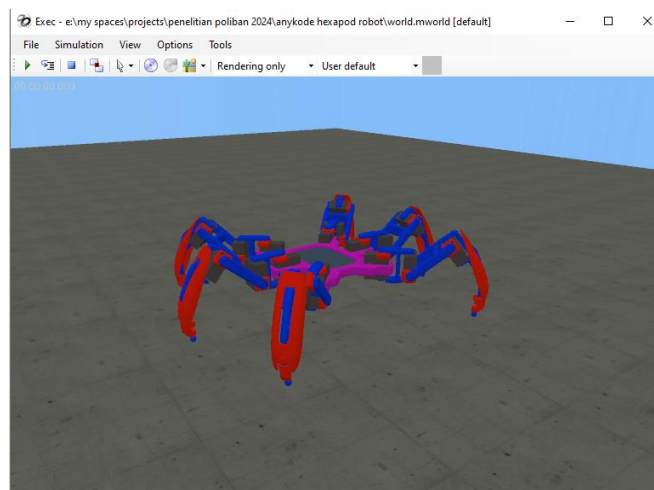
Tabel 3. Nilai *offset* posisi robot dalam sumbu *X*, *Y*, dan *Z* relatif terhadap basis *coxa*

Nama	Simbol	Sudut Awal
Nilai offset posisi sumbu x (<i>coxa</i>)	X_0	0 cm
Nilai offset posisi sumbu y (<i>coxa</i>)	Y_0	0 cm
Nilai offset posisi sumbu z (<i>coxa</i>)	Z_0	-0.6 cm

Persamaan kinematika balik yang telah dijelaskan berfungsi untuk menghitung sudut pada setiap sambungan (*joint*) di masing-masing kaki robot. Melalui perhitungan ini, posisi optimal setiap kaki dapat ditentukan, memungkinkan struktur robot untuk berdiri dengan stabil dan tegak. Dengan kata lain, persamaan ini memberikan orientasi yang tepat bagi setiap sambungan kaki agar robot dapat menjaga keseimbangan saat berada di atas permukaan tertentu.

2. 2. Simulator Robot

Untuk pengujian robot berkaki enam ini, dibuat sebuah simulator menggunakan perangkat lunak AnyCode Marilou. Simulator dikendalikan melalui antarmuka program Visual C++ 2008, memungkinkan implementasi algoritma kontrol langsung ke dalam sistem robot virtual. Tampilan simulator untuk robot berkaki enam yang dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 4. Untuk menguji efektivitas sistem kontrol, beberapa skenario simulasi dibuat dengan variasi kemiringan permukaan lantai pada sudut elevasi tertentu.

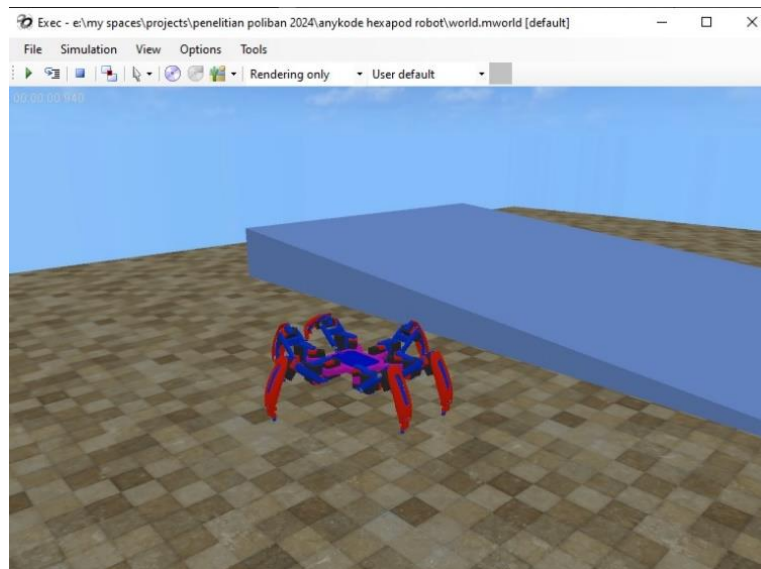


Gambar 4 Simulator Robot yang Telah Dikembangkan Menggunakan AnyCode Marilou

Simulator robot ini dilengkapi dengan berbagai perangkat, seperti motor DC, motor servo, dan sejumlah sensor yang dapat digunakan sebagai umpan balik. Dalam sistem ini, servo motor digunakan untuk setiap sambungan (*joint*) robot, sementara sebuah sensor *accelerometer* dipasang pada badan robot untuk mendeteksi sudut kemiringan ketika robot berada di permukaan datar atau miring. Di setiap ujung kaki robot dipasang sensor sentuh, yang berfungsi untuk mendeteksi kontak kaki robot dengan lantai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

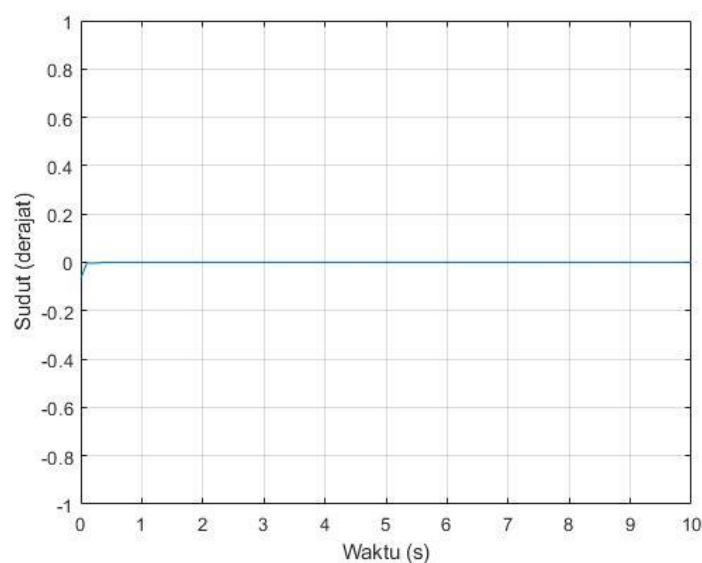
Hasil eksperimen melalui simulasi komputer mencakup tiga skenario lingkungan untuk menguji robot dalam berbagai kondisi permukaan. Skenario pertama adalah saat robot berada di permukaan rata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Skenario kedua melibatkan robot yang beroperasi di permukaan miring dengan sudut kemiringan 5° , ditampilkan pada Gambar 8. Skenario ketiga menguji robot pada permukaan miring dengan kemiringan lebih curam, yaitu 10° , yang dapat dilihat pada Gambar 11.



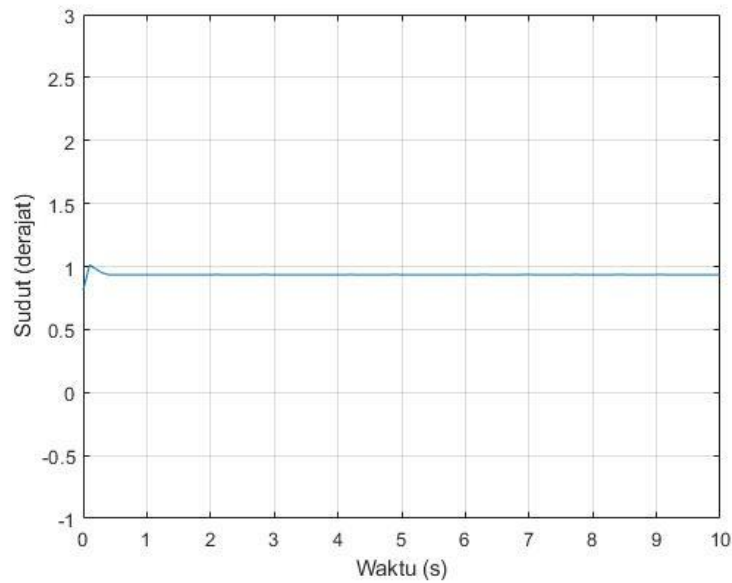
Gambar 5 Simulator Robot Berkaki untuk Skenario Pada Permukaan Rata

Pada Gambar 5, ditunjukkan bahwa robot berdiri di atas permukaan lantai yang rata dengan sudut elevasi 0° . Untuk menguji kemampuan sensor dalam mendeteksi kemiringan, dilakukan pembacaan menggunakan *accelerometer* yang terpasang pada robot. Hasil pembacaan sudut *pitch*, yaitu sudut kemiringan robot pada orientasi horizontal, ditampilkan pada Gambar 6. Pada kondisi ini, sudut *pitch* terbaca sebesar 0° , yang sesuai dengan permukaan lantai yang rata, menunjukkan bahwa sensor bekerja secara akurat dalam mendeteksi orientasi horizontal robot.

Selanjutnya, pengujian juga dilakukan untuk membaca sudut *roll*, yaitu sudut yang menunjukkan kemiringan robot dalam arah longitudinal (sumbu depan-belakang robot). Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7, di mana sudut *roll* terbaca kurang dari 1° . Sudut ini sangat kecil dan hampir mendekati 0° , sehingga dapat dianggap bahwa robot berada dalam posisi mendatar dengan kemiringan longitudinal yang sangat minim. Hasil ini mengonfirmasi bahwa sensor *accelerometer* mampu memberikan pembacaan akurat untuk menjaga keseimbangan robot baik dalam orientasi *pitch* maupun *roll* pada permukaan yang datar.

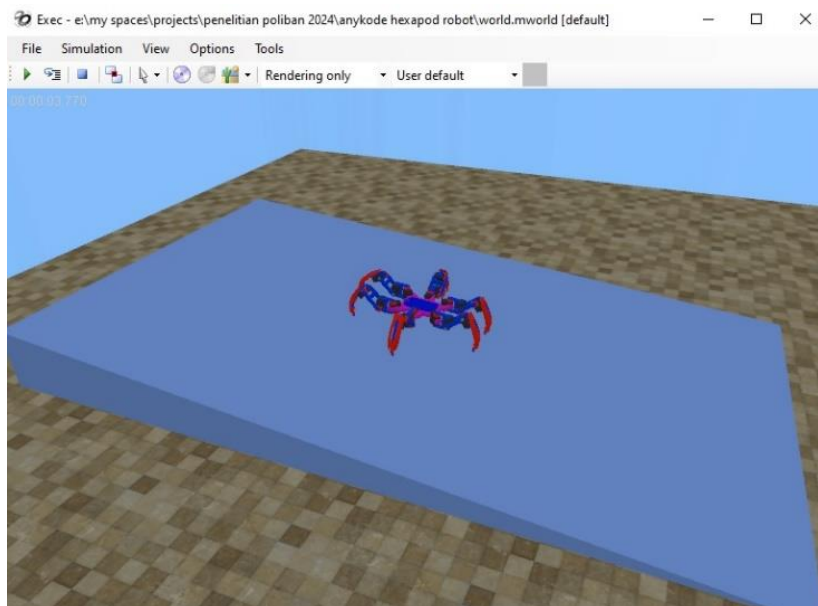


Gambar 6 Sudut *Pitch* Robot yang Berada Pada Permukaan dengan Elevasi Sudut 0°

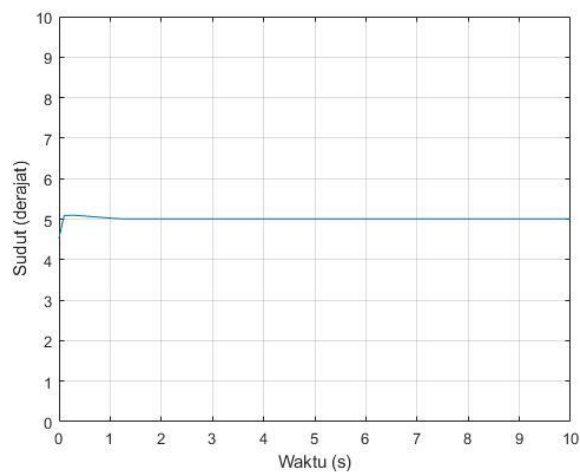


Gambar 7 Sudut *Roll* Robot yang Berada pada Permukaan dengan Sudut Elevasi 0°

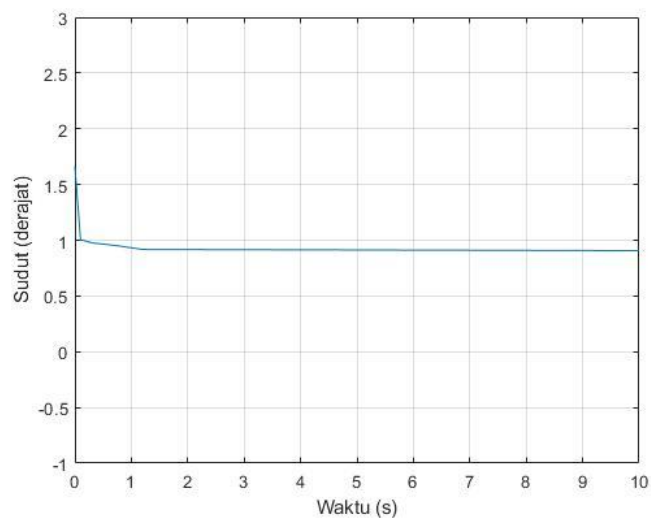
Pada Gambar 8, ditampilkan eksperimen di mana robot ditempatkan pada permukaan miring dengan sudut elevasi 5° . Selanjutnya, pembacaan sensor akselerometer dilakukan untuk mengukur sudut *pitch* dan *roll* robot. Hasil pembacaan sudut *pitch* ditunjukkan pada Gambar 9, dengan nilai yang terbaca sebesar 5° , sesuai dengan kemiringan permukaan tempat robot berdiri. Hal ini menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi sudut elevasi permukaan secara akurat. Pada Gambar 10, ditunjukkan hasil pembacaan sudut *roll*. Nilai sudut *roll* yang terbaca kurang dari 1° , yang relatif kecil dan dapat diabaikan. Namun, pada detik-detik awal, sudut *roll* yang terdeteksi mencapai sekitar $1,5^\circ$ akibat metode pengujian di mana robot dijatuhkan ke permukaan miring. Ketika robot pertama kali mendarat, sensor mencatat nilai sudut yang lebih besar karena dampak kontak awal. Meski demikian, setelah stabil, sudut *roll* berada di kisaran kurang dari 1° , menunjukkan bahwa robot berada dalam posisi yang cukup stabil meskipun permukaan memiliki elevasi 5° .



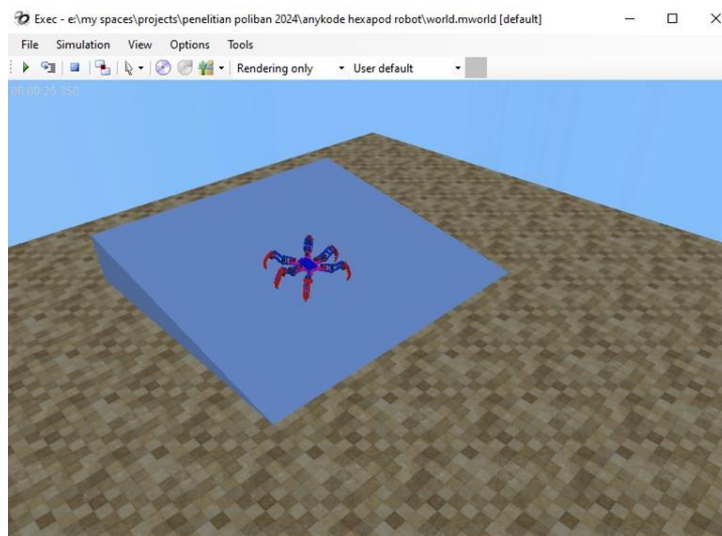
Gambar 8 Simulator Robot Berkaki untuk Skenario pada Bidang Miring dengan Elevasi 5°



Gambar 9 Sudut *Pitch* Robot yang Berada di atas Permukaan dengan Elevasi 5°



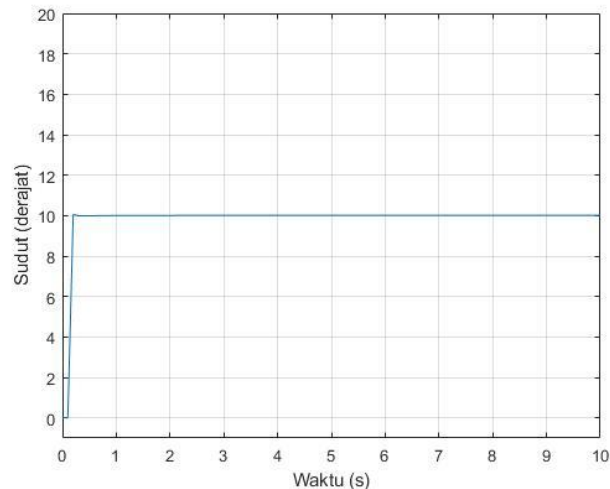
Gambar 10 Sudut *Roll* Robot yang Berada di atas Permukaan dengan Elevasi 5°



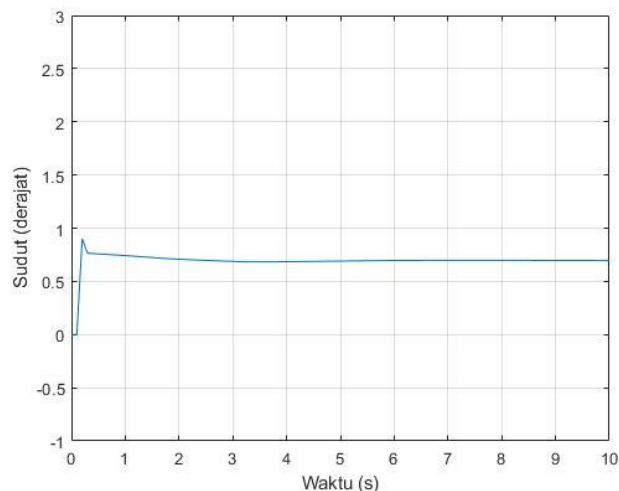
Gambar 11 Simulator Robot Berkaki untuk Skenario pada Bidang Miring dengan Elevasi 10°

Pada Gambar 11, ditampilkan skenario di mana robot ditempatkan pada permukaan miring dengan sudut elevasi 10° , yang digunakan untuk menguji kemampuan sensor *accelerometer* dalam mendeteksi perubahan orientasi pada sudut yang lebih curam. Respon sensor terhadap orientasi robot diukur melalui pembacaan sudut *pitch* dan *roll*, yang masing-masing disajikan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Pada Gambar 12, pembacaan sudut *pitch* oleh sensor *accelerometer* menunjukkan nilai sebesar 10° setelah robot mencapai posisi stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor dapat mendeteksi sudut kemiringan dengan akurasi tinggi, sesuai dengan elevasi aktual permukaan. Hal ini mengindikasikan kemampuan sensor untuk memberikan data orientasi yang sesuai dalam kondisi kemiringan curam.

Selanjutnya, Gambar 13 memperlihatkan hasil pembacaan sudut *roll* oleh sensor *accelerometer* pada permukaan miring yang sama. Nilai sudut *roll* yang terbaca adalah sekitar $0,75^\circ$, yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan sudut elevasi permukaan. Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun ada sedikit kemiringan dalam arah *roll*, pengaruhnya sangat minimal dan tidak signifikan terhadap stabilitas keseluruhan robot. Dengan demikian, sudut *roll* ini dapat diabaikan karena perbedaan kecil tersebut tidak mengakibatkan gangguan keseimbangan yang berarti pada robot. Hasil ini mengonfirmasi bahwa robot dapat mempertahankan posisi stabil bahkan pada kemiringan permukaan yang lebih besar, serta mendukung efektivitas sistem sensor dalam menjaga orientasi yang tepat.



Gambar 12 Sudut *Pitch* Robot yang Berada di atas Permukaan dengan Elevasi 10° .



Gambar 13 Sudut *Roll* Robot yang Berada di atas Permukaan dengan Elevasi 10°

Dari hasil percobaan yang ditunjukkan dari Gambar 8 hingga Gambar 13, ditemukan bahwa kemiringan badan robot konsisten dengan kemiringan sudut elevasi lantainya dalam arah *pitch*. Sebaliknya, dalam arah *roll* diperoleh bahwa apabila robot berada pada sudut elevasi tertentu maka sudut yang terbentuk dalam arah *roll* selalu berada pada posisi antara 0.5° hingga 1° , dimana hal ini menunjukkan bahwa pengaruh sudut elevasi terhadap sudut *roll* robot tidak signifikan atau kurang relevan. Ini berarti bahwa pada arah *roll* posisi robot bisa selalu muncul apakah lantai yang dilewati rata atau miring.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini memberikan gambaran jelas mengenai efektivitas sistem sensor yang diterapkan pada robot berkaki enam untuk menjaga stabilitas orientasi di berbagai kondisi medan. Hasil percobaan menunjukkan bahwa robot dapat mempertahankan orientasi *pitch* sesuai dengan sudut elevasi permukaan, mengindikasikan efektivitas sistem sensor dalam menyesuaikan kemiringan robot terhadap kondisi medan. Dengan kata lain, dalam arah *pitch*, robot mampu mengikuti kemiringan permukaan secara akurat, menunjukkan stabilitas tinggi meskipun elevasi lantai berubah. Sebaliknya, dalam arah *roll*, pembacaan sensor menunjukkan bahwa sudut *roll* tetap kecil, antara $0,5^\circ$ hingga 1° , bahkan di permukaan miring, menandakan bahwa elevasi tidak berdampak signifikan pada stabilitas *roll* robot. Secara keseluruhan, temuan ini mengonfirmasi bahwa sistem yang dikembangkan dapat menjaga keseimbangan robot pada kedua arah—*pitch* dan *roll*—sehingga memungkinkan operasi yang stabil di permukaan datar maupun miring. Pendekatan ini terbukti akurat dalam mendeteksi dan menyesuaikan kemiringan serta andal dalam mempertahankan stabilitas robot pada medan bervariasi, menunjukkan potensinya untuk aplikasi di lingkungan yang menantang.

5. SARAN

Sebagai arah penelitian selanjutnya, akan dikembangkan metode kontrol gerak bagi robot yang bergerak pada permukaan miring. Pengendalian ini tidak hanya akan mempertimbangkan stabilitas orientasi pada sudut *pitch* dan *roll*, tetapi juga menyesuaikan langkah dan distribusi gaya pada kaki robot saat bergerak di medan miring, sehingga memungkinkan robot untuk berjalan dengan aman dan efisien di berbagai kemiringan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Banjarmasin atas dukungan pendanaan penelitian ini melalui skema Penelitian Pengembangan Dosen dengan dana DIPA tahun 2024. Dukungan ini berperan penting dalam keberhasilan penelitian yang kami lakukan. Kami berharap hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. S. Pa and C. M. Wu, "Design of a hexapod robot with a servo control and a man-machine interface," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 28, no. 3, pp. 351–358, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.rcim.2011.10.005.
- [2] F. Tedeschi and G. Carbone, "Design Issues for Hexapod Walking Robots," *Robotics*, vol. 3, no. 2, pp. 181–206, Jun. 2014, doi: 10.3390/robotics3020181.
- [3] S. Muslimin and D. Istardi, "Inverse Kinematics Analysis for Motion Prediction of a Hexapod Robot," in *2018 International Conference on Applied Engineering (ICAE)*, Oct. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/INCAE.2018.8579402.

-
- [4] M. Tikam, D. Withey, and N. J. Theron, "Standing posture control for a low-cost commercially available hexapod robot," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2017, pp. 3379–3385. doi: 10.1109/IROS.2017.8206177.
- [5] M. Tikam, D. Withey, and N. J. Theron, "Posture Control for a Low-Cost Commercially-Available Hexapod Robot," in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2020, pp. 4498–4504. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197147.
- [6] D. Thilderkvist and S. Svensson, "Motion Control of Hexapod Robot Using Model-Based Design," Lund University, 2015.
- [7] E. Rohmer, S. P. N. Singh, and M. Freese, "V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 1321–1326. doi: 10.1109/IROS.2013.6696520.
- [8] M. Freese, S. Singh, F. Ozaki, and N. Matsuhira, "V-REP : A Versatile 3D Robot Simulator," in *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, 2010, pp. 51–62. [Online]. Available: http://www.springerlink.com/content/q2w5600112506551/%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-17319-6_8
- [9] L. Zlajpah, "Simulation in robotics," *Math. Comput. Simul.*, vol. 79, pp. 879–897, 2008, doi: 10.1016/j.matcom.2008.02.017.
- [10] D. Belter, A. Kasiński, and P. Skrzypczyński, "Evolving feasible gaits for a hexapod robot by reducing the space of possible solutions," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 2673–2678. doi: 10.1109/IROS.2008.4650813.
- [11] H. Gao *et al.*, "A real-time, high fidelity dynamic simulation platform for hexapod robots on soft terrain," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 68, pp. 125–145, 2016, doi: 10.1016/j.simpat.2016.08.004.
- [12] L. Zhang, Y. Zhu, F. Zhang, and S. Zhou, "Position-Posture Control of Multilegged Walking Robot Based on Kinematic Correction," *J. Robot.*, vol. 2020, pp. 1–9, Sep. 2020, doi: 10.1155/2020/8896396.
- [13] H. Navvabi and A. H. D. Markazi, "Hybrid position/force control of Stewart Manipulator using Extended Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller (E-AFSMC)," *ISA Trans.*, no. xxxx, 2018, doi: 10.1016/j.isatra.2018.11.037.
- [14] L. Zhang, F. Wang, Z. Gao, S. Gao, and C. Li, "Research on the Stationarity of Hexapod Robot Posture Adjustment," *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2859, May 2020, doi: 10.3390/s20102859.