

Pengembangan Sistem Kendali Mekanis *Mobile Robot* Menggunakan Roda *Caster*

Christiand, Jonathan

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

E-mail: christiand@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Sistem kendali merupakan bagian yang penting dari pengoperasian robot beroda. Sebuah roda *caster* dapat digunakan sebagai kendali mekanis dari robot beroda yang berfungsi untuk menavigasikan robot ke berbagai posisi dan orientasi. Salah satu metode implementasi sistem kendali mekanis adalah dengan menggunakan sebuah motor servo untuk mengarahkan orientasi roda *caster* ke suatu sudut kendali (*steering angle*). Mekanisme kendali tersebut menggunakan roda *caster* sederhana, berbiaya murah, dan mudah untuk dibuat. Kerja penelitian yang disampaikan pada artikel ini memaparkan rancang bangun mekanisme kendali robot beroda menggunakan roda *caster* ditenagai oleh sebuah motor servo dan algoritma *pure pursuit* untuk penentuan sudut kendali. Robot beroda yang menjadi target aplikasi memiliki dua roda utama yang ditenagai oleh motor BLDC (*brushless DC*). Sebuah eksperimen telah dilakukan untuk mengevaluasi mekanisme kendali yang diusulkan. Dari eksperimen yang dilakukan pada dua lintasan, sistem kendali yang dikembangkan dapat mencapai error posisi sebesar minimal 0.228 m pada arah Y dan kurang dari 1 m secara keseluruhan. Kerja penelitian ini meliputi aspek mekanikal, elektrikal, dan perangkat lunak.

Kata kunci :

Kendali robot, *Pure pursuit*, Roda *caster*, Robot beroda.

ABSTRACT

A reliable control system is essential for the operation of a wheeled robot. A castor wheel is a robotic control device that enables the wheeled robot to navigate to various positions and orientations. One implementation method employs a servo motor to adjust the orientation of the castor wheel to a specific driving angle. The mechanism is robust, cost-effective, and simple to produce. This work demonstrates the development of a castor-wheel-based control mechanism utilizing a servo motor and the pure pursuit algorithm to determine the driving angle. The designated wheeled robot employs a BLDC motor as the primary actuator for its two main wheels. An experiment has been performed to assess the proposed control mechanism. The proposed control system achieved a position error of 0.228 m in the Y direction minimally and less than 1 m position error globally. This study presents mechanical, electrical, and software components.

Keywords :

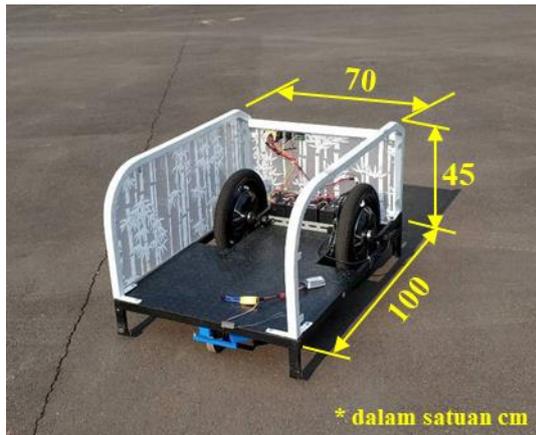
Robot control, Pure pursuit, Castor wheel, Wheeled Robot.

1. PENDAHULUAN

Robot telah menjadi simbol kemajuan teknologi dalam dua dekade terakhir. Berbagai macam robot telah dikembangkan untuk memiliki berbagai macam fungsi [1][2][3]. Salah satu fungsi robot adalah untuk memindahkan barang maupun orang dari satu tempat ke tempat lain. Robot tersebut masuk dalam kategori *mobile robot*

yang secara spesifik disebut sebagai *transporter robot*. Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya adalah salah satu institusi pendidikan yang mengembangkan *transporter robot* seperti dapat dilihat pada gambar 1.

Untuk bergerak ke berbagai posisi dan orientasi pada ruang kerja, sebuah robot



Gambar 1. *Transporter robot* yang dikembangkan di Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

memerlukan sebuah sistem kendali gerak. Ketidakmampuan robot dalam mencapai tujuan yang ditentukan membuat penyelesaian pekerjaan yang diberikan kepada robot tidak terlaksana. Modul perencana gerak (*motion planner*) pada robot menetapkan serangkaian posisi dan orientasi yang harus dieksekusi oleh robot. Tugas dari sistem kendali gerak adalah memastikan robot dapat mengorientasikan diri serta mencapai posisi yang telah ditentukan. Dalam eksekusi orientasi dan posisi yang telah ditentukan, sistem kendali memanfaatkan data dari modul lokalisasi untuk mengetahui posisi dan orientasi terakhir robot relatif terhadap titik origin dari ruang kerja. Selanjutnya, sistem kendali menggerakkan bagian mekanikal dari sistem kendali agar robot mengarah pada orientasi yang ditentukan. Hal tersebut dapat terwujud dengan cara mengatur pengarah mekanis pada robot.

Salah satu mekanisme pengarah pada robot yang sederhana, berbiaya rendah, dan mudah untuk dibuat adalah dengan menggunakan sebuah roda *caster* untuk *mobile robot* beroda dua (menggunakan dua roda utama sebagai penggerak utama). Robot yang dikembangkan di Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya memiliki dua roda sebagai penggerak utama (gambar 1). Roda *caster* yang terpasang pada bagian belakang-bawah robot mengarahkan robot sesuai

dengan sudut kendali robot dan membentuk kurvatur terhadap titik pusat belok.

Menyadari pentingnya sistem kendali pada robot maka sebuah kerja penelitian perlu dilakukan lebih jauh lagi. Rancang dan bangun mekanisme sistem kendali mekanis sangat diperlukan dengan juga disertai pengembangan algoritma yang diperlukan. Dalam hal ini, algoritma tersebut digunakan untuk memetakan kinematika robot secara keseluruhan (posisi dan orientasi dari modul *motion planner*) ke kinematika sistem kendali mekanis menggunakan roda *caster* [4]. Dalam kerja penelitian ini, algoritma *pure pursuit* digunakan untuk mendapatkan sudut kendali (*steering angle*) untuk selanjutnya dieksekusi oleh sistem kendali mekanis agar robot mencapai posisi dengan orientasi tertentu [5].

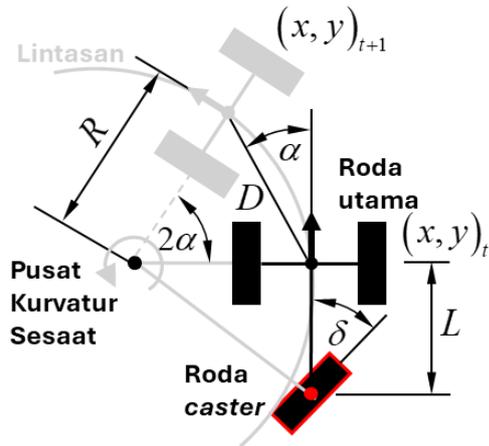
Pemaparan kerja penelitian pada artikel ini dibagi menjadi lima bagian. Bagian pertama memaparkan latar belakang serta motivasi dalam pengerjaan kerja penelitian ini. Bagian kedua menjelaskan metodologi yang digunakan dalam merealisasikan sistem kendali. Bagian tiga menunjukkan implementasi yang telah dilakukan dalam realisasi sistem kendali berbasis roda *caster* yang diusulkan. Bagian empat menjelaskan eksperimen serta analisis terhadap data yang didapatkan. Artikel ini ditutup dengan bagian lima yang memberikan kesimpulan atas kerja penelitian yang dilakukan.

2. METODOLOGI

Untuk mewujudkan sebuah sistem kendali mekanis dari *mobile robot*. Tahapan pekerjaan dibagi menjadi tiga bagian, yaitu pendefinisian kinematika gerak robot, pengembangan algoritma, dan desain mekanisme kendali.

2.1 Kinematika Gerak Robot

Secara umum robot dengan dua roda bermiripan dengan tipe *differential drive* memiliki tiga kemungkinan gerak dasar, yaitu : gerak lurus, gerak berputar di tempat (*pivot*), dan gerak belok. Untuk mengorientasikan robot, gerak belok sebenarnya merupakan suatu gerakan menyusuri perimeter lingkaran dengan suatu titik pusat [4]. Gambar 2



Gambar 2. Kinematika transporter robot.

menunjukkan penyederhanaan kinematika robot dalam keadaan berbelok. Dapat dilihat bahwa untuk membawa robot kedalam gerak belok terhadap suatu titik pusat, salah satu roda perlu dikendalikan untuk membentuk sudut kendali tertentu (*steering angle*). Besarnya sudut ini akan mempengaruhi kurvatur dari lintasan yang dilewati. Dengan kata lain ketajaman belok robot akan dipengaruhi oleh sudut kendali tersebut.

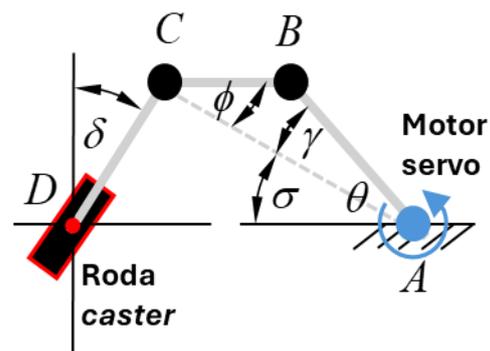
Roda *caster* dipasang untuk menghasilkan sudut kendali tersebut. Roda *caster* dapat dipasang pada bagian depan ataupun belakang robot. Mekanisme yang mirip dengan kinematika *tricycle* pada kendaraan komersial seperti Bajaj [5]. Pada *transporter robot* yang dikembangkan, roda *caster* dipasang pada bagian belakang robot.

2.2 Algoritma Pure pursuit

Algoritma *pure pursuit* merupakan algoritma yang dikembangkan sejak lama untuk memberikan kemampuan *mobile robot* dalam hal menyusuri serangkaian titik lokasi yang telah ditentukan [6].

Langkah pertama dari algoritma *pure pursuit* adalah menentukan kurvatur lintasan yang dilalui oleh posisi target (posisi yang dituju) yang ditunjukkan oleh persamaan (1).

$$k = \frac{2 \sin \alpha}{D} \quad (1)$$



Gambar 3. Four-bar mechanism untuk penghubung motor servo dan roda *caster*.

Langkah kedua adalah menentukan sudut kendali (*steering angle*) δ yang dibutuhkan untuk membawa robot dari posisinya sekarang ke posisi yang dituju. Sudut kendali ditunjukkan oleh persamaan (2).

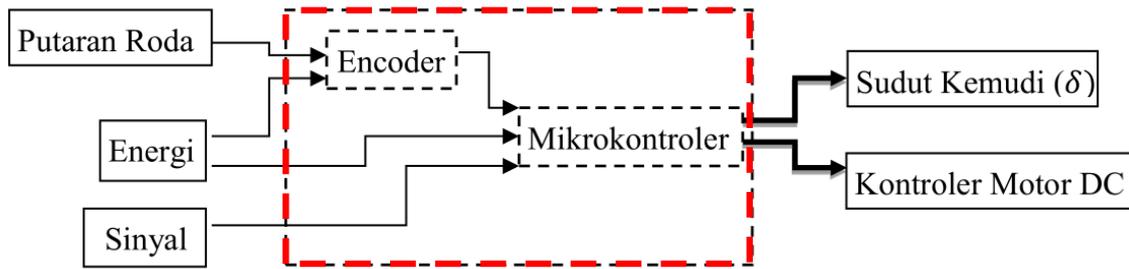
$$\delta = \tan^{-1}(kL) \quad (2)$$

Dengan menggabungkan persamaan (1) dan (2) maka bentuk akhir persamaan sudut kendali dapat dilihat pada persamaan (3).

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{2 \sin \alpha}{D} L\right) \quad (3)$$

2.3 Desain Mekanisme Penggerak Roda Caster

Roda *caster* tentunya harus digerakkan secara aktif oleh sebuah penggerak. Dalam hal ini, sebuah motor servo digunakan sebagai aktuator untuk menggerakkan roda *caster*. Terdapat beberapa pilihan mekanisme untuk menghubungkan roda *caster* dan motor servo, misal *direct drive*, *belt drive*, dsb. Dikarenakan rentang sudut roda *caster* tidak perlu satu lingkaran penuh, maka roda *caster* dihubungkan dengan motor servo menggunakan *four-bar mechanism* (mekanisme empat batang) yang ditunjukkan pada gambar 3. Motor servo digerakkan pada sudut rotasi tertentu yang dinotasikan sebagai θ . Persamaan (4) sampai dengan (7)



Gambar 4. Diagram blok sistem kendali.

menunjukkan perhitungan untuk mendapatkan nilai θ berdasarkan nilai sudut kendali δ yang diinginkan. *Four-bar mechanism* telah banyak diimplementasikan, salah satu contohnya oleh Pichandi dkk. [7].

$$\sigma = \sin^{-1} \left(\frac{\|\overline{AD}\| \sin(0.5\pi - \delta)}{\|\overline{AC}\|} \right) \quad (4)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\|\overline{CA}\|^2 + \|\overline{CB}\|^2 - \|\overline{AB}\|^2}{2\|\overline{CA}\|\|\overline{CB}\|} \right) \quad (5)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{\|\overline{CB}\| \sin \phi}{\|\overline{AB}\|} \right) \quad (6)$$

$$\theta = \gamma + \sigma \quad (7)$$

3. PERWUJUDAN SISTEM KENDALI MEKANIS DENGAN RODA CASTER

3.1 Diagram Blok Pemrograman

Diagram blok sistem diperlukan dalam pemrograman sistem kendali gerak robot agar

dapat menghasilkan keluaran (*output*) yang sesuai dengan keinginan. Diagram blok sistem dapat dibuat apabila fungsi keseluruhan dari rancangan terlebih dahulu dibuat. Diagram blok sistem kendali gerak robot secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 4.

3.2 Komponen Sistem Kendali

A. Mikrokontroler, gambar 5.(a), digunakan sebagai pusat proses kendali yang mengolah data dari *encoder* dan target posisi yang diinginkan, sehingga dapat mengontrol pergerakan kedua motor DC utama yang terhubung dengan roda yang terletak pada sisi samping robot. Mikrokontroler juga digunakan untuk mengatur sudut belok robot dengan motor servo sebagai aktuatornya.

B. Rotary encoder, gambar 5.(b), merupakan modul elektro-mekanik yang dapat menghasilkan data digital dari posisi sudut dan perputaran sebuah poros. Sistem kendali gerak robot menggunakan *incremental rotary encoder* sebagai komponen karena kemampuan modul ini untuk membaca perubahan posisi sudut



(a)



(b)



(c)

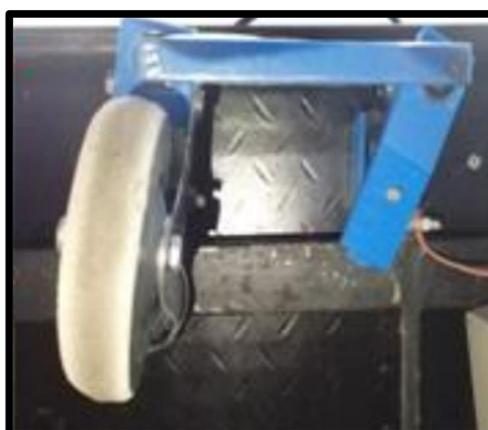
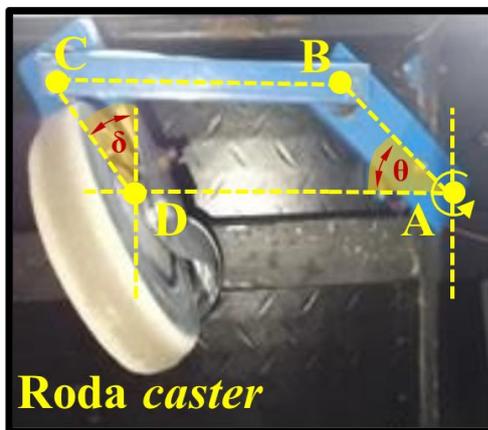
Gambar 5. (a) Mikrokontroler, (b) Rotary encoder, (c) Motor servo.

sebuah poros, yang selanjutnya diproses untuk mendapatkan informasi berupa posisi dan jarak perpindahan robot

C. Motor servo, gambar 5.(c), merupakan sebuah aktuator yang berdasarkan motor DC pada umumnya namun memiliki sistem umpan balik tertutup sehingga perubahan sudut poros yang dihasilkan bisa diatur secara akurat. Motor servo merupakan motor DC yang terdiri dari rangkaian roda gigi, potensiometer, dan unit pengendali. Sinyal PWM (*pulse width modulation*) digunakan pada motor servo sebagai input besaran sudut kendali yang dikehendaki, yang kemudian diatur oleh motor servo.

3.3 Fabrikasi Penggerak Roda Caster

Keempat batang penggerak roda *caster* diproduksi menggunakan 3D *printer*. Penggerak dipasang pada bagian belakang-bawah dari robot. Pada versi ini, keempat batang penggerak memiliki panjang yang



Gambar 6. *Four-bar mechanism* untuk penghubung motor servo dan roda *caster*.

sama. Posisi roda *caster* berada sejajar dengan posisi motor servo. Gambar 6 menunjukkan hasil fabrikasi sistem penggerak dan pemasangan pada robot.

Sudut kendali δ dihitung dengan persamaan (4) sampai (7). Motor servo yang terpasang pada titik A membentuk sudut θ sehingga menghasilkan sudut kendali sebesar δ .

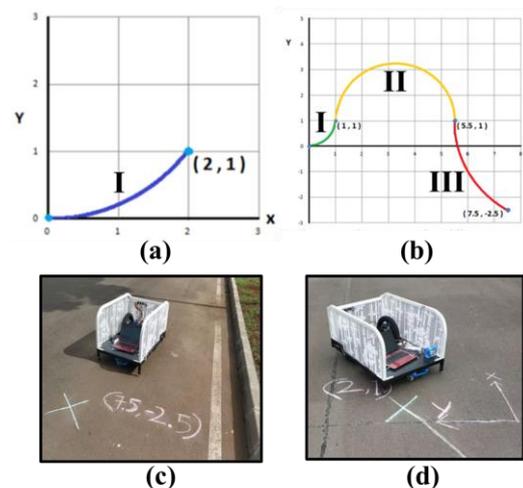
4. EKSPERIMEN DAN ANALISIS

4.1 Desain Eksperimen

Dua buah lintasan ditentukan untuk mengevaluasi keakuratan sistem kendali dalam menyusuri serangkaian posisi yang telah ditetapkan. Lintasan pertama (gambar 7.(a)) merupakan lintasan sederhana dengan satu titik sebagai koordinat target. Sedangkan lintasan kedua (gambar 7.(b)) memiliki bentuk yang lebih sulit dengan tiga titik sebagai koordinat target membentuk kurva. Lintasan kedua dibuat sedemikian rupa untuk mengevaluasi apakah *error* dari sistem kendali bertambah seiring bertambah panjangnya lintasan.

4.2 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan di ruangan luar gedung kampus Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya. Lintasan berupa jalanan beraspal kasar. Posisi awal robot diberi penanda agar dapat diketahui gerak menyusur robot dari posisi awal ke



Gambar 7. (a) Lintasan pertama, (b) Lintasan kedua, (c) dan (d) posisi target.

posisi target, gambar 7.(c) dan 7.(d). Kemudian robot diperintah untuk bergerak menuju posisi target. Posisi akhir robot ketika percobaan ini selesai dilakukan diukur secara manual menggunakan pita ukur dan *protractor* lalu dicatat. Eksperimen dilakukan sebanyak 20 kali

4.3 Analisis

Gambar 8 menunjukkan hasil kemampuan sistem kendali dalam mencapai posisi target yang telah ditentukan. Secara umum dapat dilihat bahwa semakin panjang lintasan yang dilewati maka keakurasian sistem kendali semakin menurun. Hal tersebut dapat dilihat dari perbandingan hasil dua lintasan, dimana lintasan 2 memiliki lintasan yang lebih panjang. Error posisi pada lintasan 2 lebih besar dari error pada lintasan 1.

Faktor bentuk lintasan juga merupakan kontributor terhadap besarnya error pada lintasan 2. Perubahan arah yang banyak menyebabkan orientasi robot berganti berkali-kali. Hal tersebut pada akhirnya menyumbang error pada posisi akhir. Hal ini yang disebut error akumulasi (*accumulated error*). Informasi error ini sangat penting untuk pengembangan sistem navigasi, secara khusus pengembangan modul lokalisasi dan kendali posisi robot. Error terakumulasi tersebut menjadi target bagi modul lokalisasi dan kendali posisi untuk ditekan agar perambatan error tidak semakin besar seiring

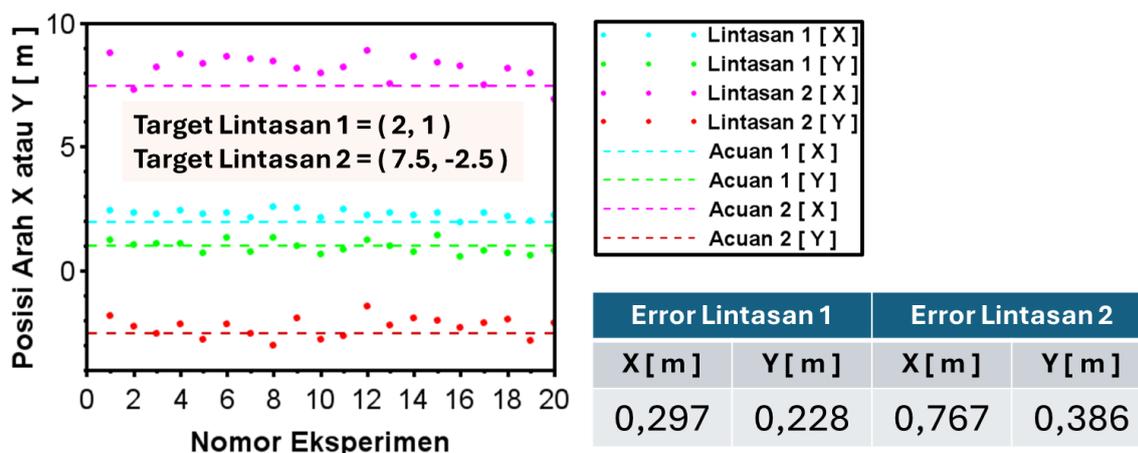
bergeraknya robot atau bertambahnya waktu operasional robot.

Error posisi yang terjadi sedikit banyak juga dipengaruhi oleh fenomena ban robot yang *slip* (kecepatan ban > 0 , namun kecepatan robot = 0). Pada hal tersebut, modul penghitung posisi (berbasis *encoder*) menghitung pertambahan posisi semu yang artinya perhitungan posisi mengalami error. Pada akhirnya, pertambahan posisi semu tersebut memberikan error pada posisi. Kondisi slip ini tentunya juga dipengaruhi oleh panjang serta bentuk lintasan. Lintasan panjang memperbesar kemungkinan jumlah kejadian *slip*. Lintasan yang kompleks dan berkelok memperbesar kemungkinan *slip* terjadi akibat kurangnya traksi ban ketika robot berbelok pada kurvatur tertentu.

Dari eksperimen yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa besarnya error posisi dari sistem kendali tidak lebih dari 1 m dalam segala arah, dimana error terkecil dapat dicapai sebesar 0,228 m.

5. KESIMPULAN

Kerja penelitian ini telah memaparkan pengembangan sebuah sistem kendali mekanis menggunakan roda *caster*. Metodologi dan implementasi telah dipaparkan. Sistem kendali yang dikembangkan juga telah diujicobakan pada dua lintasan nyata. Dari hasil yang ditunjukkan sistem kendali mekanis ini secara nyata mampu membawa *transporter robot* ke posisi-posisi target dengan error



Gambar 8. Error posisi pada lintasan kesatu dan kedua dari eksperimen.

masih dibawah 1 m, dengan error minimal sebesar 0,228 m. Untuk kerja penelitian lanjutan, target penelitian dapat ditujukan pada pengembangan sistem lokalisasi dan kendali posisi. Hal tersebut akan membantu untuk mengurangi perambatan error terakumulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Mubin, C. J. Stevens, S. Shahid, A. Al Mahmud, J. J. Dong, "A review of the applicability of robots in education," *Journal of Technology in Education and Learning*, Vol 13.
- [2] C.B. Dewa, Christiand, A.D Soewono, M. Darmawan, "Rancang Bangun Sistem Informasi Posisi Untuk Robot Beroda Berbasis Rotary Encoder dan GPS Receiver," *Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol. 7, no. 2.
- [3] F. Rubio, F. Valero, C. Llopis-Albert, "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 16, No.2.
- [4] B. B. Deepak, D. R. Parhi, A. K. Jha, "Kinematic Model of Wheeled Mobile Robots," *International Journal on Recent Trends in Engineering & Technology*, Vol. 5, No. 4.
- [5] A. Hemami, "Steering control problem formulation of low-speed tricycle-model vehicles," *International Journal of Control*, Volume 61, no. 4.
- [6] R. C. Coulter, "Implementation of the *pure pursuit* path tracking algorithm," Technical report, The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pennsylvania, Januari 1992.
- [7] M. Pichandi, B. Mohan, S. Jagadeesh, S. Balaji, "Conventional Four-bar Linkage Steering System Adoption for Underslung Front Suspension," *ARAI Journal of Mobility Technology*, Vol. 2, Issue 3, September 2022.