

## Pengontrolan Penjejak Dinding dengan Batasan Orientasi pada Kursi Roda Robotik

<sup>1</sup>Stephen Andronicus, <sup>1</sup>Amrizal Nainggolan, <sup>1</sup>Antony Anggriawan Siswoyo & <sup>2</sup>Augie Widyotriatmo\*)

<sup>1</sup>Program Studi Instrumentasi & Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, ITB, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Kelompok Keahlian Instrumentasi & Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, ITB, Bandung, Indonesia

*augie@tf.itb.ac.id\**)

### Abstrak

Pada makalah ilmiah ini disajikan desain sistem kontrol penjejak dinding pada kursi roda robotik dengan keterbatasan pada 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 sudut pembacaan sensor ultrasonik. Hasil simulasi dari sistem kontrol memperlihatkan kursi roda robotik dapat bergerak dengan jarak yang diinginkan dari dinding dengan mempertahankan sudut orientasi tidak melebihi batasan pembacaan sensor ultrasonik.

*Kata Kunci: Kursi roda robotik, kontrol penjejak dinding, sensor ultrasonik, fungsi Lyapunov Barrier*

### 1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi robot saat ini sudah berkembang dengan sangat pesat. Sebagai contoh dalam sebuah industri manufaktur, baik kualitas maupun kuantitas produksi dapat ditingkatkan sehingga meningkatkan keuntungan yang dapat diperoleh. Berbagai jenis aplikasi seperti penanganan material, pemadam kebakaran, robot pelayanan, serta robot untuk pertahanan kini sudah tergolong umum bagi negara-negara maju yang saling bersaing dalam mengembangkan teknologi-teknologi robot dengan teknik baru ataupun mengembangkan teknologi robot yang sudah ada dengan penambahan fitur-fitur tertentu untuk menyelesaikan permasalahan yang spesifik.

Pada dasarnya teknologi robot dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu, robot manipulator dan robot mobil. Untuk aplikasi robot mobil beroda, terdapat tiga jenis permasalahan utama dalam sistem kontrol yaitu stabilisasi, generasi lintasan, dan pelacakan lintasan [1]. Secara khusus dalam makalah ini, ketiga permasalahan ini akan diteliti dalam perancangan sistem kontrol penjejak dinding dari kursi roda robotik untuk pengguna berkebutuhan khusus.

Sistem kontrol penjejak dinding telah banyak diteliti dalam berbagai literatur, seperti kontrol penjejak jalur menggunakan metode pembangkitan dan penjejakan kurvatur [2], kontrol penjejak lintasan menggunakan *back-stepping* dengan penentu lokasi GPS [3], kontrol penjejak dinding untuk robot menggunakan sistem kontrol cerdas dengan *particle swarm optimization* [4] dan pengontrolan adaptif dan robust dari robot mobil memanfaatkan hasil pemetaan dari kamera dan pemindai laser [5]. Namun berdasarkan hasil studi literatur oleh penulis, kerap kali keterbatasan dari komponen pada sistem seperti sensor tidak didefinisikan dengan spesifik dalam perancangan sistem kontrol robot mobil, sehingga aplikasi kontrol tidak tegar.

Pada perancangan sistem kontrol penjejak dinding sebelumnya [6][7], batasan orientasi dari sensor jarak ultrasonik untuk mengestimasi posisi sebagai parameter kontrol belum didefinisikan secara spesifik. Sehingga dalam penelitian ini digunakan metode perancangan sistem kontrol berbasis fungsi Lyapunov Barrier. Penggunaan fungsi Lyapunov barrier telah banyak diaplikasikan pada berbagai kasus, salah satunya dalam perancangan sistem kontrol kendaraan otonom dengan keterbatasan *nonholonomic* dan luas bidang pandang sensor [8]. Pemberian fungsi Barrier dapat mengatasi masalah sistem nonlinier yang memiliki batasan tertentu dengan cara mengoptimasi penentuan parameter kontrol yang akan digunakan untuk mengontrol sistem agar tetap berada dalam batasan yang ditentukan [9]. Sehingga dalam penelitian ini dirancang fungsi Lyapunov Barrier dengan batasan orientasi kursi roda dari sensor jarak ultrasonik dalam perancangan kontrol penjejak dinding acuan.

Pada penelitian ini, 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 sehingga kursi roda bergerak dengan jarak dan orientasi yang diinginkan terhadap dinding acuan. Dalam penelitian ini disajikan dua pendekatan kontrol yang berbeda yaitu kontrol penjejak dinding dengan batasan orientasi menggunakan fungsi Lyapunov Barrier, dan kontrol penjejak dinding dengan fungsi Lyapunov kuadrat sebagai pembanding dari hasil perancangan sistem kontrol. Baik pembuktian kestabilan asimtotik dan hasil simulasi dari kedua rancangan sistem kontrol dijabarkan untuk memverifikasi hasil penelitian berpotensi untuk diimplementasikan pada sistem kursi roda robotik.

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, penurunan fungsi Barrier sebagai dasar perancangan sistem kontrol penjejak dinding. Ketiga, perancangan dengan dilengkapi pembuktian kestabilan asimtotik dari pemberian sinyal kontrol pada sistem untuk membuktikan bahwa hasil rancangan sistem kontrol dapat mengatasi masalah penjejakan dinding dengan batasan sensor ultrasonik.

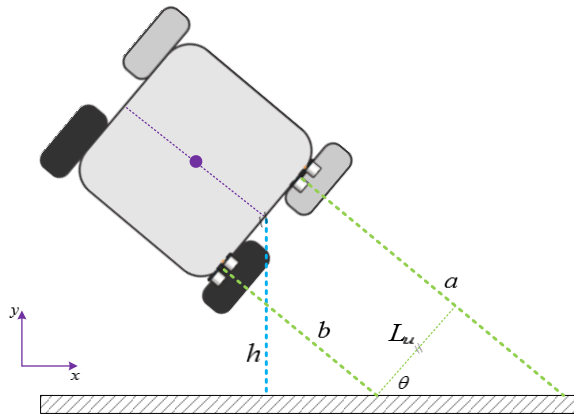
Penulisan makalah ini terdiri dari lima buah sub-topik. Sub-topik pertama yaitu pendahuluan, menjelaskan secara ringkas latar belakang, tujuan, serta kontribusi yang disajikan pada makalah. Sub-topik kedua yaitu konfigurasi sistem, menjabarkan komponen dari kursi roda robotik serta penggunaan sensor jarak ultrasonik untuk menentukan jarak dan sudut orientasi dari kursi roda terhadap dinding acuan. Sub-topik ketiga yaitu perumusan masalah, meliputi penurunan transformasi kecepatan roda penggerak, pemodelan kinematika kursi roda, pembuktian fungsi barrier, dan perancangan sistem kontrol penjejak dinding. Sub-topik keempat yaitu hasil simulasi untuk membandingkan kontrol penjejak dinding secara umum dengan kontrol penjejak dinding dengan batasan orientasi menggunakan program Matlab. Terakhir subtopik kelima yaitu kesimpulan dari hasil penelitian ini.

## 2 Konfigurasi Sistem

Dalam penelitian ini digunakan kursi roda elektrik dengan dua roda penggerak pada bagian belakang dan dua roda *caster* pada bagian depan. Masing-masing roda belakang terhubung dengan sebuah motor DC yang memperoleh suplai arus dan tegangan dari driver motor. Driver motor memperoleh masukan tegangan dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) dari

mikrokontroler untuk menentukan kecepatan putaran pada masing-masing roda belakang. Untuk menghitung jumlah rotasi pada masing-masing roda belakang digunakan rotary encoder yang juga terhubung dengan mikrokontroler.

Selanjutnya pada setiap sisi kanan dan kiri dari kursi roda terpasang dua buah sensor jarak ultrasonik pada bagian depan dan belakang dengan jarak  $L_u$  seperti diilustrasikan Gambar 1. Ketika kursi roda bergerak pada posisi disebelah 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  $b$ .



Gambar 2 Estimasi jarak dan sudut orientasi kursi roda

Dengan memanfaatkan informasi jarak yang telah diperoleh masing-masing sensor ultrasonik maka variabel-variabel pengukuran posisi kursi roda terhadap dinding  $h$  dan orientasi sudut dari kursi roda terhadap dinding  $\theta$  dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

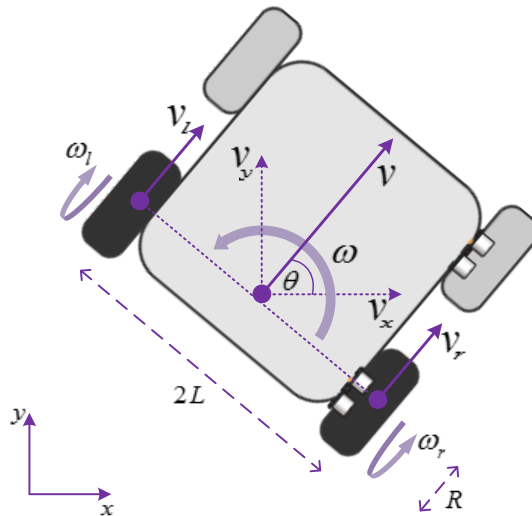
$$h = \left( \frac{a+b}{2} \right) \cos \theta \quad (1)$$

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

### 3 Perumusan Masalah

#### 3.1 Transformasi Kecepatan Roda

Gambar 2 merupakan skematik dari sistem kursi roda yang dikembangkan dalam penelitian ini.



**Gambar 2 Skema sistem kursi roda robotik**

Kecepatan linier  $v$  dan kecepatan sudut  $\omega$  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  $\omega_r$  dan roda belakang kiri  $\omega_l$

$$v_r = \omega_r R \tag{5}$$

$$v_l = \omega_l R \tag{6}$$

Persamaan (3) dan (4) dapat disubstitusikan pada persamaan (5) dan (6) menjadi:

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

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

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.

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

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

Dengan demikian desain kontrol kecepatan linear dan kecepatan sudut dapat digunakan untuk menentukan kecepatan roda belakang kanan dan kiri dari kursi roda.

### 3.2 Pemodelan Kinematika

Mengacu skema sistem Gambar 2, kinematika dari pergerakan kursi roda yang dirancang dapat dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan linier dan orientasi sudut berikut:

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

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

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

### 3.3 Fungsi Lyapunov Barrier

Untuk menjamin kondisi dari variabel keadaan tidak pernah melanggar batasan variabel keadaan, didefinisikan fungsi Lyapunov Barrier.

Berikut dirancang fungsi Barrier setiap keadaan  $\Omega_i$  untuk seluruh variabel keadaan  $x_i$ .

$$\Omega_i(x_i(t)) : (-\bar{x}_i, \bar{x}_i) \rightarrow R^+ ; i = 1, \dots, n_p + n_q \quad (14)$$

Fungsi Barrier ini kemudian digunakan dalam kandidat fungsi Lyapunov Barrier  $V_i$  [9,10]:

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

Dengan nilai  $x_i$  berada dalam rentang  $(-\bar{x}_i, \bar{x}_i)$ , maka  $V_i$  yang didefinisikan berdefinit positif dan memiliki nilai menuju tak hingga  $V_i(x_i(t)) \rightarrow \infty$  seiring dengan  $x_i$  menuju batasnya  $x_i(t) \rightarrow \pm \bar{x}_i$ . Penggunaan fungsi Barrier sebagai kandidat fungsi Lyapunov ditunjukkan oleh lemma berikut. [11][12]

#### **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  $\Omega_z$ :

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

Dengan dinamika dari sistem dapat diturunkan:

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

Didefinisikan suatu 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 kontinu pada  $\Omega_z$ . 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 kondisi awal variabel keadaan merupakan anggota fungsi Barrier  $z(0) \in \Omega_z$ . Jika,

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

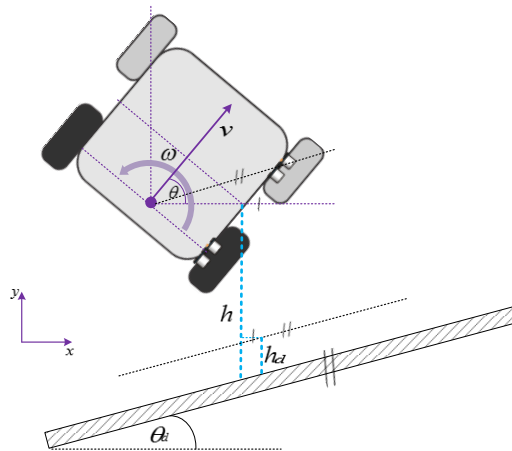
dalam set  $\Omega_z$ , variabel keadaan ada pada rentang batasnya  $z(t) \in \Omega_z$  setiap waktunya  $t \in [0, \infty)$ .

#### **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  $z_i \rightarrow \pm \bar{z}_i, i = 1, \dots, n_z$ , dan kondisi awal sistem juga berada dalam batasannya  $z_i(0) \in \Omega_z$ , maka variabel keadaan berada dalam batasannya setiap waktu  $z_i(t) \in \Omega_z; i = 1, \dots, n_z; \forall t \in [0, \infty)$ .

### **3.4 Desain Kontrol Penjejak Dinding**

Berikut dijabarkan penurunan kontrol penjejak dinding pada kursi roda robotik yang dirancang seperti digambarkan pada Gambar 3. Akan dibandingkan desain kontrol penjejak dinding tanpa batasan orientasi menggunakan fungsi Lyapunov kuadratik dan dengan batasan orientasi menggunakan fungsi Lyapunov Barrier.



**Gambar 3 Skema penjejak dinding**

Dalam permasalahan kontrol penjejak dinding, kursi roda dirancang untuk bergerak dengan jarak  $h_d$  dan orientasi  $\theta_d$  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  $e_\theta$  dari kursi roda dengan set point yang diinginkan adalah

$$e_h = h - h_d \tag{22}$$

$$e_\theta = \theta - \theta_d \tag{23}$$

Dinamika dari  $e_h$  dan  $e_\theta$  dapat diturunkan dari persamaan kinematika pergerakan kursi roda sebagai berikut:

$$\dot{e}_h = \dot{h} = v \sin e_\theta \tag{24}$$

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta} = \omega \tag{25}$$

### 3.4.1 Kontrol Tanpa Batasan Orientasi

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

$$V = \frac{e_h^2}{2} + \frac{e_\theta^2}{2} \tag{26}$$

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

$$\dot{V} = e_h \dot{e}_h + e_\theta \dot{e}_\theta \tag{27}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (22) dan (23) 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 yang diberikan 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 yang diinginkan, maka persamaan (17) akan menjadi:

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

### Teorema 1.

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

### Pembuktian.

Jika  $e_\theta$  memiliki nilai tertentu, turunan dari fungsi Lyapunov  $\dot{V}$  pada persamaan (31) akan selalu memberikan nilai negatif.  $V$  adalah fungsi semi-definit negatif  $V \leq 0$ , sehingga mengacu pada Barbalat lemma maka  $e_\theta$  akan menuju nol  $e_\theta \rightarrow 0$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$ . Sistem yang telah dirancang pun dapat dinyatakan stabil asimtotik global.

Kini dengan memberikan kontrol penjejak dinding pada persamaan (18) dan (19), lup tertutup dari sistem menjadi:

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

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

Dengan  $e_\theta$  akan menuju nol  $e_\theta \rightarrow 0$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$ ,  $e_h$  akan menuju nol  $e_h \rightarrow 0$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$ , sehingga kursi roda akan bergerak pada posisi sejajar terhadap dinding dengan jarak yang diinginkan.

### 3.4.2 Kontrol Dengan Batasan Orientasi

Untuk kontrol dengan batasan orientasi, sudut orientasi dari kursi roda  $e_\theta$  dirancang agar tidak mencapai batas maksimum sudut  $\bar{e}_\theta$  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 berdefinit positif untuk merancang kontrol penjejak 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 (22) dan (23) kedalam turunan fungsi Lyapunov Barrier 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 penjejak dinding dengan batasan orientasi yang diberikan pada kursi roda sebagai berikut:

$$v = v_c ; v_c \text{ bernilai konstan} \quad (39)$$

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

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

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

## Teorema 2.

Jika sistem yang dirancang memenuhi persyaratan kondisi awal (29) maka pada setiap waktu  $t \in [0, \infty)$ , maka  $e_\theta$  tidak akan melebihi batas  $\bar{e}_\theta$  yang telah didefinisikan sesuai persamaan (28).

Selanjutnya dengan memberikan masukan kontrol (39) dan (40) kedalam sistem pada persamaan (24) dan (25), nilai  $e_h$  dan  $e_\theta$  akan menuju titik kesetimbangan  $(e_h, e_\theta) \rightarrow (0, 0)$  sehingga dapat dinyatakan sistem stabil asimtotik.

## Pembuktian.

Dengan turunan dari fungsi Lyapunov  $\dot{V}$  adalah fungsi semi-definit negatif  $\dot{V} \leq 0$  untuk  $e_\theta$  anggota fungsi Barrier dibawah nilai batasnya pada persamaan (34), maka fungsi Lyapunov  $V$  terbatas pada rentangnya untuk setiap waktu  $V(e_\theta(t)) \leq V(e_\theta(0))$ ;  $\forall t \in [0, \infty)$ . ■

Kemudian bentuk penurunan yang sama dengan sebelumnya, jika  $e_\theta$  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  $e_\theta$  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 penjejak dinding pada persamaan (39) dan (40) ke dalam sistem (22) dan (23), lup tertutup dari sistem menjadi:

$$\dot{e}_h = v_c \sin e_\theta \quad (42)$$

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

Dari persamaan (36) dan (37) terlihat bahwa dengan  $e_\theta$  akan menuju nol  $e_\theta \rightarrow 0$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$  dengan,

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

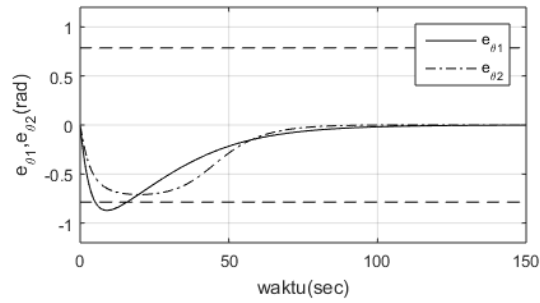
maka persamaan (43) hanya akan benar jika selisih  $e_h$  menuju nol  $e_h \rightarrow 0$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$ . Dengan demikian akan diperoleh  $e_\theta$  dan  $e_h$  menuju nol  $(e_h, e_\theta) \rightarrow (0, 0)$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$ .

#### 4 Hasil Simulasi

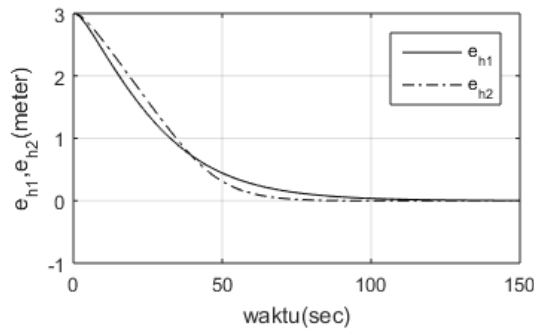
Berikut dilakukan evaluasi dari hasil simulasi pada MATLAB untuk membandingkan hasil rancangan pengontrol penjejak dinding tanpa batasan orientasi dengan fungsi Lyapunov kuadratik dan hasil rancangan pengontrol penjejak dinding dengan batasan orientasi sudut menggunakan fungsi Lyapunov Barrier.

Dalam simulasi yang dilakukan, ditetapkan kondisi awal  $e_h(0)$  sebesar 3 m dan  $v$  sebesar 0.1 m/s. Untuk batas pembacaan sensor jarak ultrasonik ditetapkan sebesar  $\bar{e}_\theta = \pi/4$  radian. Nilai  $\bar{e}_\theta$  ini diperoleh dari hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [6] dengan menggunakan rangkaian sensor jarak ultrasonik (PING)) Parallax.

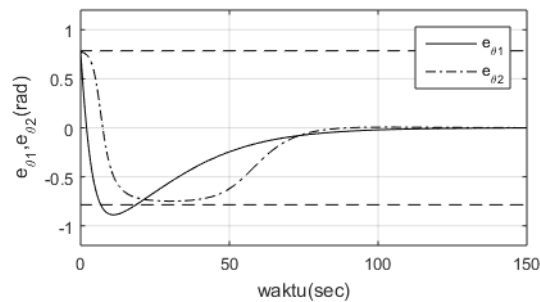
Respon  $e_h$  dan  $e_\theta$  kursi roda terhadap dinding acuan dengan keadaan awal  $e_\theta(0)$  sama dengan nol  $e_\theta(0) = 0$  ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Kemudian untuk respon sistem dengan  $e_\theta(0)$  mendekati batas atas orientasi sudut  $e_\theta(0) = \bar{e}_\theta$  bergerak menuju titik nol ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7, serta respon sistem dengan  $e_\theta(0)$  mendekati batas bawah orientasi sudut  $e_\theta(0) = -\bar{e}_\theta$  bergerak menuju titik nol ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



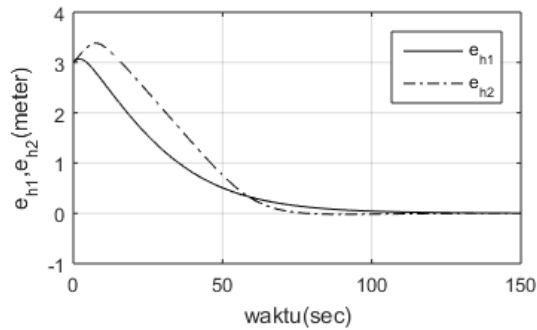
Gambar 4 Respon  $e_{\theta}$  dengan kondisi awal  $e_{\theta}=0$ ,  $e_{\theta 1}$  Lyapunov kuadrat,  $e_{\theta 2}$  dengan Lyapunov barrier



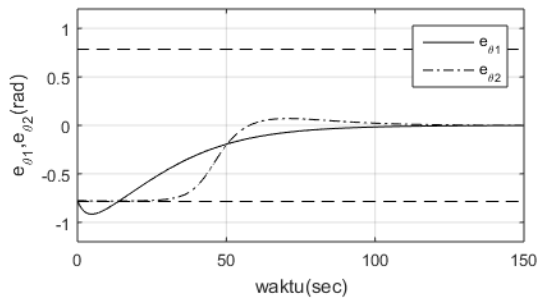
Gambar 5 Respon  $e_h$  dengan kondisi awal  $e_{\theta}=0$ ,  $e_{h 1}$  Lyapunov kuadrat,  $e_{h 2}$  dengan Lyapunov barrier



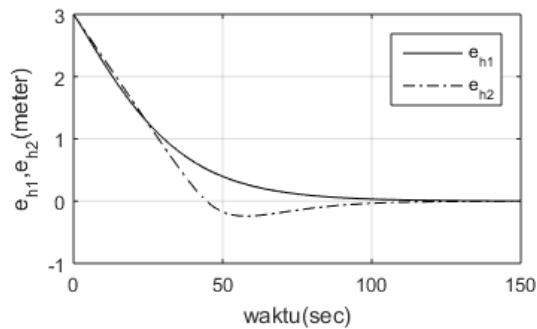
Gambar 6 Respon  $e_{\theta}$  dengan kondisi awal  $e_{\theta} \approx \bar{e}_{\theta}$ ,  $e_{\theta 1}$  Lyapunov kuadrat,  $e_{\theta 2}$  dengan Lyapunov barrier



Gambar 7 Respon  $e_h$  dengan kondisi awal  $e_\theta \approx \bar{e}_\theta$ ,  $e_{h1}$  Lyapunov kuadratik,  $e_{h2}$  dengan Lyapunov barrier



Gambar 8 Respon  $e_\theta$  dengan kondisi awal  $e_\theta \approx -\bar{e}_\theta$ ,  $e_{\theta1}$  Lyapunov kuadratik,  $e_{\theta2}$  dengan Lyapunov barrier



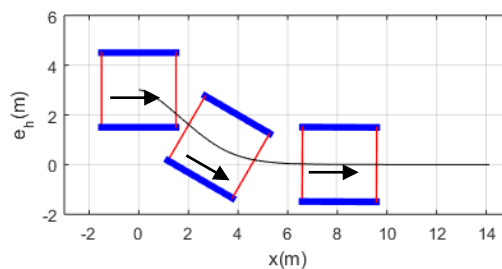
Gambar 9 Respon  $e_h$  dengan kondisi awal  $e_\theta \approx -\bar{e}_\theta$ ,  $e_{h1}$  Lyapunov kuadratik,  $e_{h2}$  dengan Lyapunov barrier

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 9 memperlihatkan bahwa untuk ketiga kasus kondisi awal  $e_\theta(0)$  yang berbeda, respon  $e_\theta$  pada pengontrol berbasis Lyapunov barrier tidak melewati batasan  $\bar{e}_\theta$  yang telah ditetapkan, sementara

respon  $e_\theta$  pada engontrol berbasis Lyapunov kuadratik pada ketiga kasus ini melewati batasan  $\bar{e}_\theta$  yang ditetapkan.

Pada hasil simulasi ini juga dapat terlihat kestabilan asimtotik sistem, dengan nilai  $e_h$  dan  $e_\theta$  dari kedua pengontrol menuju titik setimbang  $(e_h, e_\theta) \rightarrow (0,0)$  seiring waktu menuju tak hingga  $t \rightarrow \infty$ .

Beda respon  $e_\theta$  pada kedua pengontrol berdampak pada profil respon  $e_h$ . Pada Gambar 7 dan Gambar 9 terlihat terjadi *overshoot* pada 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. Berikut dapat dilihat pada Gambar 10 merupakan respon  $e_h$  terhadap  $x$  pada pengontrol penjejak dinding berbasis Lyapunov Barrier.



Gambar 10 Simulasi kursi roda robotic dengan kondisi awal  $\theta=0$

## 5 Kesimpulan

Makalah ini menyajikan penurunan model kursi roda robotik untuk kasus pengontrolan penjejak dinding dengan mempertimbangkan batasan orientasi sudut dari sensor jarak ultrasonik terhadap dinding acuan. Pengontrol dengan batasan orientasi sudut yang dirancang berbasis pada fungsi Lyapunov Barrier. Kestabilan asimtotik sistem dengan pengontrol dan perbandingan hasil simulasi dari respon sistem dengan pengontrol penjejak dinding umum berbasis fungsi Lyapunov kuadratik yang dirancang memperlihatkan bahwa pengontrol penjejak dinding berbasis fungsi Lyapunov Barrier dapat menjaga orientasi sudut tidak akan melanggar batasannya.

## 6 Daftar Pustaka

- [1] M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, "Robot modelling and control," 1<sup>st</sup> ed., John Wiley & Sons, 2006, pp. 23.
- [2] Y.-S. Xu, and S.K.-W Au, "Stabilization and path following of a single wheel robot," IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol.9, No.2, June 2004, pp. 407-419.
- [3] C.B. Low and D.-W. Wang, "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, March 2008, pp. 340-347.
- [4] Y.-L. Chen, J. Cheng, C. Lin, X.-Y Wu, Y.-S. Ou, Y.-S. Xu, "Classification-based learning by particle swarm optimization for wall-following robot navigation," Neuro-computing, Vol. 113, 2013, pp. 27-35.

- [5] A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, M.V. Faronov, O.I. Borisov, V.S. Gromov, S.M. Vlasov, N.A. Nikolaev, "Simple robust and adaptive tracking control for mobile robot," International Federation of Automatic Control, 2015.
- [6] Gunachandra, S. Chrisander, A. Widyotriatmo dan Suprijanto, "Wall following control for the application of a brain-controlled wheelchair," International Conference on Intelligent Autonomous Agents, Network and Systems, August 2014, pp. 36-41.
- [7] A. Widyotriatmo, Suprijanto, and S. Andronicus, "A collaborative control of brain computer interface and robotic wheelchair," 10<sup>th</sup> Asian Control Conference, pp. 24-29
- [8] A.Widyotriatmo and K.-S. Hong, "Configuration control of an autonomous vehicle under nonholonomic and field of view constraints," International Journal of Imaging and Robotics, Vol. 15, No. 3, 2015, pp. 126-139
- [9] A.Widyotriatmo and K.-S. Hong. "Asymtotic stabilization of nonLinear systems with state constraints," International Journal of Applied Mathematics and Statistics, Vol. 53, No. 3, 2015.
- [10] Ngo, K. B., Mahony, R., Jiang, Z. P., "Integrator backstepping functions for systems with multiple state constraints," IEEE Conf. Decision Control, Vol. 44, 2005, pp. 8306-8312.
- [11] Tee, K. P., Ge, S. S., Tay, E. H., "Barrie Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems," Automatica, Vol. 45, 2009, pp. 918-927.
- [12] Do, K., "Control of nonlinear systems with output tracking error constraints and its application to magnetic bearings," Int. J. Control, Vol. 83, 2010, pp. 1999-1216.