

Implementasi Pemodelan Kinematika dan Odometri Robot Beroda Empat Omni Wheel pada Perencanaan Lintasan dan Kontrol Gerak Berbasis Mikrokontroler

Dhiya Uddin Rijalusalam¹, Iswanto Iswanto^{*2}

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia Email:

²iswanto_te@umy.ac.id

^{*}Penulis Korespondensi

Abstrak - Kontrol pemodelan kinematik pada robot omni-directional empat roda (FWOR) sangat sulit. Karena harus mengatur kecepatan keempat motor DC. Kecepatan motor DC dikontrol agar robot FWOR dapat dikendalikan. Makalah ini akan menjelaskan aplikasi pemodelan kinematik robot omni directional four wheel omni directional robot sebagai pengendali track tracking dan kontrol pergerakan berbasis mikrokontroler. Kinematik adalah ilmu yang mempelajari tentang gerak robot berdasarkan analisis struktur geometri dari suatu sistem kerangka koordinat referensi yang diam/bergerak tanpa memperhitungkan gaya, torsi atau momen-momen tertentu yang menyebabkan terjadinya gerakan. Dengan menerapkan pemodelan kinematik dan perhitungan sistem odometrik sebagai umpan balik, maka kontrol pergerakan lintasan robot dapat dikendalikan dengan presisi sesuai dengan perencanaan lintasan yang telah dibuat. Teknik kontrol lintasan robot ditanamkan pada mikrokontroler ARM 32-bit. Sistem perencanaan jalur dan pengamatan pergerakan robot dilakukan dengan menggunakan antarmuka grafis yang ramah menggunakan Processing untuk memudahkan proses monitoring robot. Hasil dari percobaan dan pengujian yang dilakukan, sistem mampu mengendalikan laju pergerakan robot dengan sangat presisi sesuai dengan perencanaan jalur yang dibuat.

Kata Kunci- *Omni Wheel Mobile Robot, Pemodelan Kinematika, Odometri, Kontrol Gerak Lintasan.*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang semakin pesat memberikan dampak yang cukup signifikan bagi kehidupan manusia, salah satunya dalam bidang mobile robot. Saat ini, teknologi mobile robot telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi di kehidupan manusia, seperti mengangkut benda dari satu tempat ke tempat lain. Hal ini dikarenakan efisiensinya dalam menangani suatu pekerjaan secara terus menerus secara mandiri. Salah satu contohnya ditunjukkan oleh perusahaan Amazon dalam mengimplementasikan mobile robot beroda. Robot beroda holonomic yang sering diaplikasikan untuk mengangkut barang [1] [2] [3]. Robot tersebut menggunakan roda omnidirectional yang dapat bergerak ke segala arah [4] [5] [6] [7] [8]. Dalam beberapa dekade terakhir, meningkatnya jumlah aplikasi robot bergerak telah menarik perhatian banyak peneliti. Masalah utama dalam mengontrol pergerakan mobile robot seperti stabilisasi titik, perencanaan jalur, pelacakan lintasan, penghindaran waktu nyata, dan kontrol gerakan telah menarik banyak perhatian baik dari kalangan akademisi maupun praktisi.

Pada umumnya sistem navigasi robot beroda yang sering dijumpai terdiri dari dua jenis, yaitu ackerman steering dan differential steering yang memiliki mobilitas yang rendah. Hal ini dikarenakan keterbatasan jenis robot tersebut yang tidak dapat bergerak ke segala arah, sehingga kedua jenis ini dapat dikategorikan sebagai robot non-holonomic [6]. Untuk mengatasi masalah tersebut, dikembangkanlah robot holonomic yang memiliki tingkat mobilitas yang tinggi, yaitu dapat bergerak ke segala arah pada bidang kartesian x-y tanpa harus memutar arah orientasi robot. Salah satu jenis robot holomerik adalah robot omnidirectional [5] [6] [7].

Untuk dapat mengontrol pergerakan robot omnidirectional holonomic ke segala arah, diperlukan analisis geometri struktural dari kerangka referensi koordinat [8]. Hal ini sangat erat kaitannya dengan struktur robot dan penempatan roda yang sering disebut dengan pemodelan kinematik. Dengan memahami pemodelan kinematik dari robot omniwheel, arah dan kecepatan motor dapat dihitung dengan mudah. Selain itu, untuk menentukan sistem pergerakan robot yang aktual dan tepat diperlukan data odometrik, yaitu data yang dapat memprediksi perubahan posisi robot terhadap lokasi awal robot.

Beberapa peneliti sebelumnya telah melakukan penelitian tentang pelacakan robot dan kontrol pelacakan gerak. Pemodelan dan Kontrol Gerak Robot Lunak dipelajari oleh Fei dan Xu [9]. Penghindaran Penghambatan Dinamis dari Manipulasi Sel Terbatas Menggunakan Model Kontrol Prediktif diselidiki oleh Li dan Xiong [3]. Mekanisme Adaptasi Frekuensi Online Cepat untuk Kontrol Gerakan Robot berbasis CPG diselidiki oleh Thor dan Manoonpong [10]. Kontrol yang Kuat dari Lintasan Waktu ke Waktu Baru dengan Mode Pergeseran Orde Tinggi untuk Kerjasama Manusia-Robot diselidiki oleh Ren, Wang dan Chen [11]. Kontrol Gerak Feedforward dengan Aktuator Kekakuan Variabel yang Terinspirasi oleh Kinematika Otot Cross-Bridge dipelajari oleh Chang, Kim dan Kim [12]. Kontrol Pelacakan Hibrida Robot SCARA 2-DOF melalui Port-Controlled Hamiltonian dan Backstepping diteliti oleh Chi, Yu dan Yu [13]. Kontrol Pelacakan Lintasan Terdesentralisasi untuk Robot Lunak yang Berinteraksi dengan Lingkungan diselidiki oleh Angelini [14]. Kontrol gerakan robot pemeliharaan berdasarkan gerakan Kinect



Situs Web Jurnal: <http://journal.umy.ac.id/index.php/jrc>

Email Jurnal: jrc@umy.ac.id

pengenalan dipelajari oleh Ge, Wang dan Xing [15]. Kontrol gerakan ikan robot dalam kondisi lingkungan yang dinamis menggunakan pendekatan kontrol adaptif diteliti oleh Verma, Shen dan Xu [16].

Memanfaatkan Informasi Jarak dari Tingkat Interaural yang Berbeda untuk Kontrol Gerak Robot Binaural diselidiki oleh Magassouba, Bertin dan Chaumette [17]. Kontrol Pelacakan Lintasan Kendaraan dengan Aktivasi Planar yang Lebih Sedikit dipelajari oleh Ashrafioun, Nersesov, dan Clayton [18]. Keamanan Pelacakan Kontrol Gerakan Berdasarkan Peralatan Virtual yang Dilarang dalam Operasi Hidung Berbantuan Robot diteliti oleh Zheng [19]. Penolakan interferensi MPC untuk melacak robot bergerak beroda diselidiki oleh Sun [20]. Sistem kontrol gerak pengalihan mode untuk interaksi permukaan yang reaktif dan mengikuti menggunakan robot industri diselidiki oleh Nakhaeinia, Payeur dan Laganier [21]. Kontrol Gerak Robotik Kateter Kontak Kontinu Berbasis Kawat diselidiki oleh Zhang [22]. Kontrol Gerak Robot Hidraulik Langkah Panjang dengan Peningkatan Inversi Dinamis Nonlinier diselidiki oleh Huang [23]. Strategi Kontrol Gerakan untuk Lompatan Berulang Robot Lumba-lumba diselidiki oleh Yu [24]. Mempertahankan Rollin - Kontrol dan Perencanaan Gerakan Seluruh Tubuh untuk Robot Berkaki Empat Beroda yang diteliti oleh Bjelonic [25]. Kontrol gerak robot bawah air sirip empat biomimetik terapung diteliti oleh Salumae, Chemori dan Kruusmaa [26]. Kontrol Gerak Robot Eksplorasi Tambang Bawah Air UX-1: Uji Coba Lapangan diteliti oleh Fernandez [27].

Makalah ini berbeda dengan makalah-makalah penelitian sebelumnya. Makalah ini menjelaskan tentang implementasi dan pemodelan kinematik dan odometri dalam perencanaan jalur dan pengendalian pergerakan robot omnidirectional berbasis mikrokontroler. Pada bagian II akan dijelaskan perhitungan matematis dari robot omnidirectional

model kinematik, dan sistem odometrik dalam menentukan perubahan posisi robot sehubungan dengan

lokasi awal. Pada bagian III, kami akan menjelaskan arsitektur sistem kontrol yang terdiri dari perencanaan lintasan, kontrol gerak, dan arsitektur sistem secara keseluruhan. Pada bagian IV akan dijelaskan beberapa hasil pengujian pergerakan robot. Bagian V berisi kesimpulan, catatan, dan rencana penelitian yang akan dilakukan selanjutnya.

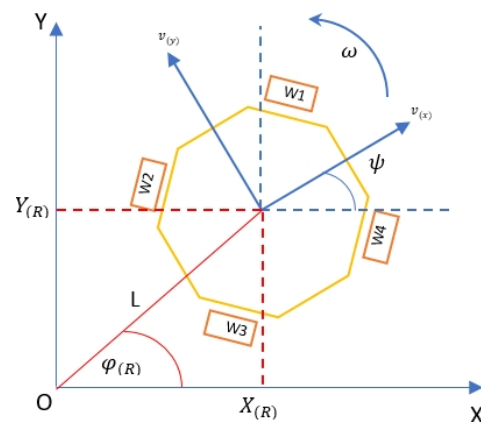
II. METODE

A. Pemodelan Kinematik pada Platform Omni Wheel

Pemodelan kinematik adalah studi tentang gerak robot berdasarkan analisis struktur geometri dari sistem kerangka koordinat referensi yang diam/bergerak tanpa mempertimbangkan gaya, torsi atau momen-momen tertentu yang menyebabkan gerakan [28]. Posisi omni wheel sangat mempengaruhi model kinematik dari omni directional robot. Penelitian ini menggunakan 4 buah omni wheel, dimana sumbu dari keempat roda tersebut disatukan pada titik tengah robot dan sudut antar roda membentuk sudut 90° .

kinematika maju untuk menentukan kecepatan linier robot terhadap koordinat global.

Gambar 1 menunjukkan tampilan kerangka penempatan roda dari FWOR. Sudut yang terbentuk antara roda dan titik referensi robot dilambangkan dengan $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$. Sudut yang terbentuk antara roda dan titik referensi robot adalah Kecepatan sudut setiap roda dilambangkan dengan menggunakan $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]^T$, dan kecepatan linier setiap roda dinotasikan menggunakan $v_w = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$. Nilai kecepatan roda ini akan bernilai positif ketika roda berputar searah jarum jam (CW), dan akan menjadi negatif ketika berlawanan arah jarum jam (CCW). Kecepatan linier dan kecepatan sudut robot sehubungan dengan koordinat global XOY diberitahukan menggunakan $V_g = [X \ Y \ \omega]$. R adalah jarak dari roda ke pusat robot dan r adalah jari-jari roda omni.



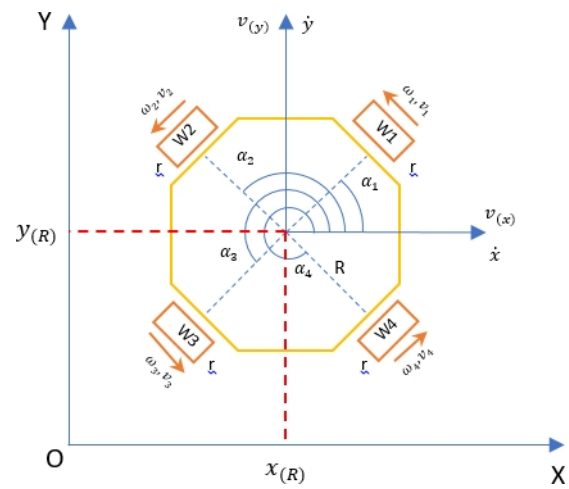
Gbr. 1. Penempatan roda FWOR

Tampilan koordinat dan orientasi FWOR ke koordinat XOY global ditunjukkan pada Gambar 2. Dari gambar ini, dapat dilihat bahwa kecepatan linier robot relatif terhadap kerangka tubuh robot dilambangkan dengan menggunakan $v = [v_x \ v_y]^T$. Posisi koordinat robot dan orientasi ke koordinat global dilambangkan dengan $(g) = [X \ Y \ \psi]^T$ menggunakan X

Dalam pemodelan kinematik robot, terdapat dua model kinematik, yaitu inverse kinematik (IK) dan forward kinematik (FK) yang ditunjukkan pada gambar 1. IK digunakan untuk menentukan kecepatan linier dari keempat omni wheel dan menggunakan

$[x_{(R)} \ y_{(R)} \ \psi]$. ω adalah notasi kecepatan sudut dari robot ke koordinat referensi global. $\varphi_{(R)}$ adalah arah pergerakan robot pada koordinat global, L adalah notasi kecepatan linier yang dihasilkan robot.

Gbr. 2. Penempatan roda FWOR



Berdasarkan Gambar 2, kita dapat merumuskan persamaan berikut.

$$\varphi_{(R)} = \tan^{-1} \frac{Y_{(R)}}{X_{(R)}} \quad (1)$$

$$L = \sqrt{X_{(R)}^2 + Y_{(R)}^2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{(x)} \\ v_{(y)} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2, kita dapat merumuskan persamaan kinematik invers dan kinematik maju. Pada kinematik invers, inputnya adalah kecepatan linier robot

(g) V untuk menentukan kecepatan linier setiap roda. Solusi dari persamaan kinematik terbalik dapat dilihat pada persamaan (4).

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = T(\theta) \cdot V \quad (g) \quad (4)$$

$$V_{(g)} = [X \ Y \ \omega]^T \quad (5)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\psi + \alpha_1) & \cos(\psi + \alpha_1) & R \\ -\sin(\psi + \alpha_2) & \cos(\psi + \alpha_2) & R \\ -\sin(\psi + \alpha_3) & \cos(\psi + \alpha_3) & R \\ -\sin(\psi + \alpha_4) & \cos(\psi + \alpha_4) & R \end{bmatrix} \quad (6)$$

Pada forward kinematik inputnya adalah kecepatan linier roda untuk mendapatkan kecepatan linier robot $V_{(g)}$. Dengan mengacu pada persamaan inverse kinematik (4) maka kita bisa mendapatkan nilai

(g) V dengan mengalikan $V_{(g)} = V_w \cdot T(\theta)^{-1}$, Karena $T(\theta)$ adalah matriks 4x3, maka $T(\theta)^{-1}$ adalah invers semu. Jika rumus tersebut digunakan, maka akan terjadi kesalahan perhitungan, sehingga kami mencoba mengajukan persamaan baru yang dapat dilihat pada persamaan Eq (7) berikut ini.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ \omega \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} -\sin(\psi + \alpha_1) & \cos(\psi + \alpha_1) & 2R^{-1} \\ -\sin(\psi + \alpha_2) & \cos(\psi + \alpha_2) & 2R^{-1} \\ -\sin(\psi + \alpha_3) & \cos(\psi + \alpha_3) & 2R^{-1} \\ -\sin(\psi + \alpha_4) & \cos(\psi + \alpha_4) & 2R^{-1} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

B. Sistem Odometri pada Platform Omni Wheel

Odometri adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan data dari berbagai sensor gerak untuk memperkirakan perubahan posisi selama interval waktu tertentu. Pada penelitian ini, sensor odometri menggunakan rotary encoder pada setiap roda penggerak. Untuk mendapatkan data perubahan posisi terhadap waktu, maka perlu dilakukan pembacaan kecepatan linier roda $v_{w(n)}$

$$\dot{e}_{(n)} = \frac{denc_{(n)}}{dt} \quad (10)$$

dimana $K = 314.28 \text{ mm}$ dan n adalah notasi nomor roda. Setelah mendapatkan kecepatan linear dari masing-masing roda, nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam persamaan FK pada persamaan (7) menjadi (g). Untuk mendapatkan nilai kecepatan linier untuk robot V seperti pada persamaan (9).

$$v = w_{(n)} \frac{\dot{e}_{(n)}}{PPR} \times K \quad (9)$$

koordinat global dan orientasi robot $X_{(g)}$, persamaan (11), (12), dan (13) dapat digunakan.

$$X_{(R)} = \sum_{k=1}^n (X_{(n)}) \quad (11)$$

$$Y_{(R)} = \sum_{k=1}^n (Y_{(n)}) \quad (12)$$

$$\Psi = \sum_{k=1}^n (\omega) \quad (13)$$

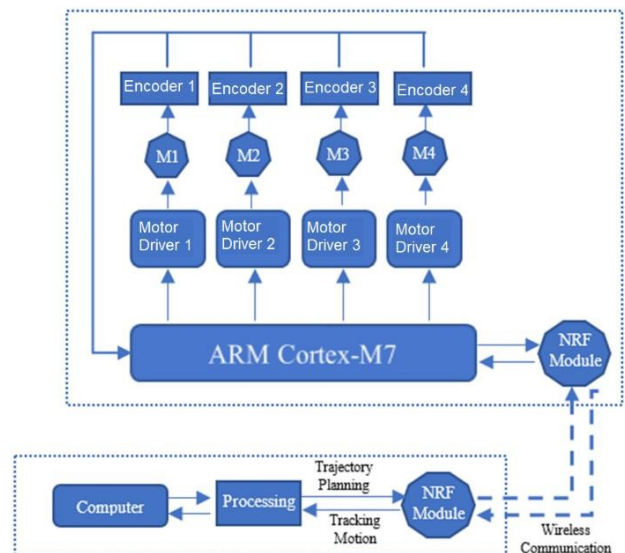
III. ARSITEKTUR SISTEM KONTROL

A. Arsitektur Sistem Secara Keseluruhan

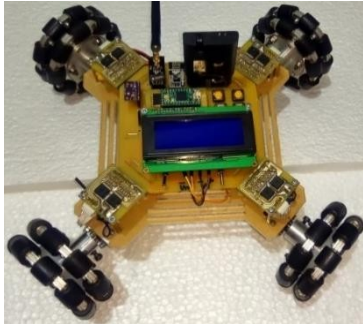
Pada penjelasan kali ini akan dijelaskan mengenai sistem arsitektur robot dan sistem kontrol pergerakan robot menggunakan pemodelan kinematik dan odometri berbasis mikrokontroler. Gambar 3 adalah diagram blok secara detail dari sistem yang dibuat.

Gbr. 3. Diagram Blok Sistem Terperinci

Sistem FWOR dikontrol menggunakan mikrokontroler ARM Cortex M7. Kontrol gerak didasarkan pada informasi yang diperoleh melalui rotary encoder motor DC. Rotary encoder yang digunakan memiliki jumlah pulsa per revolusi (PPR) 320. Kecepatan linier dan sudut diestimasi dengan menghitung jumlah pulsa yang diperoleh dari encoder per satu satuan waktu seperti pada persamaan (10) dan (11). Mikrokontroler menghasilkan 6 sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang diekspresikan dalam nilai 0-255 (8 bit) dan diterapkan pada 3 driver motor jembatan. Setiap driver motor

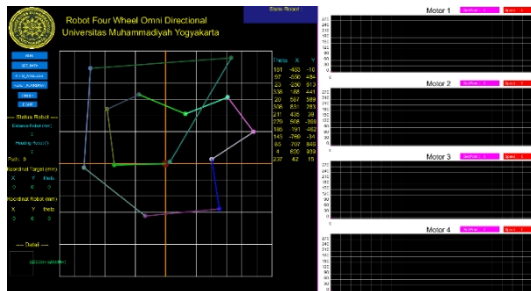


terdiri dari 2 input PWM1 dan PWM2. Ketika motor berputar CW, PWM1 akan sama dengan nilai pulsa PWM, dan PWM2 sama dengan nol, dan sebaliknya ketika arah CCW. Untuk merencanakan lintasan dan proses monitoring pergerakan robot, dibuatlah graphical user interface (GUI) dengan menggunakan aplikasi pengolah, proses pengiriman dan pengambilan data robot menggunakan NRF24L01 secara wireless. Gambar 4 adalah gambar konstruksi fisik FWOR.



Gbr. 4. Konstruksi Fisik FWOR

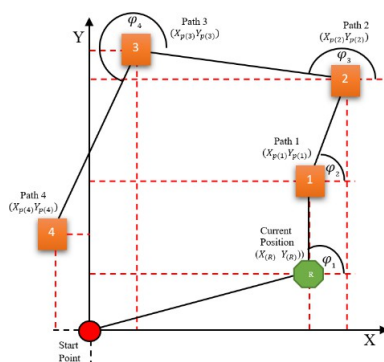
Gambar 5 adalah antarmuka pengguna grafis dari aplikasi yang dibuat.



Gbr. 5. Antarmuka Pengguna Grafis (GUI)

B. Perencanaan Lintasan

Dasar penentuan perencanaan lintasan dari FWOR dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar ini mengilustrasikan pemetaan posisi robot dan lintasan yang telah dibuat. $X_{(R)}$, $Y_{(R)}$ menunjukkan koordinat FWOR ke global koordinat, $x_{p(n)}$, $y_{p(n)}$ adalah koordinat lintasan simbol perencanaan n menunjukkan notasi urutan titik jalur, $\varphi_{(n)}$ adalah notasi arah pergerakan robot ke koordinat global.



Gbr. 6. Algoritma Perencanaan Lintasan

Dengan mengacu pada gambar ini, beberapa persamaan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$X(n) = Xp(n) - Xp(n-1) \quad (14)$$

$$Y(n) = Yp(n) - Yp(n-1) \quad (15)$$

$$\Psi = \sum_{k=1}^n (\omega)_{(n)} \quad (16)$$

Untuk menghitung nilai kecepatan linier untuk setiap roda v_w , Anda dapat menggunakan persamaan IK seperti pada persamaan (3). Namun, untuk dapat mengontrol nilai PWM menjadi nilai kecepatan linier yang presisi, kontrol seperti PID, fuzzy, dan lain-lain. Sehingga kita tidak dapat menggunakan persamaan (3) pada sistem ini, namun kita masih dapat menjalankan FWOR dengan arah sesuai dengan titik koordinat tujuan $x_{p(n)}$, $y_{p(n)}$ dengan menggunakan persamaan (17) sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\psi + \alpha_1) \cos(\psi + \alpha_1) R \\ -\sin(\psi + \alpha_2) \cos(\psi + \alpha_2) R \\ -\sin(\psi + \alpha_3) \cos(\psi + \alpha_3) R \\ -\sin(\psi + \alpha_4) \cos(\psi + \alpha_4) R \end{bmatrix} \frac{\cos(\varphi_{(n)})}{\omega} \cdot MP \quad (17)$$

MP adalah notasi nilai variabel PWM maksimum, nilai ini memiliki nilai antara 0-255, digunakan sebagai batas nilai PWM maksimum. Proses perubahan arah pergerakan robot dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan (18)

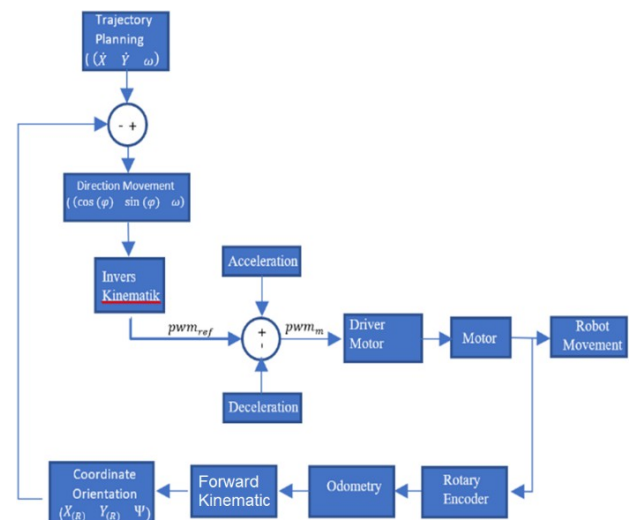
$$Res \leq R_{Circle}; x_{p(n)} = x_{p(n+1)}; y_{p(n)} = y_{p(n+1)} \quad (18)$$

dimana R_{Circle} adalah Radius Lingkaran Target. Perubahan arah pergerakan robot yang terjadi secara tiba-tiba

ketika motor berputar dengan cepat ketika titik lintasan disentuh, dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil, dan menyebabkan slip roda, sehingga diperlukan perubahan arah kecepatan yang halus. Untuk mengatasi hal tersebut dapat diatasi dengan cara mengurangi nilai pwm_{ref} sebesar

$$pwm_{ref} = pwm_{ref} \cdot 0.3 \quad (19)$$

Dengan persamaan ini, menyebabkan penurunan nilai PWM sesuai dengan persamaan (19) dan mengantisipasi perubahan yang tiba-tiba. Berikut ini adalah gambar diagram blok dari kontrol sistem FWOR.



Gbr. 7. Diagram Blok Sistem Kontrol

IV. VALIDASI, EKSPERIMEN, DISKUSI

A. Eksperimen Kinematik dan Validasi ke Depan

Pada pengujian pertama ini dilakukan untuk menguji seberapa presisi pembacaan koordinat robot dengan menggunakan persamaan forward kinematik dengan menggunakan sensor rotary encoder pada keempat roda penggerakannya. Metode yang digunakan adalah dengan menjalankan robot ke suatu titik koordinat tertentu, kemudian membandingkan pembacaan koordinat tersebut dengan alat ukur yang ada. Tabel I di bawah ini merupakan hasil pengujian yang telah dilakukan.

TABEL I. DATA PENGUJIAN MAJU KINEMATIK

Data Maju Kinematik			Posisi Nyata		
X (mm)	Y (mm)	Judul (°)	X (mm)	Y (mm)	Judul (°)
20	20	0	19	21	0
40	40	10	41	40	11
80	80	45	81	81	46
160	160	90	162	159	90
300	300	180	302	302	181
500	500	270	501	502	271
1000	1000	310	1002	1002	309
2000	2000	30	2004	2005	29
5000	5000	50	5001	5002	50

Sembilan data eksperimen pada data kinematik maju dan posisi nyata tercantum dalam tabel. Data pertama pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (20,20) dengan sudut hadap 0°. Kondisi robot pada posisi real berada pada titik koordinat (19,21) dengan sudut hadap 0°. Data kedua pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (40,40) pada sudut hadap 10°. Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (41,40) dengan sudut hadap 11°.

Data ketiga pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (80,80) pada sudut hadap 45°. Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (81,81) dengan sudut hadap 46°. Data keempat pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (160,160) pada sudut hadap 90°. Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (162,159) dengan sudut hadap 90°.

Data kelima pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (300,300) dengan sudut hadap 180°. Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (302,302) dengan sudut hadap 181°. Keenam data pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (500,500) pada sudut hadap 270°. Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (501,502) dengan sudut hadap 271°.

Data ketujuh pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (1000,1000) dengan sudut hadap 310°. Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (1002,1002) dengan sudut hadap 309°. Data kedelapan pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (2000,2000) pada sudut hadap 30°.

Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (2004,2005) dengan sudut hadap 29°.

Data pertama pada tabel menunjukkan bahwa robot digerakkan dengan data kinematik maju sebesar (5000,5000) dengan sudut hadap 50° . Kondisi robot pada posisi sebenarnya berada pada titik koordinat (5001,5002) dengan sudut hadap 50° . Dari tabel tersebut terdapat sembilan data, dapat dilihat bahwa hasil pembacaan koordinat robot dengan menggunakan persamaan forward kinematik memiliki rata-rata error sebesar 1,67 mm pada koordinat x dan 1,77 mm pada koordinat y serta $0,67^\circ$ pada pembacaan heading robot. Dari data tersebut dapat dikatakan bahwa pembacaan koordinat robot menggunakan persamaan forward kinematik dengan menggunakan 4 buah rotary encoder pada keempat rodanya dapat diimplementasikan dengan sangat baik.

B. Eksperimen dan Validasi Robot Kinematik Terbalik

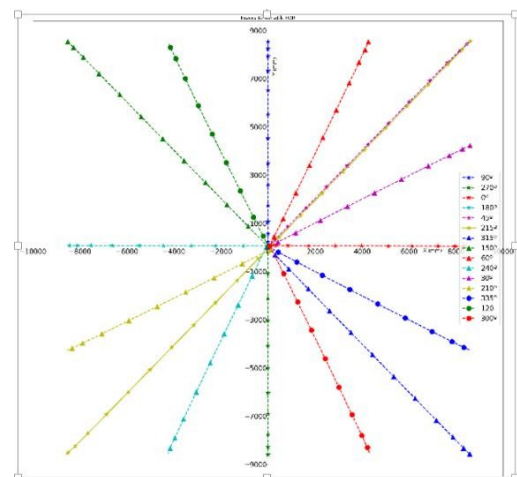
Pada pengujian kedua ini, dilakukan untuk menguji seberapa presisi pergerakan robot terhadap nilai input inverse kinematik. Berikut ini adalah hasil dari pengujian yang telah dilakukan, dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 2. Berdasarkan gambar dan tabel tersebut, dapat dilihat bahwa hasil pengujian yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa dengan menggunakan persamaan inverse kinematik robot dapat digerakkan ke arah tertentu pada koordinat global. Dari beberapa kali pengujian, error terbesar adalah 65 mm pada koordinat X dan 55 mm pada koordinat Y, dengan rata-rata error sebesar 33 mm pada koordinat X dan 28,4 mm pada koordinat Y.

Gbr. 8. Diagram Blok Sistem Kontrol

TABEL II. DATA PENGUJIAN MAJU

KINEMATIK

Target (mm)		Koordinat		Gerakan Robot (mm)		Kesalahan (mm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	8545	0	8538	0	7		
0	-8650	0	-8629	0	55		
8567	53	8534	53	65	0		
-8567	79	08550	77	52	1		
8595	8545	8580	8537	41	27		
-8559	8571	-8572	-8557	52	35		
8595	-8571	8581	-8564	42	28		
-8539	8545	-8529	8540	37	25		
4569	8545	4264	8527	18	50		
-4269	-8571	-4266	-8559	15	44		
8623	4233	8594	4223	61	22		
-8595	-4285	-8574	-4278	55	19		
8595	-4259	8590	-4257	39	13		
-4241	8518	-4235	8497	18	54		
4325	-8544	4322	-8532	15	46		



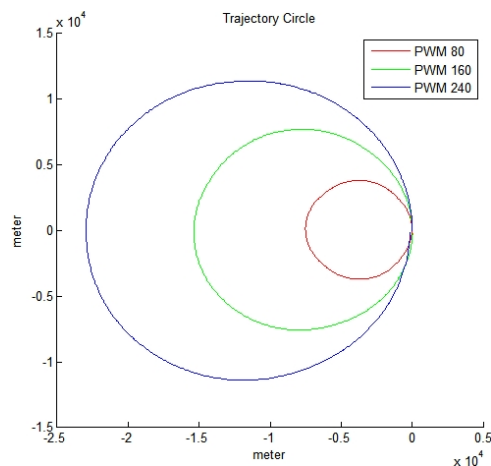
C. Eksperimen Kontrol Pelacakan Lintasan

1) Lingkaran Lintasan

Berdasarkan model kinematik dari ROD. Model kinematik untuk lingkaran lintasan dijelaskan dalam fungsi nonlinier sistem sebagai berikut:

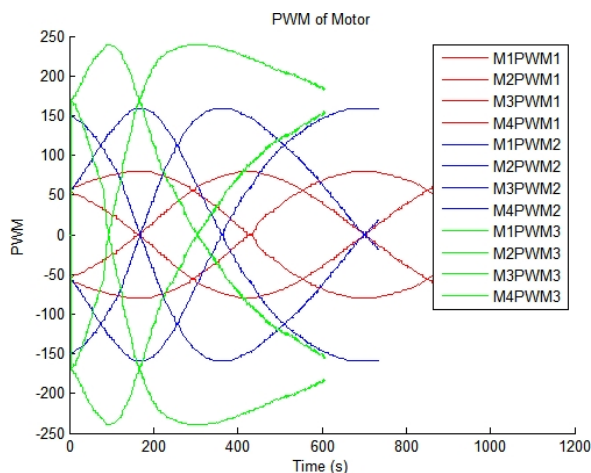
$$\begin{aligned} V_x &= \sin \omega t \text{ (radian)} \\ V_y &= \cos \omega t \text{ (radian)} \\ \dot{\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Hasil dari pengujian lingkaran lintasan yang telah dilakukan ditunjukkan pada Gambar 9. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat tiga kali percobaan pada lingkaran lintasan dengan mengubah variabel kecepatan. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kecepatan PWM 80 ditunjukkan dengan warna biru, kecepatan PWM 160 ditunjukkan dengan warna merah dan kecepatan PWM 240 ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau. Dari ketiga percobaan tersebut, dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kecepatan yang berbeda, gambar lintasan lingkaran tidak menunjukkan adanya kesalahan.



Gbr. 9. Hasil Tes Lingkaran Lintasan

Grafik pengujian PWM untuk lingkaran lintasan ditunjukkan pada Gambar 10. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat 3 data pengujian PWM untuk lingkaran lintasan, masing-masing adalah 80, 160 dan 240. Dari grafik tersebut terlihat bahwa keempat motor diberikan nilai PWM yang sama untuk dapat membentuk lingkaran grafik lintasan.



Grafik uji tatap muka untuk lintasan lingkaran ditunjukkan pada Gambar 10. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat 3 data uji kecepatan tatap muka yang masing-masing memiliki nilai 80, 160, dan 240. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar kecepatan, maka semakin besar pula error arah robot.

Gbr. 11. Hasil Pengujian Robot Pengarah

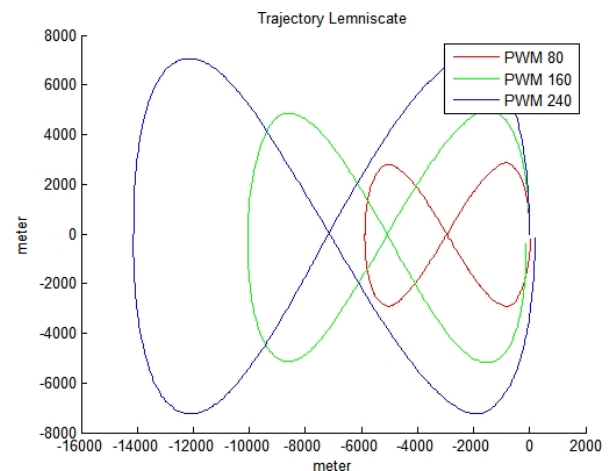
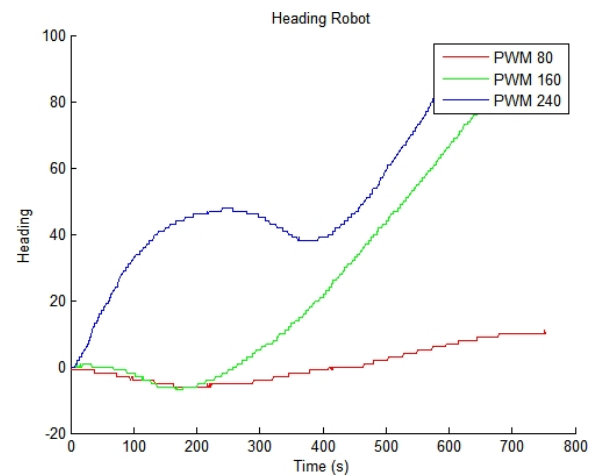
2) Lintasan Lemniscate

Berdasarkan model kinematik dari ROD. Model kinematik untuk lingkaran lintasan dijelaskan dalam fungsi nonlinier sistem sebagai berikut:

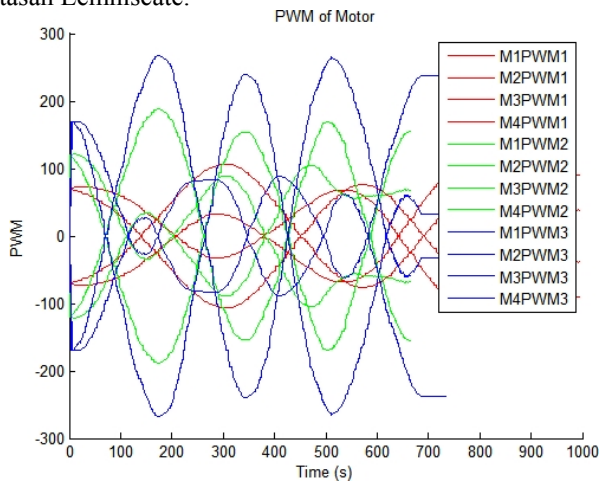
$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= \sin 2x \omega t \text{ (radian)} \\ \dot{V}_y &= \cos \omega t \text{ (radian)} \\ \dot{\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Hasil pengujian lintasan Lemniscate yang telah dilakukan ditunjukkan pada Gambar 12. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat tiga kali percobaan lintasan Lemniscate dengan mengubah-ubah variabel kecepatan. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kecepatan PWM 80 ditunjukkan dengan warna biru, kecepatan PWM 160 ditunjukkan dengan warna merah dan kecepatan PWM 240 ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau. Dari ketiga percobaan tersebut dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kecepatan yang berbeda, gambar lintasan Lemniscate tidak menunjukkan adanya kesalahan.

Gbr. 12. Hasil Uji Lemniscate Lintasan

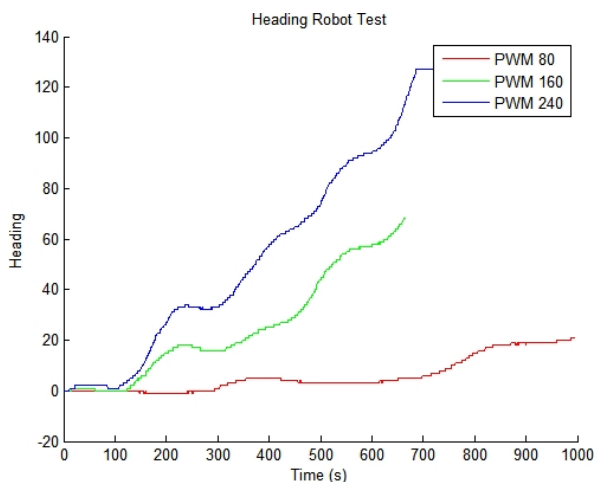


Grafik pengujian PWM untuk lintasan Lemniscate ditunjukkan pada Gambar 13. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat 3 data pengujian PWM untuk lintasan Lemniscate yang masing-masing bernilai 80, 160, dan 240. Dari grafik tersebut terlihat bahwa keempat motor diberikan nilai PWM yang sama untuk dapat membentuk grafik lintasan Lemniscate.



Gbr. 13. PWM dari Hasil Uji Motor Lemniscate

Grafik pengujian tatap muka untuk lintasan Lemniscate ditunjukkan pada Gambar 14. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat 3 data uji hadap kecepatan yang masing-masing memiliki nilai 80, 160, dan 240. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar kecepatan, maka semakin besar pula error arah robot.



Gbr. 14. Hasil Pengujian Robot Menuju Lemniscate

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, implementasi pemodelan kinematik dan odometri pada perencanaan lintasan robot omnidirectional diusulkan untuk mengontrol pergerakan robot omniwheel agar mengikuti lintasan yang diberikan sehingga dapat mengurangi kesalahan pergerakan robot. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa penggunaan sensor odometrik menghasilkan hasil pergerakan yang lebih baik jika dibandingkan dengan hanya menggunakan kontrol kinematik. Selain itu, dengan menggunakan sensor odometri robot dapat mendeteksi nilai koordinat robot, heading robot, kecepatan dan parameter lain yang terkait. Kekurangan yang didapatkan pada

seperti PID atau Fuzzy yang digunakan untuk mengontrol beberapa parameter tersebut, sehingga terjadi perubahan heading robot dari nilai awal pergerakan robot. Untuk penelitian selanjutnya, kontrol seperti fuzzy atau PID akan ditambahkan dengan penambahan sensor IMU untuk meningkatkan kontrol pergerakan robot agar dapat mengontrol nilai kecepatan motor dan heading robot. penelitian ini adalah tidak adanya kontrol

REFERENSI

- [1] P. Van Lam dan Y. Fujimoto, "Tingkat Robotik untuk Bantuan Pemeliharaan Keseimbangan," *IEEE Trans. Ind. Informatika*, vol. 15, no. 7, pp. 3998-4009, Jul. 2019.
- [2] C. Cai, J. Lu, dan Z. Li, "Analisis Kinematik dan Algoritma Kontrol untuk Ballbot," *IEEE Access*, vol. 7, hlm. 38314-38321, 2019.
- [3] W. Li dan R. Xiong, "Penghindaran Rintangan Dinamis dari Manipulasi Bergerak yang Terkendala Tugas Menggunakan Kontrol Prediktif Model," *IEEE Access*, vol. 7, hlm. 88301-88311, 2019.
- [4] M. Ferro, A. Paolillo, A. Cherubini, dan M. Vendittelli, "Navigasi Berbasis Visi Robot Bergerak Omnidirectional," *IEEE Robot. Autom. Lett.* vol. 4, no. 3, pp. 2691-2698, Jul. 2019.
- [5] T. Terakawa, M. Komori, K. Matsuda, dan S. Mikami, "Robot Bergerak Omnidirectional Baru dengan Roda yang Terhubung dengan Sambungan Geser Pasif," *IEEE/ASME Trans. Mekatronika*, vol. 23, no. 4, Hal. 1716-1727, Agustus 2018.
- [6] B. A. Gebre dan KV Pochiraju, "Desain dan Analisis Berbantuan Pembelajaran Mesin dari Penggerak Bola Berpasangan Magnetis yang Baru," *IEEE/ASME Trans. Mekatronika*, vol. 24, no. 5, pp. 1942-1953, Oktober 2019.
- [7] P. Shen, X. Zhang, dan Y. Fang, "Perencanaan Lintasan Lengkap dan Waktu-Optimal Dengan Kendala Torsi dan Kecepatan: Teori dan Aplikasi," *IEEE/ASME Trans. Mekatronika*, vol. 23, no. 2, hal. 735-746, Apr. 2018.
- [8] M. A. Al Mamun, M. T. Nasir, dan A. Khayyat, "Sistem Tertanam untuk Kontrol Gerak Robot Bergerak Omnidirectional," *IEEE Access*, vol. 6, no. 8, hal. 6722-6739, 2018.
- [9] Y. Fei dan H. Xu, "Pemodelan dan Kontrol Gerak Robot Lunak," *IEEE Trans. Ind. Elektron*, vol. 64, no. 2, pp. 1737-1742, Feb. 2017.
- [10] M. Thor dan P. Manoonpong, "Mekanisme Adaptasi Frekuensi Online yang Cepat untuk Kontrol Gerak Robot Berbasis CPG," *IEEE Robot. Autom. Lett.* vol. 4, no. 4, pp. 3324-3331, Oct. 2019.
- [11] B. Ren, Y. Wang, dan J. Chen, "Kontrol Lintasan Waktu Berhingga yang Kuat dengan Mode Geser Orde Tinggi untuk Kerja Sama Manusia-Robot," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 130874-130882, 2019.
- [12] H. Chang, S. J. Kim, and J. Kim, "Kontrol Gerak Feedforward Dengan Aktuator Kekakuan Variabel yang Terinspirasi oleh Kinematika Otot Cross-Bridge," *IEEE Trans. Robot*, vol. 35, no. 3, pp. 747-760, Jun. 2019.
- [13] J. Chi, H. Yu, dan J. Yu, "Kontrol Pelacakan Hibrida Robot SCARA 2-DOF melalui Port-Controlled Hamiltonian dan Backstepping," *IEEE Access*, vol. 6, hal. 17354-17360, 2018.
- [14] F. Angelini dkk., "Kontrol Pelacakan Lintasan Terdesentralisasi untuk Robot Lunak yang Berinteraksi dengan Lingkungan," *IEEE Trans. Robot*, vol. 34, no. 4, pp. 924-935, Aug. 2018.
- [15] L. Ge, H. Wang, dan J. Xing, "Kontrol gerak robot pemeliharaan berdasarkan pengenalan gerakan Kinect," *J. Eng.*, vol. 2019, no. 23, hlm. 8794-8796, Des. 2019.
- [16] S. Verma, D. Shen, dan J. Xu, "Kontrol Gerak Ikan Robotik Dalam Kondisi Lingkungan yang Dinamis Menggunakan Pendekatan Kontrol Adaptif," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 43, no. 2, hal. 381-390, Apr. 2018.
- [17] A. Magassouba, N. Bertin, dan F. Chaumette, "Mengeksploitasi Informasi Jarak Perbedaan Level Interaural untuk Kontrol Gerak Robot Binaural," *IEEE Robot. Autom. Lett.* vol. 3, no. 3, pp. 2048-2055, Jul. 2018.
- [18] H. Ashrafiuon, S. Nersesov, dan G. Clayton, "Kontrol Pelacakan Lintasan dari Kendaraan Tak Bergerak Planar," *IEEE Trans. Automat. Contr.* vol. 62, no. 4, pp. 1959-1965, Apr. 2017.
- [19] Q. Zheng, Y. He, X. Qi, P. Zhang, Y. Hu, dan B. Li, "Kontrol Gerak Pelacakan Keamanan Berdasarkan Perlengkapan Virtual Terlarang dalam Bedah Hidung Berbantuan Robot," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, hal. 44905-44916, 2018.

- [20] Z. Sun, Y. Xia, L. Dai, K. Liu, dan D. Ma, "Disturbance Rejection MPC untuk Pelacakan Robot Beroda," *IEEE/ASME Trans. Mekatronika*, vol. 22, no. 6, hal. 2576-2587, Des. 2017.
- [21] D. Nakhaeinia, P. Payeur, dan R. Laganier, "Sistem Kontrol Gerak Pengalihan Mode untuk Interaksi Reaktif dan Pengikutan Permukaan Menggunakan Robot Industri," *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, vol. 5, no. 3, pp. 670-682, Mei 2018.
- [22] Z. Zhang, J. Dequidt, J. Back, H. Liu, dan C. Duriez, "Kontrol Gerak Robot Kateter Kontinum yang Digerakkan dengan Kabel Melalui Kontak," *IEEE Robot. Autom. Lett.* vol. 4, no. 2, pp. 1852-1859, Apr. 2019.
- [23] Y. Huang, DM Pool, O. Stroosma, dan Q. Wu, "Kontrol Gerak Robot Hidraulik Langkah Panjang Dengan Inversi Dinamis Nonlinier Bertahap," *IEEE/ASME Trans. Mekatronika*, vol. 24, no. 1, hal. 304-314, Februari 2019.
- [24] J. Yu, Z. Wu, Z. Su, T. Wang, dan S. Qi, "Strategi Kontrol Gerak untuk Lumba-lumba Robotik yang Melompat Berulang," *IEEE/ASME Trans. Mekatronika*, vol. 24, no. 3, pp. 913-923, Jun. 2019.
- [25] M. Bjelonic dkk., "Kontrol dan Perencanaan Gerak Seluruh Tubuh untuk Robot Quadrapedal Beroda," *IEEE Robot. Autom. Lett.* vol. 4, no. 2, pp. 2116-2123, Apr. 2019.
- [26] T. Salumae, A. Chemori, dan M. Kruusmaa, "Kontrol Gerak Robot Bawah Air Sirip Empat Biomimetik yang Melayang," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 54-71, Jan. 2019.
- [27] R. A. S. Fernandez, Z. Milosevic, S. Dominguez, dan C. Rossi, "Kontrol Gerak Robot Penyelajah Tambang Bawah Air UX-1: Uji Coba Lapangan," *IEEE Access*, vol. 7, hlm. 99782-99803, 2019.
- [28] H. Chang, S. Wang, dan P. Sun, "Karakteristik Pendaratan Omniwheel dan Kontrol Jenuh Adaptif untuk Robot Pendukung Manusia," *IEEE Access*, vol. 6, hlm. 51174-51186, 2018.