

Pemodelan dan simulasi kinematika robot *swerve* 4 roda

Indrazno Siradjuddin¹, Sapto Wibowo², Arta Ainur Rofiq³

e-mail: indrazno.sirajudin@polinema.ac.id¹, sapto.wibowo@polinema.ac.id², arta.ainur@polinema.ac.id³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 26 Juli 2021

Direvisi 9 November 2021

Diterbitkan 29 April 2022

Kata kunci:

Kinematika

Pergerakan

Robot Respon Sistem

ABSTRAK

Pemodelan kinematika berperan penting dalam mengontrol perpindahan robot. Perpindahan robot tidak semata menentukan koordinat awal dan akhir, tetapi juga menentukan kecepatan masing-masing motor yang dibutuhkan untuk mencapai posisi yang diinginkan. Pada penelitian ini, pengembangan algoritma kontrol kinematika untuk mengontrol pergerakan diterapkan pada robot *swerve* 4 roda. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara pergerakan robot dengan kecepatan aktuator pada ruang 2 dimensi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *motion rigid body analysis*. Metode ini digunakan untuk menganalisis hubungan antara pergerakan robot dengan kecepatan aktuator kemudian, diimplementasikan pada posisi tujuan yang bersifat diam dan bergerak. Skenario pengujian dilakukan untuk memvalidasi performa dari kontrol algoritma yang ditawarkan dengan cara simulasi, dimana berbantuan bahasa pemrograman python. Hasil simulasi yang ditampilkan bahwa, robot dapat bergerak dari posisi awal menuju posisi tujuan baik pada target diam maupun bergerak. Target diam, robot mampu bergerak dengan membentuk jalur secara linier menuju posisi rujukan dan target bergerak, robot mampu bergerak dengan membentuk jalur dengan pola angka delapan. Dari hasil simulasi tersebut didapatkan bahwa, efektivitas dari metode *rigid body analysis* mampu mengatasi permasalahan yang ditawarkan dimana robot mampu bergerak menuju target yang diam dan bergerak dengan pemodelan kinematika yang telah dirancang.

ABSTRACT

Kinematic modeling plays an important role in controlling movement of the robot. Movement of the robot not only determines the start and end coordinates, but also determines the speed of each motor needed to reach the desired position. In this research, the development kinematic control algorithm to control movement of 4-wheel swerve robot. This aims to determine the relationship between the movement of the robot with the speed of the actuator in 2 dimensional space. The method used in this research is motion rigid body analysis. This method is used to analyze the relationship between movement robot with speed of the actuator then, implemented at the destination position which is static and dynamic. The test scenario was carried out to validate the performance of the control algorithm offered by simulation, which was assisted by the python programming language. The simulation results show that the robot can move from its initial position to its destination position, both on static and dynamic targets. The target is static, the robot is able to move by forming a linear path to the target position and the target is dynamic, the robot is able to move by forming a path with a figure eight pattern. From the simulation results, it was found that the effectiveness of the rigid body analysis method was able to overcome the problems offered. Where the robot is able to move towards a static and dynamic target with the kinematics modelling that has been designed.

Keywords:

Kinematics

Movement

Robot Respons System

Penulis Korespondensi:

Indrazno Siradjuddin,
 Jurusan Teknik Elektro,
 Politeknik Negeri Malang,
 Jl. Sukarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia.
 Email: indrazno.sirajudin@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

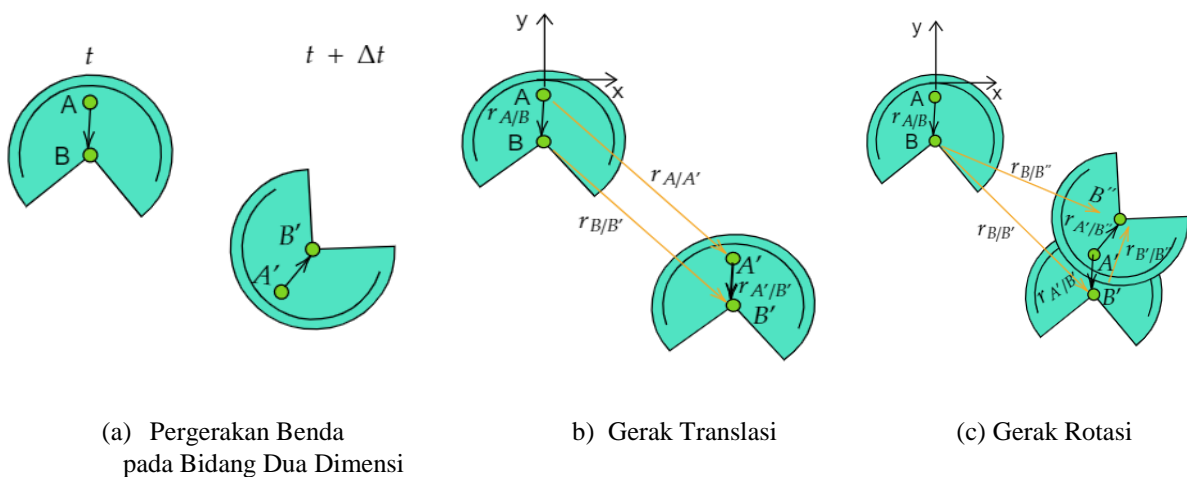
Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai kontrol robotika dan kemampuan manuver pada robot beroda mendapatkan perhatian yang lebih dalam ranah ilmiah[1][2]. Khususnya pada robot beroda dengan struktur penggerak dan kemudi secara terpisah pada masing-masing roda (*robot swerve*). (*Robot swerve*) dalam dunia internasional juga mempunyai nama lain yaitu *Wheel independent drive and independent steering* (WIDWIS)[13]. Penggerak berfungsi sebagai pengatur kecepatan roda sedangkan kemudi sebagai arah hadap roda[8][12]. Penelitian ini berfokus pada pemodelan kinematika robot dengan empat roda, dimana penggerak dan kemudi masing-masing berjumlah 4 buah. Tujuan utama dari makalah ini adalah menyajikan pemodelan kinematika guna mengontrol respon sistem dari robot tersebut.

Robot jenis ini memiliki tingkat kesukaran yang tinggi dalam mengontrol kestabilan gerakan. Hal ini dikarenakan setiap roda mampu mengemudi, menyetir dan mengerem secara mandiri [3][4]. Radius kemudi pastinya lebih besar dikarenakan kemudi tidak hanya pada roda depan saja melainkan roda belakang juga ikut bergerak[10]. Semakin banyak bagian yang perlu dikontrol, secara otomatis memunculkan juga banyak titik buta [9][11]. Sehingga diperlukan peningkatan kemampuan kontrolnya [5][6]. Oleh karena itu hal yang mendasar yang harus dilakukan untuk merancang pengontrol robot tersebut ialah menentukan formulasi Pemodelan kinematikanya[7][8] [9].

Pengembangan Pemodelan kinematika digunakan untuk mengontrol pergerakan dari robot ini, kontrol tersebut diuji guna mengetahui respon sistemnya ketika robot bergerak ke posisi tujuan dimana posisi tujuan bersifat statis (diam) maupun dinamis (bergerak). Hasil respon sistem yang akan ditampilkan pada ujicoba tersebut meliputi : eror pergerakan robot, kontrol kecepatan putar roda, kontrol kemudi roda dan perpindahan bodi robot. Berdasarkan penjabaran sebelumnya, penelitian ini berisikan adalah (i) Latar belakang yang mendasari pengembangan penelitian mengenai kontrol kinematik pada robot swerve. (ii) Konfigurasi pemodelan kinematik untuk mengontrol pergerakan robot. (iii) Hasil dan pembahasan, dimana penelitian ini sampai batas simulasi. (iv) Kesimpulan. (v). Daftar pustaka.

2.1 Algoritma Perpindahan dan Pergerakan Benda pada Bidang 2 Dimensi

Pemodelan kontrol kinematika robot merupakan perenapan dari konsep algoritma gerak dan perpindahan benda pada bidang dua dimensi. Perpindahan yang dilakukan melibatkan dua hal yaitu perpindahan secara translasi dan rotasi. Perpindahan benda pada bidang dua dimensi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perpindahan Benda pada Bidang Dua Dimensi

Pergerakan benda pada bidang dua dimensi ditunjukkan pada gambar 1(a). Perpindahan benda melibatkan gerak translasi dan rotasi pada interval waktu ke-t hingga waktu ke-t + Δt. Pada gambar tersebut

diibaratkan terdapat 2 titik sebagai acuan dimana bersifat tetap yaitu titik A dan titik B. Jarak titik A dan titik B disimbolkan dengan $r_{A/B}$. Pada Gambar 1(b) benda berpindah posisi secara translasi, sehingga arah hadap tidak mengalami perubahan. Ketika benda berpindah posisi maka secara otomatis titik acuan pun berubah juga. Titik acuan A dan B berubah menjadi titik acuan A' dan B' . Persamaan dari Gambar 1 dan Gambar 2 ditunjukkan pada persamaan (1) dan persamaan (2).

$$r_{A/B} = r_{A'/B'} \quad (1)$$

$$r_{A/A'} = r_{B/B'} \quad (2)$$

Pada Gambar 1(c), benda bergerak dengan cara merubah arah hadap (rotasi). Dimisalkan benda tersebut sebagai robot beroda dan pergerakan dari robot beroda berotasi pada sumbu Z sebesar ω . Persamaan dari Gambar 1(c) ditunjukkan pada persamaan (3).

$$r_{B/B''} = r_{B/B'} + r_{B'/B''} \quad (3)$$

Untuk menentukan perubahan kecepatan, perlu dilakukan penurunan turunan terhadap waktu. Persamaan penurunan waktu ditunjukkan pada persamaan (4) dan persamaan (5) merupakan persamaan kecepatan perubahan posisi pada bidang tersebut.

$$\frac{dr_{B/B''}}{dt} = \frac{dr_{B/B'}}{dt} + \frac{dr_{B'/B''}}{dt} \quad (4)$$

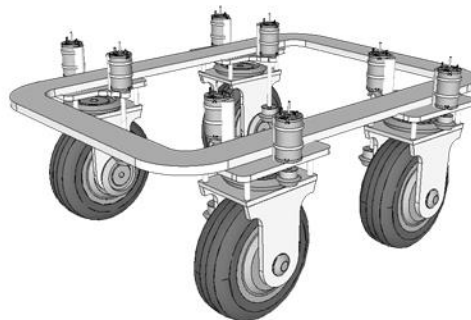
$$V_{B/B''} = V_{B/B'} + V_{B'/B''} \quad (5)$$

$V_{B/B'}$ dan $V_{B'/B''}$ mewakili perubahan kecepatan dari titik B ke titik B' dan ke B'' . Sedangkan $V_{B'/B''}$ menunjukkan perpindahan kecepatan relatif dari titik B' ke B'' dengan referensi sumbu putar pada titik A' , maka persamaan (5) dapat dipecah dan ditunjukkan pada persamaan (6).

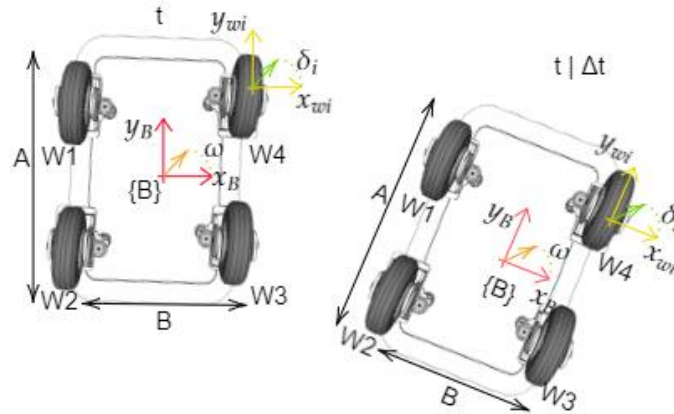
$$V_{B/B''} = V_{B/B'} + \omega \times r_{B'/B''} \quad (6)$$

2.2 Pemodelan Kinematika Robot Berdasarkan pada Algoritma Perpindahan Benda pada Bidang 2 Dimensi

Pemodelan kinematik pada robot beroda diperuntukan menghitung rotasi sumbu Z tanpa memperhatikan rotasi dari sumbu X dan Y. Karena secara umum, robot beroda tidak bisa melakukan gerak rotasi sumbu X dan Y. Desain robot *swerve* dalam bentuk 3 dimensi ditunjukkan pada Gambar 2 dan Konfigurasi geometris robot *swerve* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Desain robot *swerve*



Gambar 3. Perpindahan Posisi Robot pada Bidang Dua Dimensi

Berikut ini merupakan keterangan dari Gambar 3.

- r = $(x, y, z)^T$ - Mewakili vektor posisi koordinat terhadap koordinat x, y, z .
- θ = $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)^T$ - Mewakili sudut angular terhadap koordinat x, y, z .
- x = $(r, \theta)^T$ - Mewakili vektor posisi dan arah hadap robot.
- v = $(v_x, v_y, v_z)^T$ - Mewakili vektor kecepatan translasi.
- ω = $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ - Mewakili vektor kecepatan rotasi.
- ξ = $(v, \omega)^T$ - Mewakili vektor kecepatan.

Perpindahan bodi robot secara keseluruhan, dimana titik tengah robot digunakan sebagai acuan disimbolkan dengan $\{B\}$. Koordinat roda ke- i disimbolkan dengan $\{W_i\}$ dimana titik tengah roda tersebut memiliki posisi $(x_{W/B}, y_{W/B})^T$. Kecepatan roda ke- i terhadap badan robot yaitu $V_{W/B} = (\dot{x}_{W/B} \quad \dot{y}_{W/B} \quad \dot{z}_{W/B})$ dituliskan pada persamaan (7).

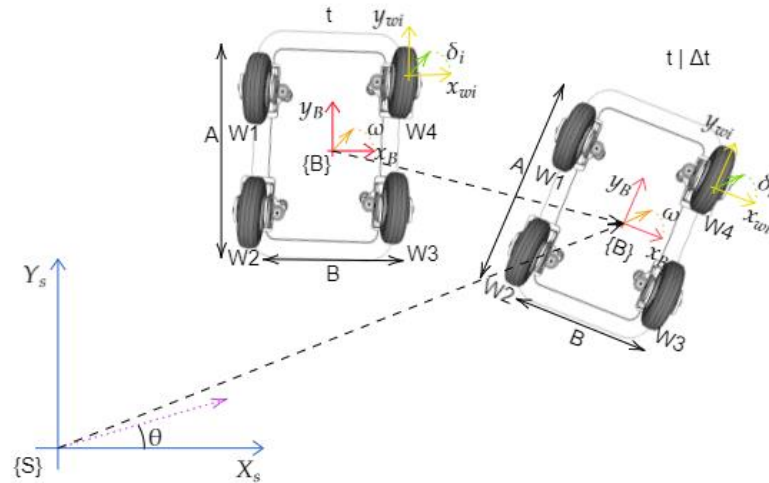
$$V_{W/B} = V_{B/B} + \omega \times r_{W/B} \tag{7}$$

$V_{B/B} = (\dot{x}_{B/B} \quad \dot{y}_{B/B} \quad \dot{z}_{B/B})^T$ menunjukkan kecepatan bodi robot terhadap koordinat robot itu sendiri. Hasil perkalian matriks ruas sebelah kanan ditunjukkan pada persamaan (8).

$$\omega \times r_{W/B} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x_i & y_i & z_i \end{vmatrix} \tag{8}$$

Seperti pada pembahasan sebelumnya, pergerakan robot beroda pada ruang dua dimensi berorientasi pada sumbu Z, maka $\omega = (0 \quad 0 \quad \omega_z)^T$. Serta diasumsikan robot tidak mampu melakukan translasi terhadap sumbu Z, maka persamaan (7) dapat diserahkan dan ditunjukkan pada persamaan (9). Selanjutnya pergerakan keseluruhan dari bodi robot terhadap lingkungan atau titik acuan globalnya dinamakan *frame* global dan disimbolkan $\{S\}$ dan ditunjukkan pada Gambar 4.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{W/B} \\ \dot{y}_{W/B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_{B/B} \\ \dot{y}_{B/B} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -y_{Wi} \omega_z \\ x_{Wi} \omega_z \end{pmatrix} \tag{9}$$



Gambar 4. Body twist Velocity dan Spatial Twist Velocity

Untuk mendapatkan persamaan kecepatan robot terhadap *frame* global, perlu dikalikan kecepatan robot dengan matriks rotasi $H_{B/S}$. Perkalian tersebut ditunjukkan pada persamaan (10).

$$\xi_{B/S} = H_{B/S} \xi_{B/B} \quad (10)$$

$$= \begin{pmatrix} R_{B/S} & 0 \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{B/B} \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$= \underbrace{\begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Spatial Twist Velocity}} \begin{pmatrix} \dot{x}_{B/B} \\ \dot{y}_{B/B} \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

$R_{B/S}$ merupakan matriks rotasi 2 dimensi, θ merupakan sudut yang terbentuk antara sumbu X *frame* global {S}, sumbu X *frame* robot {B} dan ω_z merupakan kecepatan angular terhadap sumbu Z. Kecepatan angular ketika robot bergerak disimbolkan $\dot{\theta}$. Banyak literatur dalam bidang robotika menyebutkan $\xi_{B/S}$ merupakan *spatial twist velocity*. Pemodelan kinematika ini bertujuan untuk mendapatkan persamaan *invers* kinematiknya, dimana dari persamaan tersebut didapatkan kecepatan putar yang dibutuhkan untuk masing-masing roda. Untuk mendapatkan persaaam *invers* kinematiknya ditunjukkan pada Persamaan (13).

$$\xi_{B/B} = H_{B/B}^{-1} \xi_{B/S} \quad (13)$$

$$= \begin{pmatrix} R_{B/S}^{-1} & 0 \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{B/S} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$= \underbrace{\begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{body twist velocity}} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Persamaan (15) dikenal sebagai persamaan *body twist velocity*, merupakan kecepatan absolut dimana telah dibahas pada bab-bab sebelumnya. Selain itu $R_{B/S}^{-1} V_{B/S}$ merupakan kecepatan absolut dari robot terhadap *frame* tubuhnya sendiri yaitu $V_{B/B}$. Sehingga dapat disubstitusikan menjadi persamaan (16).

$$V_{W/B} = R_{B/S}^{-1} V_{B/S} + \omega \times r_{W/B} \quad (16)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -y_{wi} \omega_z \\ x_{wi} \omega_z \end{pmatrix} \quad (17)$$

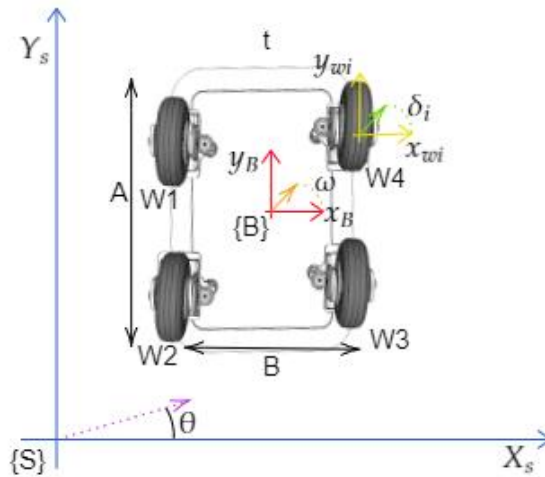
Mengacu pada persamaan (17), untuk memperoleh paramater dari *body twist velocity* secara total. bisa menggunakan persamaan (18).

$$V_{W/B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -y_i \\ 0 & 1 & x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Vektor kecepatan roda dengan konfigurasi roda ke-1 sampai ke-N ditunjukkan pada persamaan (19).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{w1/B} \\ \dot{y}_{w1/B} \\ \dot{x}_{w2/B} \\ \dot{y}_{w2/B} \\ \vdots \\ \dot{x}_{wN/B} \\ \dot{y}_{wN/B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_1 \\ 0 & 1 & x_1 \\ 1 & 0 & -y_2 \\ 0 & 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -y_N \\ 0 & 1 & x_N \end{bmatrix} H_{B/S}^{-1} \begin{pmatrix} \dot{x}_{B/S} \\ \dot{y}_{B/S} \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (19)$$

Konfigurasi koordinat *frame* robot *swerve* 4 roda ditunjukkan pada Gambar 5. *Frame* bodi robot ditempatkan pada titik tengah robot. *a* dan *b* dinotasikan sebagai panjang dan lebar dari bodi robot. kemudian *frame* roda ditempatkan pada titik tengah roda dan dinotasikan sebagai $(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4)$.



Gambar 5. Konfigurasi Koordinat *Frame* Robot *Swerve* 4 Roda

komputasi dari Gambar 5 ditunjukkan pada persamaan (20).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{w1/B} \\ \dot{y}_{w1/B} \\ \dot{x}_{w2/B} \\ \dot{y}_{w2/B} \\ \dot{x}_{w3/B} \\ \dot{y}_{w3/B} \\ \dot{x}_{w4/B} \\ \dot{y}_{w4/B} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & -b/2 \\ 0 & 1 & a/2 \\ 1 & 0 & -b/2 \\ 0 & 1 & -a/2 \\ 1 & 0 & b/2 \\ 0 & 1 & -a/2 \\ 1 & 0 & b/2 \\ 0 & 1 & a/2 \end{bmatrix}}_{G(\theta)} H_{B/S}^{-1} \begin{pmatrix} \dot{x}_{B/S} \\ \dot{y}_{B/S} \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (20)$$

Kontrol sudut kemudi dinotasikan sebagai α_i dan translasi kecepatan roda dinotasikan sebagai u_i . Komputasi tersebut ditunjukkan pada persamaan (21) dan persamaan (22).

$$\alpha_i = \arctan \frac{\dot{y}_{wi}}{\dot{x}_{wi}} \quad (21)$$

$$u_i = \sqrt{(\dot{x}_{wi})^2 + (\dot{y}_{wi})^2} \quad (22)$$

Kontrol kecepatan sudut angular untuk setiap aktuaktor dinotasikan sebagai ω_i dan r merupakan radius roda dimana semua roda diasumsikan berukuran sama. Komputasi ω_i ditunjukkan pada persamaan (23).

$$\omega_i = \frac{u_i}{r} \quad (23)$$

2.3 Algoritma Hukum Kontrol

Error berfungsi menentukan selisih jarak antara posisi awal (x) dengan posisi tujuan (x^*). $x = (x, y, \theta)^T$ dan $x^* = (x^*, y^*, \theta^*)^T$. Komputasi error ditunjukkan pada persamaan (24).

$$e(t) = x(t) - x^*(t) \quad (24)$$

Kontrol kinematika dirancang untuk menerunkan nilai error $\|e(t)\|$ berkurang secara eksponensial. Komputasi penurunan error secara eksponensial ditunjukkan pada persamaan (25).

$$\frac{de(t)}{dt} = -\lambda e(t) \quad (25)$$

λ merupakan konstanta positif yang menyatakan laju penurunan error secara eksponensial. Turunan pertama dari persamaan (21) ditunjukkan pada persamaan (26).

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} - \frac{dx^*(t)}{dt} \quad (26)$$

Mensubstitusikan persamaan (26) ke persamaan (25) dan persamaan (24), mengasumsikan bahwa $\frac{dx^*(t)}{dt} = 0$. Nilai 0 didapatkan karena posisi tujuan bersifat diam (statis) sehingga tidak mengalami perubahan terhadap waktu dan komputasi tersebut ditunjukkan pada persamaan (27).

$$\xi_{B/S} = -\lambda (x - x^*) \quad (27)$$

Catatan $\frac{dx(t)}{dt}$ merupakan *spatial velocity* dimana juga dinotasikan sebagai $\xi_{B/S} = (\dot{x}_{B/S}, \dot{y}_{B/S}, \omega_z)^T$. *Invers velocity kinematics* bisa dikomputasikan dengan cara mensubstitusikan persamaan (27) dengan persamaan (20) dan ditunjukkan pada persamaan (28).

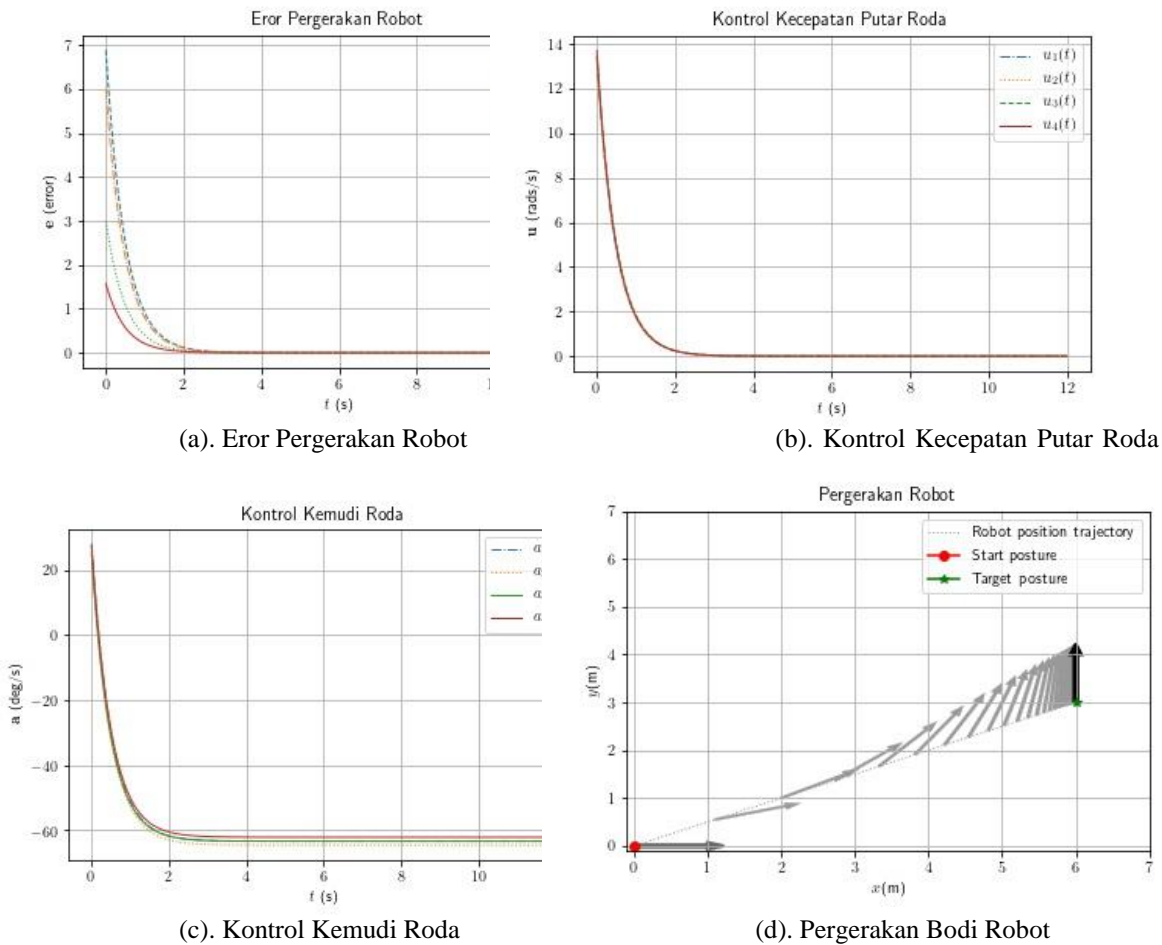
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{w1/B} \\ \dot{y}_{w1/B} \\ \dot{x}_{w2/B} \\ \dot{y}_{w2/B} \\ \dot{x}_{w3/B} \\ \dot{y}_{w3/B} \\ \dot{x}_{w4/B} \\ \dot{y}_{w4/B} \end{bmatrix} = \lambda G(\theta)(x^*(t) - x(t)) \quad (28)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil simulasi pemodelan kinematika pada robot *swerve*, hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik. Pengujian respon kontrol dilakukan pada tujuan diam (statis) maupun bergerak (dinamis).

3.1 Hasil dan Pembahasan Simulasi dengan Target Diam (Statis)

Simulasi pada target diam dan dilakukan pada selang waktu 0 sampai 12 detik, dengan sampling waktu 0,01 detik. Untuk posisi awal ditentukan pada koordinat (0:0; 0:0; 0°) dan posisi akhir ditentukan pada koordinat (3:0; 6:0; 90°). Hasil yang ditampilkan meliputi : (a) error pergerakan robot, (b) kontrol kecepatan roda, (c) kontrol kemudi roda, (d) pergerakan bodi robot. Hasil respon kontrol pergerakan robot pada target diam ditunjukkan pada Gambar 6.

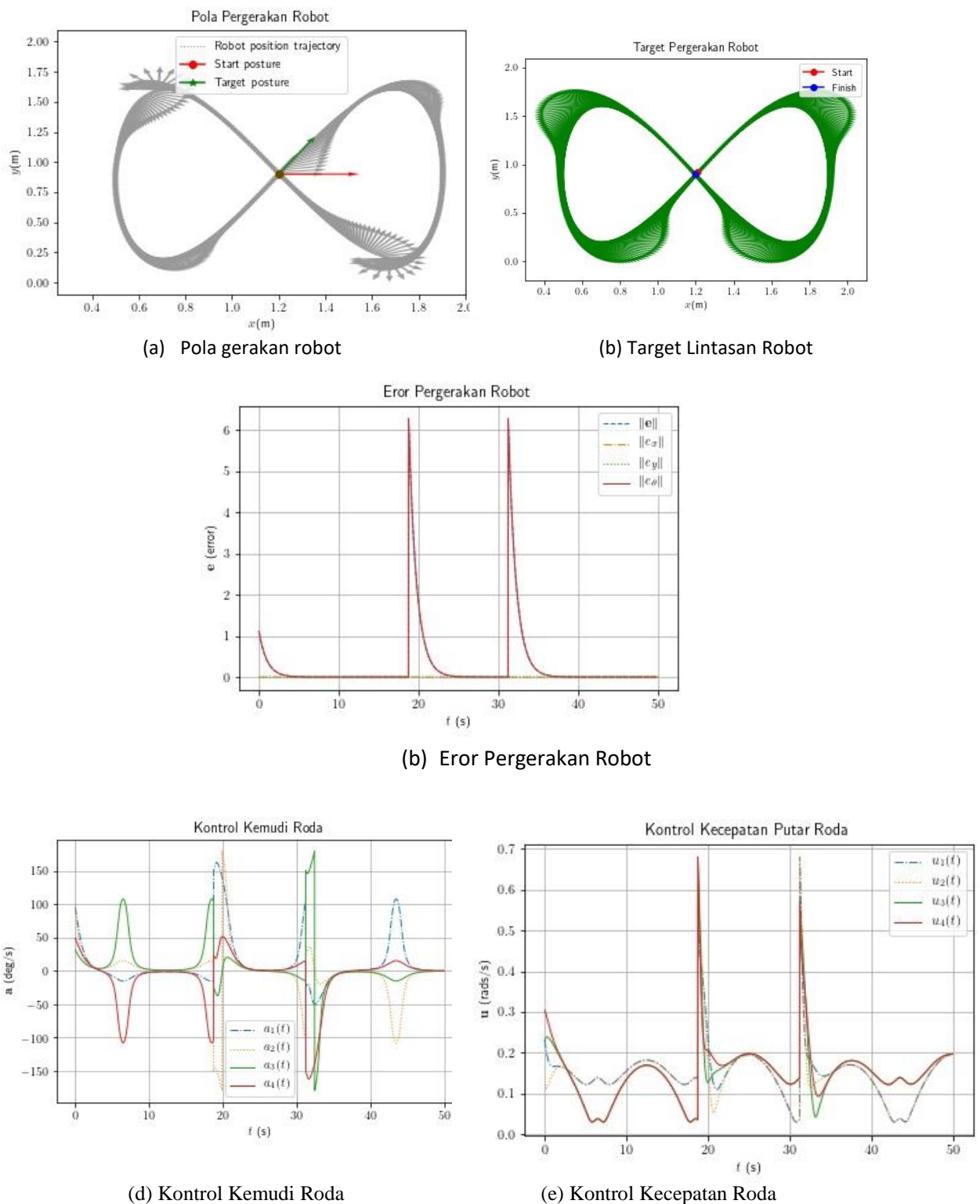


Gambar 6. Hasil Respon Kontrol Pergerakan Robot pada Target Diam

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat dilihat pada bagian (a) ketika robot bergerak dari posisi awal sampai ke posisi tujuan, robot membutuhkan waktu sekitar 12 detik dimana kesalahan sudah bernilai 0. Hasil yang ditampilkan berupa grafik dan eror mengalami penurunan secara eksponensial seperti yang direncanakan. Bagian (b) menampilkan grafik dari kecepatan putar roda dengan menotasikan roda ke-1 sampai dengan ke-4 sebagai u_i sampai dengan u_4 . Kecepatan putar setiap motor tinggi ketika jauh dari posisi tujuan. Ketika mendekati posisi tujuan, kecepatan putar motor akan turun dan setelah sampai diposisi tujuan kecepatan putar robot bernilai 0 atau berhenti. Bagian (c) menampilkan grafik dari kontrol kemudi roda dengan menotasikan kemudi roda ke-1 sampai dengan ke-4 sebagai a_i sampai dengan a_4 . Kontrol kemudi roda hampir sama dengan Kecepatan putar roda, yang membedakan adalah besarnya derajat kemudi dengan kecepatan putar roda. Bagian (d) menampilkan grafik pergerakan robot dari koordinat awal (diwakili titik merah disertai dengan arah panah warna abu-abu), menuju posisi tujuan (diwakili tanda bintang disertai dengan arah panah warna hijau). Untuk proses perubahan posisi dan arah hadapnya (diwakili arah panah warna abu-abu).

3.2. Hasil dan Pembahasan Simulasi dengan Target Bergerak

Simulasi pada targer bergerak dilakukan pada selang waktu 0 sampai 12 detik, dengan sampling waktu 0,01 detik. Untuk posisi awal ditentukan pada koordinat (0:0; 0:0; 0°) dan posisi akhir tidak ditentukan pada koordinat tertentu karena posisi yang tujuan selalu bergerak sehingga menghasilkan rute gerak dari robot tersebut. Hasil yang ditampilkan meliputi : (a) pola gerakan robot, (b) target lintasan robot, (c) eror pergerakan robot, (d) kontrol kemudi roda, (e) kontrol kecepatan roda. Hasil respon kontrol pergerakan robot pada target bergerak ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil respon kontrol pergerakan robot pada target bergerak

Berdasarkan hasil percobaan ini, robot dirancang untuk bergerak mengikuti posisi tujuan (\hat{x}^*) yang bergerak dengan pola angka delapan (8). Dimana pada simulasi tersebut mewakili kecepatan perpindahan dari \dot{x}^* , \dot{y}^* dan $\dot{\theta}^*$. Untuk nilai dari \dot{x}^* , \dot{y}^* tidak memenuhi masalah, menyisahkan $\dot{\theta}^*$ yang menjadi masalah. Untuk menentukan nilai perubahan kecepatan terhadap arah hadap ($\dot{\theta}^*$) ditunjukkan pada persamaan (29).

$$\dot{\theta}^* = \arctan(\dot{x}^*(t) + \dot{y}^*(t)) \quad (29)$$

Perununan $\dot{\theta}^*$ tidak bernilai 0 seperti pada percobaan target tujuan yang diam. Hal ini dikarenakan target tidak diam seperti pada percobaan sebelumnya. Penurunan dari persamaan (29) ditunjukkan pada persamaan (30).

$$\dot{\theta}^* = \frac{\partial \dot{\theta}^*}{\partial \dot{x}^*} \frac{d\dot{x}^*}{dt} + \frac{\partial \dot{\theta}^*}{\partial \dot{y}^*} \frac{d\dot{y}^*}{dt} \quad (30)$$

$$= \frac{\dot{x}^* \dot{y}^* - \dot{y}^* \dot{x}^*}{\dot{x}^* + \dot{y}^*} \quad (31)$$

Sebuah komputasi yang kompleks dibutuhkan untuk mengekstraksi fitur target dari lingkungan robot yang diperlukan. Dalam penelitian ini, disebutkan bahwa pengaplikasian robot secara real-time tidak bisa dilakukan dan target lintasan gerakan dihasilkan secara numerik. Target lintasan untuk robot beroda didefinisikan pada persamaan (32) dan persamaan (33).

$$x^*(t) = \begin{cases} 2 \cos(2 \pi t) \\ 1.2 + 0.7 \sin(2 \pi t) \end{cases} \quad (32)$$

$$y^*(t) = \begin{cases} 2 \sin(2 \pi t) \\ 0.9 + 0.7 \sin(4 \pi t) \end{cases} \quad (33)$$

Perununan pertama target lintasan ditunjukkan pada persamaan (34) dan (35).

$$\dot{x}^*(t) = \begin{cases} -4 \pi \sin(2 \pi t) \\ 1.4 \pi \cos(2 \pi t) \end{cases} \quad (34)$$

$$\dot{y}^*(t) = \begin{cases} 2 \cos(2 \pi t) \\ 2.8 \cos(4 \pi t) \end{cases} \quad (35)$$

Perununan kedua target lintasan ditunjukkan pada persamaan (36) dan (37).

$$\ddot{x}^*(t) = \begin{cases} -8 \pi \cos(2 \pi t) \\ -2.8 \pi \sin(2 \pi t) \end{cases} \quad (36)$$

$$\ddot{y}^*(t) = \begin{cases} -8 \sin(2 \pi t) \\ -4.6 \sin(4 \pi t) \end{cases} \quad (37)$$

Pada akhirnya, kecepatan sudut $\dot{\theta}^*(t)$ yang diharapkan untuk setiap robot dapat dihitung dengan mensubstitusikan persamaan (34) sampai dengan persamaan (37) ke dalam persamaan (30). Oleh karena itu $\dot{\mathbf{x}}^*(t) = (\dot{x}^*(t), \dot{y}^*(t), \dot{\theta}^*(t))$ dapat didefinisikan. Selanjutnya adalah memberikan respon terhadap nilai posisi tujuan (\mathbf{x}^*) kemudian hasil percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 6. Pada bagian (a) Robot bergerak dari posisi awal menuju posisi tujuan, dimana posisi tujuan bergerak membentuk pola angka 8. Posisi awal ditunjukkan dengan titik merah dengan arah panah warna merah sebagai orientasi robot dan titik hijau sebagai posisi tujuan dan arah panah hijau menunjukkan orientasi robot. Proses perubahan posisi dan arah hadapnya (diwakili arah panah warna abu-abu). Bagian (b) Menunjukkan pola lintasan robot yang telah ditentukan. Bagian (c) Nilai eror ketika robot bergerak. Nilai eror tidak bisa bernilai 0 karena posisi tujuan yang bergerak. Oleh karena itu simulasi ini meminimalkan nilai eror dan hasil yang diperoleh ialah robot mampu mempertahankan nilai eror yang hampir selalu mendekati 0. Bagian (d) menampilkan grafik dari kontrol kemudi roda dengan menotasikan kemudi roda ke-1 sampai dengan ke-4 sebagai a_i sampai dengan a_4 . Gelombang dan lembah menunjukkan bahwa robot sedang bermanuver pada nilai $t = 8, 20, 31$ dan 43 . Ketika datar, robot sedang bergerak lurus. Bagian (e) menampilkan grafik dari kecepatan putar roda dengan menotasikan roda ke-1 sampai dengan ke-4 sebagai u_i sampai dengan u_4 . Garis gelombang menunjukkan bahwa kontrol kemudi roda dalam kecepatan sedang ataupun tinggi. Sedangkan garis datar menunjukan robot sedang berbelok dengan kecepatan rendah.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil ujicoba tersebut didapatkan bahwa, pemodelan kinematika menghasilkan respon sistem yang baik. Untuk ujicoba robot pada target diam, robot mampu bergerak menuju target dengan koordinat dan waktu yang telah ditentukan. Pergerakannya sendiri juga sesuai dengan yang diharapkan yaitu ketika robot jauh dari posisi tujuan maka robot akan bergerak dengan kecepatan tinggi, ketika mendekati posisi tujuan robot akan menurunkan kecepatannya dan ketika sampai di posisi tujuan robot akan berhenti. Untuk ujicoba robot pada target bergerak yaitu, robot mampu bergerak dengan pola dan kurun waktu yang telah ditentukan. Pada ujicoba ini, robot dikatakan berhasil dengan catatan bahwa robot mampu bergerak pada pola yang ditentukan

dan berhenti pada waktu yang telah ditentukan pula. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan kontrol kinematika yang dibuat mampu untuk mengontrol pergerakan dari robot *swerve* 4 roda pada target diam maupun bergerak.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Siradjuddin, G.A. Azhar, S. Wibowo, F. Ronilaya, and E. Rohadi, "A General *Inverse* Kinematic Formulation and Control Schemes for Omnidirectional Robot using Omni or Mecanum Wheel" in *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, April 2020.
- [2] S. Wibowo, I. Siradjuddin, F. Ronilaya, and M.N. Hidayat, "Improving teleoperation robots performance by eliminating view limit using 360 camera and enhancing the immersive experience utilizing VR headset" in *Annual Technology, Applied Science and Engineering Conference (ATASEC)*, may 2021.
- [3] Y. CHEN, S. CHEN, Y. ZHAO, Z. GAO , AND C. LIO, "Optimized Handling Stability Control Strategy for a Four In-Wheel Motor Independent-Drive Electric Vehicle" in *IEEE Access*, February 2019.
- [4] J. Zhang, X. Yu, M. Zeng, W. Sun, Z. LiuA, "novel motion control for ground vehicles with 4 independent wheel agents" in *IEEE/International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Juni 2019.
- [5] J. S. Hu, Y. Wang, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Robust yaw stability control for in-wheel motor electric vehicles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1360–1370, 2017.
- [6] R. Wang, H. Zhang, and J. Wang, "Linear parametervarying controller design for four-wheel independently actuated electric ground vehicles with active steering systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 1281–1296, 2014.
- [7] J. Alexander and J. Maddocks, "On the kinematics of wheeled mobile robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 5, pp. 15–27, 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/027836498900800502>.
- [8] Ming-Han Lee, Tzoo-Hseng S. Li, "Kinematics, dynamics and control design of 4WIS4WID mobile robots" in *The Journal of Engineering*, October 2014.
- [9] Tzoo-Hseng S. Li, Ming-Han Lee, Chia-Wei Lin, Guan-Hong Liou, and Wei-Chung Chen, "Design of Autonomous and Manual Driving System for 4WIS4WID Vehicle" in *IEEE Access*, March 2016.
- [10] G. Todoran, and M. Bader, "Expressive Navigation and Local Path-Planning of Independent Steering Autonomous Systems" in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 2016.
- [11] F. Hua, G. Li, F. Liu, and Y. Liu, "Mechanical Design of a Four-wheel Independent Drive and Steering Mobile Robot Platform" in *Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2016.
- [12] Z. Yao, G. Liu, D. Zhang, Y. Shen, Z. Wang, "Path Tracking Control for Four-Wheel-Independent-Driven Agricultural High Clearance Sprayer with New Front-Rear-Dual-Steering-Axle" in *Chinese Automation Congress*, June 2024.
- [13] X. Zhang, Y. Xie, L. Jiang, G. Li, J. Meng, and Y. Huang, "Trajectory Tracking of a 4wis4wid Robot Using Adaptive Receding Horizon Control Based on Neurodynamics Optimization" in *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, July 2019.