

KONTROL PENJEJAK DINDING PADA KURSI RODA ROBOTIK DENGAN BATASAN PENGUKURAN SUDUT ORIENTASI DAN JARAK

¹Augie Widyotriatmo, ²Amrizal Nainggolan, ²Antony Anggriawan Siswoyo,
²Stephen Andronicus, ²Billy Nikodemus Max

¹Kelompok Keahlian Instrumentasi & Kontrol, Fakultas Teknologi Industri,
ITB, Bandung, Indonesia

²Program Studi Instrumentasi & Kontrol, Fakultas Teknologi Industri,
ITB, Bandung, Indonesia

e-mail: augie@tf.itb.ac.id

Abstrak

Pada makalah ilmiah ini disajikan desain sistem kontrol penjejak dinding pada kursi roda robotik dengan keterbatasan pembacaan sensor. Rangkaian sensor ultrasonik digunakan untuk menentukan jarak dan sudut orientasi dari kursi roda robotik terhadap dinding yang menjadi acuan. Algoritma kontrol diturunkan menggunakan fungsi *Lyapunov Barrier* untuk menjamin kestabilan asimtotik dari sistem dengan batasan pengukuran sudut orientasi dan jarak dari sensor ultrasonik. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan antara algoritma kontrol yang menggunakan fungsi *Barrier*, dimana sudut orientasi dan jarak tidak keluar dari batasan kemampuan sensor ultrasonik, dan yang tidak, dimana sudut orientasi dan jarak dapat keluar dari batasan. Hasil eksperimen dari implementasi algoritma kontrol memperlihatkan kursi roda robotik dapat bergerak dengan jarak yang diinginkan dari dinding dengan mempertahankan jarak dan sudut orientasi tidak melebihi batasan kemampuan dari sensor ultrasonik.

Kata Kunci : *Kursi roda robotik, batasan sudut orientasi dan jarak, kontrol penjejak dinding, sensor ultrasonik, fungsi Lyapunov Barrier*

Abstract

The Wall Tracker Controls on Robotic Wheelchairs with the Restricted Measurement on the Orientation Angle and Distance. In this scientific paper, it presents the design of the control system on the wall tracker on a robotic wheelchair with the sensor readings limitations. The series of ultrasonic sensors are used to determine the distance and angle of orientation of the robotic wheelchair against the wall that becomes a reference. The control algorithm is derived using the *Barrier Lyapunov* function to guarantee the asymptotic stability of systems with restrictions orientation angle and distance measurement of ultrasonic sensors. The simulation results show the difference on the control algorithm between those using the *Barrier* function, where the orientation angle and distance is not out of limits on the ability of ultrasonic sensors, and those not using where the orientation angle and distance can be out of limits. The experimental results of the implementation of the control algorithm show the robotic wheelchair can move to the desired distance from the wall with maintaining the distance and the angle of orientation not exceeding the ability of ultrasonic sensors.

Keywords: *Robotic wheelchair, orientation angle, distance constraints, tracker control wall, ultrasonic sensors, Lyapunov function Barrier*

1. Pendahuluan

Dewasa kini teknologi robot telah banyak diterapkan untuk berbagai aplikasi baik dalam bidang pendidikan hingga industri besar. Salah

satu bentuk dari teknologi robot ini yaitu kursi roda robotik yang merupakan robot mobil beroda yang memanfaatkan aktuator berupa motor dan roda untuk berpindah tempat secara otomatis

sehingga dapat memudahkan pengguna berkebutuhan khusus.

Spong dkk., (2006) menyatakan terdapat tiga masalah utama dalam pengembangan sistem kontrol robot mobil beroda yang perlu diperhatikan yaitu stabilisasi (Widyotriatmo dkk, 2012; Widyotriatmo dan Hong, 2015) generasi lintasan (Widyotriatmo dan Hong, 2011), dan pelacakan lintasan (Gunachandra dkk, 2014; Widyotriatmo dkk, 2015). Pada makalah ini, ketiga masalah tersebut ditinjau untuk menghasilkan sistem kontrol penjejak dinding dari kursi roda robotik agar kursi roda bergerak lurus secara otomatis dengan jarak yang diinginkan dari dinding acuan.

Sistem kontrol penjejak dinding telah banyak diteliti dalam berbagai literatur, seperti kontrol penjejak jalur dengan metode pembangkitan dan penjejakan kurvatur (Xu, 2004; Pyrkin, 2005), kontrol penjejak lintasan dengan *back-stepping* berdasarkan lokalisasi GPS (Low dkk, 2008), kontrol penjejak dinding untuk robot dengan sistem kontrol cerdas *particle swarm optimization* (Chen dkk, 2013), serta kontrol adaptif dan tegar dari robot mobil memanfaatkan hasil pemetaan kamera dan pemindai laser (Pyrkin dkk, 2015). Namun berdasarkan hasil studi literatur oleh penulis, kerap kali keterbatasan dari komponen pada sistem sensor tidak didefinisikan dalam perancangan sistem kontrol robot mobil, sehingga aplikasi kontrol tidak tegar.

Pada sistem kontrol penjejak dinding sebelumnya oleh (Gunachandra dkk, 2014; Widyotriatmo dkk, 2015), kursi roda robotik dapat bergerak dengan jarak yang diinginkan dari dinding acuan, namun keterbatasan dari sensor jarak ultrasonik belum digunakan. Pada penelitian ini, digunakan metode sistem kontrol berbasis fungsi *Lyapunov Barrier*. Penggunaan fungsi *Lyapunov Barrier* sudah diaplikasikan pada berbagai kasus, salah satunya dalam perancangan sistem kontrol kendaraan otonom dengan batasan *nonholonomic* dan luas bidang pandang sensor oleh (Widyotriatmo dkk, 2015). Pada penurunan fungsi *Barrier* dapat mengatasi masalah sistem nonlinier dengan batas tertentu melalui optimasi pemberian parameter kontrol untuk menjaga sistem agar tetap berada dalam batasan yang ditentukan. Sehingga dalam penelitian selanjutnya (Andronicus dkk, 2015), dilakukan

simulasi dari sistem kontrol kursi roda robotik dengan hanya batasan orientasi. Dalam penelitian ini, dirancang fungsi *Lyapunov Barrier* dengan batasan sudut orientasi dan jarak kursi roda dari sensor jarak ultrasonik. Sistem kontrol yang dirancang berdasarkan fungsi *Lyapunov Barrier* tersebut kemudian disimulasikan dan diimplementasikan pada kursi roda robotik sebenarnya. Arsitektur pengontrolan menggunakan yang telah dilakukan pada (Widyotriatmo dan Hong, 2013; Andronicus dkk, 2016)

Model kinematika dari kursi roda robotik dijabarkan sebagai fungsi dari kecepatan linear kursi roda dan sudut orientasi kursi roda terhadap dinding acuan. Selanjutnya, sistem kontrol penjejak dinding dirancang agar kursi roda bergerak dengan jarak dan orientasi yang diinginkan terhadap dinding acuan. Dalam penelitian ini disajikan tiga pendekatan algoritma kontrol yang berbeda yaitu kontrol standar dengan fungsi *Lyapunov* kuadratik, algoritma kontrol menggunakan batasan sudut orientasi dengan satu fungsi *Lyapunov Barrier*, dan algoritma kontrol dengan batasan sudut orientasi dan jarak menggunakan dua fungsi *Lyapunov Barrier*.

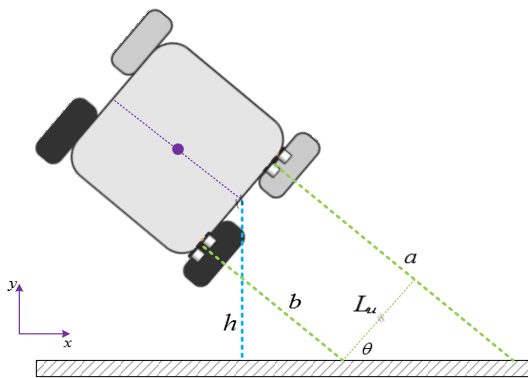
Kontribusi yang disajikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: Pertama, penurunan model dari kursi roda robotik untuk melakukan penjejakan dinding yang diturunkan dengan batasan dari sensor jarak ultrasonik. Kedua, penetapan fungsi *Barrier* sebagai dasar perancangan sistem kontrol penjejak dinding dengan batasan yang diinginkan. Ketiga, pembuktian kestabilan asimtotik dari pemberian sinyal kontrol pada ketiga pendekatan yang digunakan untuk membuktikan hasil rancangan sistem kontrol dapat mengatasi masalah penjejakan dinding dengan batasan sensor ultrasonik. Keempat adalah simulasi dan implementasi dari sistem kontrol yang telah dirancang. Kelima, hasil algoritma kontrol penjejak dinding dengan batasan orientasi dan jarak dibuktikan dengan implementasi pada kursi roda robotik.

Dalam penelitian ini digunakan kursi roda robotik pada Gambar 1 dengan dua roda penggerak pada bagian belakang dan dua roda *caster* pada bagian depan. Setiap roda belakang terhubung dengan motor DC yang memperoleh

suplai arus dan tegangan dari driver motor. Driver motor memperoleh masukan tegangan dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) dari mikrokontroler untuk mengatur kecepatan putaran pada setiap roda belakang. Jumlah rotasi pada masing-masing roda belakang diukur dengan rotary encoder.



Gambar 1 kursi roda robotik yang digunakan dalam eksperimen



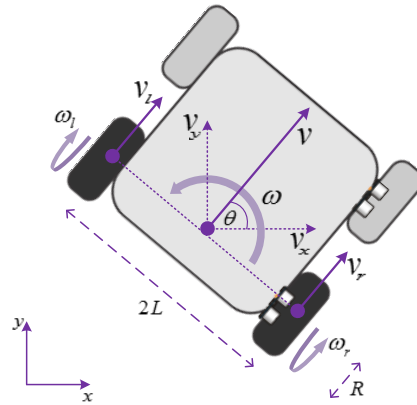
Gambar 2 jarak dan sudut orientasi kursi roda robotic terhadap dinding

Pada setiap sisi samping dari kursi roda terpasang dua sensor jarak ultrasonik pada bagian depan dan belakang dengan jarak L_u seperti diilustrasikan Gambar 2. Ketika kursi roda bergerak pada posisi di samping sebuah dinding, kedua sensor jarak ultrasonik dapat memperoleh jarak dari bagian depan kursi roda dengan dinding a dan jarak dari bagian belakang kursi roda dengan dinding b .

Dengan memanfaatkan informasi jarak yang telah diperoleh masing-masing sensor ultrasonik

maka variabel-variabel pengukuran posisi kursi roda terhadap dinding h dan sudut orientasi dari kursi roda terhadap dinding θ dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$h = \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \theta \tag{1}$$



Gambar 3 skema kursi roda robotik

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a-b}{L_u} \right) \tag{2}$$

2 Metodologi

Transformasi Kecepatan Roda

Gambar 3 merupakan skematik dari sistem kursi roda yang dikembangkan dalam penelitian ini. Konfigurasi dari sistem kursi roda dinotasikan dengan (x, y, θ) dengan (x, y) adalah koordinat kursi roda dan θ adalah sudut orientasi kursi roda terhadap sumbu x .

Kecepatan linier v dan kecepatan sudut w dari kursi roda dengan lebar tertentu $2L$ dapat dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan linier roda belakang kanan v_r dan roda belakang kiri v_l .

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} \tag{3}$$

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{2L} \tag{4}$$

Kecepatan linier kedua roda belakang dengan jari-jari R merupakan fungsi dari kecepatan sudut

roda belakang kanan ω_r dan roda belakang kiri ω_l .

$$v_r = \omega_r R \quad (5)$$

$$v_l = \omega_l R \quad (6)$$

Persamaan (3) dan (4) disubstitusikan ke-dalam persamaan (5) dan (6) menjadi:

$$v = \frac{(\omega_r + \omega_l)R}{2} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{(\omega_r - \omega_l)R}{2L} \quad (8)$$

Kemudian persamaan (7) dan (8) dapat saling disubstitusikan untuk memperoleh kecepatan sudut kedua roda belakang sebagai fungsi dari kecepatan linier dan kecepatan sudut dari kursi roda berikut:

$$\omega_r = \frac{(v + L\omega)}{R} \quad (9)$$

$$\omega_l = \frac{(v - L\omega)}{R} \quad (10)$$

Dengan demikian desain kontrol kecepatan linear dan kecepatan sudut dapat digunakan untuk menentukan kecepatan setiap roda belakang.

Pemodelan Kinematika

Mengacu skema sistem Gambar 3, kinematika dari pergerakan kursi roda yang dirancang dapat dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan linier dan sudut orientasi, sebagai berikut:

$$\dot{x} = v_x = v \cos \theta \quad (11)$$

$$\dot{y} = v_y = v \sin \theta \quad (12)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (13)$$

Fungsi Lyapunov Barrier

Untuk menjamin kondisi dari variabel keadaan tidak pernah melanggar batasan variabel keadaan, didefinisikan fungsi *Lyapunov Barrier* setiap keadaan Ω untuk seluruh variabel keadaan z_i .

$$\Omega_i(z_i(t)) : (-\bar{z}_i, \bar{z}_i) \rightarrow R^+ ; i = 1, 2, \dots, n_z \quad (14)$$

dengan n_z adalah jumlah keadaan. Fungsi *Barrier* yang diberikan (Ngo dkk., 2005) kemudian digunakan dalam kandidat fungsi *Lyapunov Barrier* (V_i):

$$V_i(z_i(t)) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\bar{z}_i^2}{\bar{z}_i^2 - z_i^2(t)} \right) \quad (15)$$

Dengan \bar{z}_i adalah nilai batas atas dari z_i . Dengan nilai z_i berada dalam rentang $-\bar{z}_i$ sampai dengan \bar{z}_i , maka V_i pada (15) adalah definit positif dan memiliki nilai menuju tak hingga ($V_i(z_i(t)) \rightarrow \infty$) seiring dengan z_i menuju batasnya $z_i(t) \rightarrow \pm \bar{z}_i$. Fungsi *Barrier* sebagai kandidat fungsi *Lyapunov* ditunjukkan oleh lemma berikut. (Tee, dkk., 2005; Do, 2010)

Lemma

Diberikan suatu sistem dengan variabel keadaan $z_i, i = 1, \dots, n_z$.

$$z(t) = [z_1(t), \dots, z_n(t)]^T \in R^n \quad (16)$$

Untuk sembarang batasan variabel keadaan $\bar{z}_i; i = 1, \dots, n_z$, didefinisikan fungsi *Barrier* Ω_z :

$$\Omega_z = \{z(t) \in R^{n_z} : |z_i(t)| < \bar{z}_i; i = 1, \dots, n_z\} \quad (17)$$

Dari dinamika sistem dapat diturunkan:

$$\dot{z}(t) = f(t, z), f : R^+ \times R^n \rightarrow R^n \quad (18)$$

Didefinisikan kandidat fungsi *Lyapunov* V_i :

$$V_i : (-\bar{z}_i, \bar{z}_i) \rightarrow R^+ ; i = 1, \dots, n_z \quad (19)$$

berdefinit positif dan dapat diturunkan secara kontinyu pada Ω_z . Dirancang V_i memiliki nilai menuju tak hingga $V_i(z_i) \rightarrow \infty$ jika nilai variabel keadaan menuju batasnya $z_i \rightarrow \pm \bar{z}_i$, $i = 1, \dots, n_z$.

Didefinisikan fungsi *Lyapunov* sistem V

$$V(z(t)) = \sum_{i=1}^{n_z} V_i(z_i(t)) \quad (20)$$

dengan variabel keadaan awal adalah anggota fungsi *Barrier* $z(0) \in \Omega_z$. Jika,

$$\dot{V}(z(t)) \leq 0 \quad (21)$$

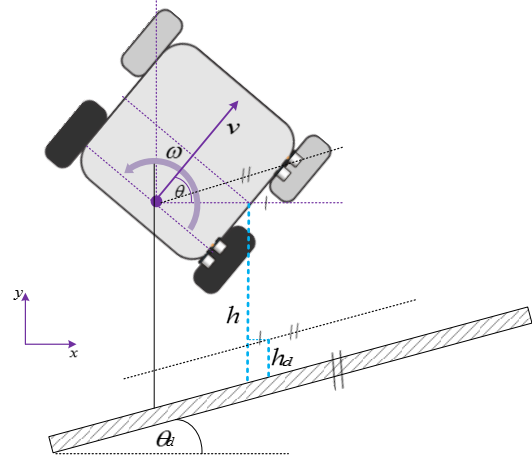
dalam set Ω_z , variabel keadaan ada pada rentang batasnya $z(t) \in \Omega_z$ setiap waktunya $t \in [0, \infty)$.

Pembuktian

Bentuk definit positif fungsi *Lyapunov* V dan semi-definit negatif \dot{V} pada persamaan (20) dan (21) menunjukkan $V(z(t))$ terbatas pada rentangnya untuk setiap waktu $V(z(t)) \leq V(z(0))$; $\forall t \in [0, \infty)$. Karena (20) adalah fungsi definit positif, maka fungsi ini juga terbatas untuk setiap waktu $\forall t \in [0, \infty)$. Dari sifat fungsi *Barrier*, yaitu V_i memiliki nilai tak hingga $V_i(z_i) \rightarrow \infty$ hanya jika variabel keadaan mencapai batasannya $z_i \rightarrow \pm \bar{z}_i$, $i = 1, 2, \dots, n_z$, dan kondisi awal sistem juga berada dalam batasannya $z_i(0) \in \Omega_z$, didapatkan bahwa variabel keadaan berada dalam batasannya setiap waktu $z_i(t) \in \Omega_z$; $i = 1, \dots, n_z$; $\forall t \in [0, \infty)$.

Desain Kontrol Penjejak Dinding

Berikut dijabarkan penurunan kontrol penjejak dinding pada kursi roda robotik yang dirancang seperti digambarkan pada Gambar 4. Akan dibandingkan desain kontrol penjejak dinding tanpa batasan orientasi menggunakan fungsi *Lyapunov* kuadratik dan dengan batasan orientasi menggunakan fungsi *Lyapunov Barrier*.



Gambar 4 Skema penjejak dinding

Dalam permasalahan kontrol penjejak dinding, kursi roda dirancang untuk bergerak dengan jarak h_d dan orientasi θ_d sejajar terhadap dinding acuan serta tetap mempertahankan kecepatan liniernya. Dengan memberi nilai jarak dan sudut orientasi yang diinginkan konstan terhadap dinding acuan, selisih antara jarak e_h dan sudut e_θ dari kursi roda dengan *set point* yang diinginkan adalah

$$e_h = h - h_d \quad (22)$$

$$e_\theta = \theta - \theta_d \quad (23)$$

Dinamika dari e_h dan e_θ dapat diturunkan dari persamaan kinematika pergerakan kursi roda sebagai berikut:

$$\dot{e}_h = \dot{h} = v \sin e_\theta \quad (24)$$

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta} = \omega \quad (25)$$

Kontrol Standar

Didefinisikan fungsi *Lyapunov* kuadratik definit positif untuk merancang kontrol penjejak dinding sebagai berikut:

$$V = \frac{e_h^2}{2} + \frac{e_\theta^2}{2} \quad (26)$$

Fungsi Lyapunov yang telah didefinisikan kemudian dapat diturunkan dalam domain waktu sebagai berikut:

$$\dot{V} = e_h \dot{e}_h + e_\theta \dot{e}_\theta \quad (27)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (24) dan (25) kedalam turunan fungsi *Lyapunov* akan diperoleh:

$$\dot{V} = e_h v \sin e_\theta + e_\theta \omega \quad (28)$$

Selanjutnya dirancang masukan kontrol penjajak dinding pada kursi roda:

$$v = v_c; v_c \text{ bernilai konstan} \quad (29)$$

$$\omega = -e_\theta - \frac{e_h v \sin e_\theta}{e_\theta} \quad (30)$$

Dengan memberikan kontrol (29) dan (30) tersebut, maka persamaan (28) menjadi:

$$\dot{V} = -e_\theta^2 \quad (31)$$

Perhatikan dinamika pada persamaan (24) dan (25). Dengan memberikan masukan kontrol (29) dan (30), nilai e_h dan e_θ akan menuju nol, sehingga dapat dinyatakan titik $(e_h, e_\theta) = (0, 0)$ adalah stabil asimtotik.

Jika e_θ memiliki nilai tertentu, turunan dari fungsi *Lyapunov* \dot{V} pada persamaan (31) akan selalu memberikan nilai negatif. \dot{V} adalah fungsi semi-definit negatif $\dot{V} \leq 0$, sehingga mengacu pada Barbalat lemma maka e_θ akan menuju nol, $e_\theta \rightarrow 0$, seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$.

Kini dengan memberikan kontrol penjajak dinding pada persamaan (29) dan (30), lup tertutup dari sistem menjadi:

$$\dot{e}_h = \sin e_\theta \quad (32)$$

$$\dot{e}_\theta = -e_\theta - \frac{e_h v \sin e_\theta}{e_\theta} \quad (33)$$

Dengan melihat ke persamaan (33), didapati bahwa e_h juga akan menuju nol, $e_h \rightarrow 0$, seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$, sehingga kursi roda bergerak pada posisi sejajar terhadap dinding dengan jarak yang diinginkan. Dengan demikian, titik $(e_h, e_\theta) = (0, 0)$ adalah stabil asimtotik.

Kontrol Dengan Batasan Sudut Orientasi

Untuk kontrol dengan batasan sudut orientasi, sudut orientasi dari kursi roda e_θ dirancang agar tidak mencapai batas maksimum sudut \bar{e}_θ untuk memperoleh bacaan dari sensor jarak ultrasonik dan kondisi awal sudut orientasi $e_\theta(0)$ dirancang berada dalam rentang batas maksimum sudut.

$$|e_\theta| < \bar{e}_\theta \quad (34)$$

$$e_\theta(0) < \bar{e}_\theta \quad (35)$$

Didefinisikan fungsi *Lyapunov Barrier* definit positif untuk merancang kontrol penjajak dinding dengan batasan orientasi sebagai berikut

$$V_B = \frac{e_h^2}{2} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\bar{e}_\theta^2}{\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2} \right) \quad (36)$$

Fungsi Lyapunov *Barrier* yang telah didefinisikan dapat diturunkan dalam domain waktu menjadi:

$$\dot{V}_B = e_h \dot{e}_h + \frac{e_\theta \dot{e}_\theta}{\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2} \quad (37)$$

Disubstitusikan persamaan (24) dan (25) kedalam turunan fungsi *Lyapunov Barrier* (37) sehingga diperoleh:

$$\dot{V}_B = e_h v \sin e_\theta + \frac{e_\theta \omega}{\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2} \quad (38)$$

Selanjutnya dirancang kontrol penjajak dinding dengan batasan orientasi yang diberikan pada kursi roda sebagai berikut:

$$v = v_c; \quad (39)$$

v_c bernilai konstan

$$\omega = -\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_\theta - \frac{\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_h v \sin e_\theta}{e_\theta} \quad (40)$$

Dengan memberikan kontrol yang diinginkan, maka persamaan (32) menjadi:

$$\dot{V} = -e_\theta^2 \quad (41)$$

Perhatikan dinamika pada persamaan (24) dan (25). Dengan memberikan masukan kontrol (39) dan (40) kedalam sistem pada persamaan (24) dan (25), nilai e_h dan e_θ akan menuju nol (titik kesetimbangan $(e_h, e_\theta) = (0,0)$ dinyatakan stabil asimtotik); Dan jika sistem yang dirancang memenuhi persyaratan kondisi awal (35), e_θ tidak akan melebihi batas \bar{e}_θ yang telah didefinisikan sesuai persamaan (34) pada setiap waktu $t \in [0, \infty)$.

Bentuk penurunan yang sama dengan sebelumnya, jika e_θ memiliki nilai tertentu, turunan dari fungsi *Lyapunov* \dot{V} pada persamaan (41) akan selalu memberikan nilai negatif. \dot{V} adalah fungsi semi-definit negatif $\dot{V} \leq 0$, sehingga mengacu pada Barbalat lemma maka e_θ akan menuju nol $e_\theta \rightarrow 0$ seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$. Sistem yang telah dirancang pun dapat dinyatakan stabil asimtotik.

Dengan memberikan kontrol penjajak dinding pada persamaan (39) dan (40) ke dalam sistem (24) dan (25), lup tertutup dari sistem menjadi:

$$\dot{h} \rightarrow \dot{e}_h = v \sin e_\theta \quad (42)$$

$$\dot{\theta} = -\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_\theta - \frac{\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_h v \sin e_\theta}{e_\theta} \quad (43)$$

Dari persamaan (43) terlihat bahwa dengan e_h menuju nol, $e_h \rightarrow 0$, seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$, dengan

$$\lim_{e_\theta \rightarrow 0} \frac{\sin e_\theta}{e_\theta} = 1 \quad (44)$$

Dengan demikian akan diperoleh e_θ dan e_h menuju nol $(e_h, e_\theta) \rightarrow (0,0)$ seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$.

Kontrol Dengan Batasan Sudut orientasi dan Jarak

Untuk kontrol dengan batasan sudut orientasi dan jarak, selain sudut orientasi dari kursi roda e_θ dirancang agar tidak mencapai batas maksimum sudut seperti pada penurunan sebelumnya, diberikan juga batas maksimum jarak terhadap dinding \bar{e}_h dengan kondisi awal jarak terhadap dinding $e_h(0)$ dirancang berada dalam rentang batas yang ditentukan. Batasan maksimum jarak dan orientasi dinyatakan sebagai berikut:

$$|e_i| < \bar{e}_i; \quad i = h, \theta \quad (45)$$

$$e_i(0) < \bar{e}_i \quad (46)$$

Didefinisikan fungsi *Lyapunov Barrier* berdefinit positif untuk merancang kontrol penjajak dinding dengan batasan jarak dan sudut orientasi sebagai berikut:

$$V_B = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\bar{e}_h^2}{\bar{e}_h^2 - e_h^2} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\bar{e}_\theta^2}{\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2} \right) \quad (47)$$

Fungsi *Lyapunov Barrier* yang telah didefinisikan dapat diturunkan dalam domain waktu menjadi:

$$\dot{V}_B = \frac{e_h \dot{e}_h}{\bar{e}_h^2 - e_h^2} + \frac{e_\theta \dot{e}_\theta}{\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2} \quad (48)$$

Disubstitusikan persamaan (24) dan (25) kedalam turunan fungsi *Lyapunov* Barrier sehingga diperoleh:

$$\dot{V}_B = \frac{e_h v \sin e_\theta}{\bar{e}_h^2 - e_h^2} + \frac{e_\theta \omega}{\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2} \quad (49)$$

Dirancang kontrol penjejak dinding dengan batasan sudut orientasi dan jarak yang diberikan pada kursi roda sebagai berikut:

$$v = v_c; \quad (50)$$

v_c bernilai konstan

$$\omega = -\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_\theta - \frac{\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_h v \sin e_\theta}{\left(\bar{e}_h^2 - e_h^2\right)e_\theta} \quad (51)$$

Dengan memberikan kontrol tersebut, maka persamaan (32) akan menjadi:

$$\dot{V} = -e_\theta^2 \quad (52)$$

Perhatikan dinamika pada persamaan (24) dan (25). Dengan memberikan masukan kontrol (50) dan (51) ke dalam sistem pada persamaan (24) dan (25), nilai e_h dan e_θ akan menuju nol (titik kesetimbangan $(e_h, e_\theta) = (0,0)$ dinyatakan stabil asimtotik); Dan jika sistem yang dirancang memenuhi persyaratan kondisi awal (46), e_i tidak akan melebihi batas $\bar{e}_i, i = h, \theta$.

Dari persamaan (47) didapatkan bahwa jika e_θ memiliki nilai tertentu, turunan dari fungsi *Lyapunov* \dot{V} pada persamaan (47) akan selalu memberikan nilai negatif. \dot{V} adalah fungsi semi-definit negatif $\dot{V} \leq 0$, sehingga mengacu pada Barbalat lemma maka e_θ akan menuju nol.

Dengan memberikan kontrol penjejak dinding pada persamaan (50) dan (51) ke dalam sistem (24) dan (25), lup tertutup dari sistem menjadi:

$$\dot{h} \rightarrow \dot{e}_h = v \sin e_\theta \quad (53)$$

$$\dot{\theta} = -\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_\theta - \frac{\left(\bar{e}_\theta^2 - e_\theta^2\right)e_h v \sin e_\theta}{e_\theta} \quad (54)$$

Dari persamaan (53) dan (54) terlihat dengan e_θ akan menuju nol $e_\theta \rightarrow 0$ seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$ dengan,

$$\lim_{e_\theta \rightarrow 0} \frac{\sin e_\theta}{e_\theta} = 1 \quad (55)$$

maka persamaan (54) hanya akan benar jika selisih e_h menuju nol, $e_h \rightarrow 0$, seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$. Dengan demikian akan diperoleh e_θ dan e_h menuju nol $(e_h, e_\theta) \rightarrow (0,0)$ seiring waktu menuju tak hingga $t \rightarrow \infty$. Titik kesetimbangan $(e_h, e_\theta) = (0,0)$ dapat dinyatakan stabil asimtotik.

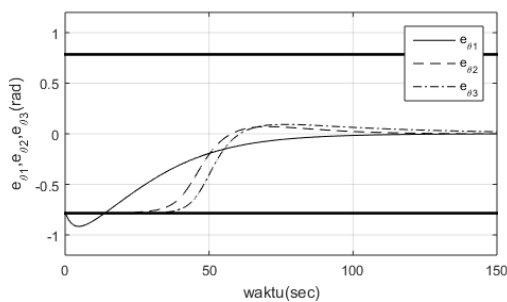
Dengan turunan dari fungsi *Lyapunov* \dot{V} adalah fungsi semi-definit negatif $\dot{V} \leq 0$ untuk e_θ dan e_h berada dibawah nilai batasnya pada persamaan (45), maka fungsi *Lyapunov* V terbatas pada rentangnya untuk setiap waktu, $V(e_\theta(t), e_h(t)) \leq V(e_\theta(0), e_h(0)), \forall t \in [0, \infty)$.

3 Hasil Simulasi dan Implementasi

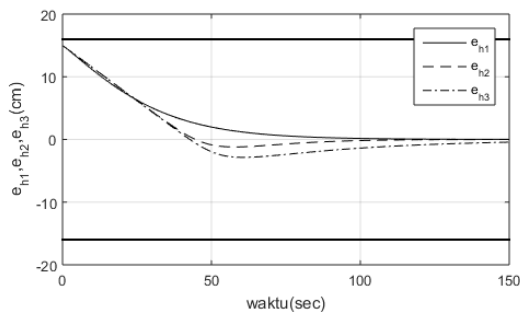
Simulasi Kontrol Penjejak Dinding

Berikut dilakukan simulasi dengan program MATLAB untuk membandingkan hasil rancangan algoritma pengontrol penjejak dinding dengan tiga pendekatan yang telah dirancang. Dalam simulasi yang dilakukan, ditetapkan kondisi awal $e_h(0)$ mendekati 15 cm dan v sebesar 0.1 m/s. Untuk batas pembacaan sensor ultrasonik ditetapkan sebesar $\bar{e}_h = 15$ m dan $\bar{e}_\theta = \pi/4$ radian.

Respon sistem dengan $e_\theta(0)$ mendekati batas bawah sudut orientasi $e_\theta(0) = -\bar{e}_\theta$ bergerak menuju titik nol ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Pada Gambar 5, terlihat terjadi *overshoot* respon e_h , menandakan besar simpangan perlu diperhatikan dengan mempertimbangkan batasan fisis h baik diakibatkan keterbatasan sensor jarak ultrasonik maupun besarnya h_d yang ditetapkan.



Gambar 5 respon e_θ dengan kondisi awal $e_h(0)$ mendekati \bar{e}_h dan $e_\theta(0)$ mendekati $-\bar{e}_\theta$. ($e_{\theta 1}$ adalah trajektori e_θ dengan algoritma kontrol *Lyapunov* kuadratik, $e_{\theta 2}$ dengan *Lyapunov Barrier* sudut, dan $e_{\theta 3}$ dengan *Lyapunov Barrier* sudut dan jarak)



Gambar 6 respon e_h dengan kondisi awal $e_h(0)$ mendekati \bar{e}_h dan $e_h(0)$ mendekati $-\bar{e}_\theta$. ($e_{h 1}$ adalah trajektori $e_{h 1}$ dengan algoritma kontrol *Lyapunov* kuadratik, $e_{h 2}$ dengan *Lyapunov Barrier* sudut, $e_{h 3}$ dengan *Lyapunov Barrier* sudut dan jarak)

Implementasi Kontrol Penjejak Dinding

Untuk implementasi dari sistem kontrol yang telah dirancang, dilakukan pengujian pada koridor pada Gambar 7. Pergerakan dari kursi roda robotik diinginkan untuk bergerak lurus

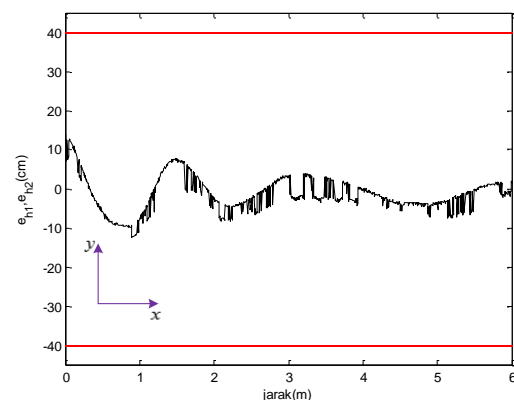
dengan jarak tertentu dari dinding acuan di sisi kanan.

Ditentukan jarak tempuh kursi roda adalah 6 m, kecepatan linier dari kursi roda robotik v_c 0.4 m/s dan jarak yang diinginkan dari dinding h_d 40 cm. Untuk batasan sudut \bar{e}_θ dan jarak \bar{e}_h dalam pengujian ini adalah 45° dan 80 cm. Terdapat tiga kondisi awal untuk menguji sistem kontrol yaitu dengan jarak awal 55 cm ($e_h(0) = 15$ cm) dari dinding. Orientasi awal $e_\theta(0)$ ditetapkan mendekati nol.

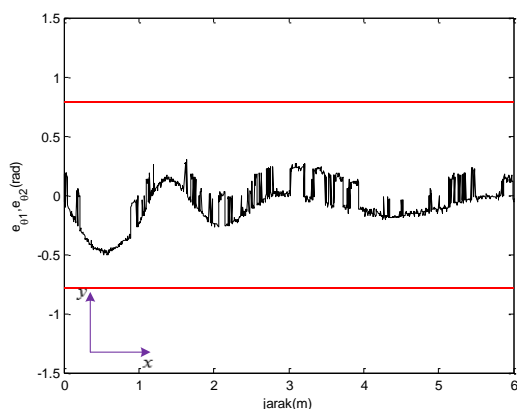
Gambar 8 dan 9 adalah hasil pengukuran dari e_h dan e_θ pada kondisi awal $e_h(0) = 15$ cm. Terlihat dari hasil pengukuran yang diperoleh pada Gambar 8 dan Gambar 9, nilai e_h dan e_θ berhasil disekitar nilai 0 dengan rentang yang kecil dan terbatas seiring jauhnya jarak yang ditempuh.



Gambar 7 koridor pengujian



Gambar 8 respon e_h dengan $e_h(0)=15$ cm



Gambar 9 respon e_{θ} dengan $e_h(0)=15$ cm

4 Kesimpulan

Makalah ini menyajikan penurunan kontrol kursi roda robotik untuk kasus penjejakan dinding dengan memperhitungkan batas spesifikasi dari sensor jarak ultrasonik terhadap dinding acuan. Sistem kontrol dirancang berdasarkan penurunan model kinematika dari kursi roda robotik dan menggunakan fungsi *Lyapunov Barrier*.

Berdasarkan penurunan yang telah dilakukan, terbukti bahwa sistem dapat mencapai kestabilan asimtotik. Respon sistem pada simulasi dan implementasi dari sistem kontrol yang telah dirancang juga membuktikan bahwa kursi roda robotik bergerak lurus dengan jarak yang diinginkan dari dinding dengan tidak melanggar batasan yang telah ditetapkan.

Daftar Pustaka

- Andronicus, S, Nainggolan, A, Siswoyo, A, Widyotriatmo, A, 2015, "Pengontrolan penjejak dinding dengan batasan orientasi pada kursi roda robotik". Prosiding Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi 2015.
- Chen, YL, Cheng, J, Lin, C, Wu, XY, Ou, YS, Xu, YS, 2013, "Classification-based learning by particle swarm optimization for wall-following robot navigation". *Neuro-computing*, vol. 113, hal. 27-35.
- Do, K, 2010, "Control of nonlinear systems with output tracking error constraints and its application to magnetic bearings". *Int. J. Control*, Vol. 83, hal. 1999-1216.

Gunachandra, S, Chrisander, A, Widyotriatmo Suprijanto, 2014. "Wall following control for the application of a brain-controlled wheelchair". *International Conference on Intelligent Autonomous Agents, Network and Systems*, hal. 36-41.

Low CB, Wang DW, 2008 "GPS-based path following control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping". *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol.16, no.2, hal. 340-347.

Ngo, KB, Mahony, R, Jiang, ZP, 2005. *Integrator backstepping functions for systems with multiple state constraints*". *IEEE Conf. Decision Control*, vol. 44, hal. 8306-8312.

Pyrkin A, A, Bobtsov A, A, Kolyubin, SA, Faronov MV, Borisov OI, Gromov V, S, Vlasov VM, Nikolaev NA, 2015, "Simple robust and adaptive tracking control for mobile robot. *International Federation of Automatic Control*",

Spong MW, Hutchinson, S, Vidyasagar M, 2006, *Robot modelling and control 1st ed.*, John Wiley & Sons, hal. 23.

Tee, K.P., Ge, S. S., Tay, E.H. 2009, "Barrier Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems". *Automatica*, vol. 45, 2009, hal. 918-927.

Widyotriatmo A, and Hong, KS, 2011. "Navigation function-based control of multiple wheeled vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 5, hal. 1896-1906

Widyotriatmo A, Hong, KS, 2012. "Switching algorithm for robust configuration control of a wheeled vehicle," *Control Engineering Practice*, vol. 20, no. 3, hal. 315-325

Widyotriatmo A., Pamosoaji AK, and Hong, KS, 2013. "Control architecture of an autonomous material handling vehicle," *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 8 (S12)

Widyotriatmo A, Hong, KS, 2015. "Asymptotic stabilization of nonLinear systems with state constraints". *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, vol. 53, no. 3, hal. 10-23

- Widyotriatmo A, Hong, KS, 2015. "*Configuration control of an autonomous vehicle under nonholonomic and field of view constraints*". International Journal of Imaging and Robotics, vol. 15, no. 3, hal. 126-139
- Widyotriatmo A, Suprijanto, Andronicus, S. 2015, "*A collaborative control of brain computer interface and robotic wheelchair*". 10th Asian Control Conference, pp. 24-29
- Xu, YS , Au. SKW, 2004. "*Stabilization and path following of a single wheel robot*". IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, vol.9, no.2, hal. 407-419.

DINAMIKA Jurnal Ilmiah Teknik Mesin
