

**Program Studi Sarjana Teknik Elektro
(Konsentrasi Mekatronika)**
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Katolik Parahyangan
Jl. Ciumbuleuit no 94, Bandung 40141, INDONESIA



Buku Tugas Akhir

Perancangan Kontrol Pelacakan Lintasan untuk Robot Otonom Bergerak Beroda dengan Penggerak Diferensial

Stephen I. C. Gulo

2017630031

Pembimbing:

Tua A. Tamba, ST., Ph.D.

Faisal Wahab, S.Pd., M.T.

Diajukan untuk memenuhi salah satu
syarat mendapatkan gelar Sarjana
Teknik

Agustus 2021

Lembar Persetujuan Selesai



Tugas Akhir berjudul:

Perancangan Kontrol Pelacakan Lintasan untuk Robot Otonom Bergerak Beroda dengan Penggerak Diferensial

oleh:

Stephen I. C. Gulo

NPM : 2017630031

ini telah diujikan pada Sidang Tugas Akhir 2 (IME 184500) di Program Studi Sarjana Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan serta dinyatakan SELESAL.

TANDA PERSETUJUAN SELESAL,

Bandung, 8 September 2021

Ketua Program Studi Sarjana

Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika

Dr. Ir. Ali Sadiyoko, M.T

Pembimbing Pertama,

Pembimbing Kedua,

Tua A. Tamba, ST., Ph.D.

Faisal Wahab, S.Pd., M.T.

PERNYATAAN TIDAK MENCONTEK ATAU MELAKUKAN TINDAKAN PLAGIAT

Saya yang bertandatangan dibawah ini,

STEPHEN IVANND A CHRISBY GULO

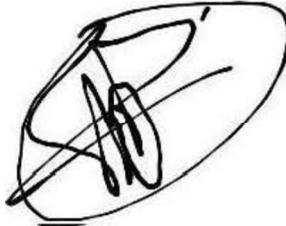
Dengan ini menyatakan bahwa Buku Tugas Akhir dengan judul:

'PERANCANGAN KONTROL PELACAKAN LINTASAN UNTUK ROBOT
OTONOM BERGERAK BERODA DENGAN PENGGERAK DIFERENSIAL'

adalah hasil pekerjaan Saya. Seluruh ide, pendapat atau materi dari Sumber lain
telah dikutip dengan cara penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini Saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak
sesuai dengan kenyataan maka Saya bersedia menanggung sanksi yang akan
dikenakan kepada Saya.

Bandung, 8 September 2021



Stephen Ivannda Chrisby Gulo

NPM: 2017630031

Abstrak

Buku Tugas Akhir ini mengajukan metode perancangan kontrol pada *Differential Drive Wheeled Mobile Robots* (DDWMR) untuk melakukan penjejakan suatu lintasan referensi. Perancangan kontrol dilakukan pada model kinematika sistem yang memiliki tiga buah variabel keadaan dan dua buah variabel masukan. Karena jumlah variabel masukan yang dapat dikontrol lebih kecil dari jumlah variabel keadaan, maka sistem termasuk dalam jenis sistem kurang teraktuasi (*underactuated system*). Objektif operasional pada robot yang ditinjau adalah melakukan penjejakan terhadap suatu lintasan referensi tertentu sehingga perlu dirancang metode pengontrol yang mampu mengendalikan robot agar dapat menjejaki lintasan referensi yang diinginkan. Perancangan kontrol didesain berdasarkan analisis kestabilan Lyapunov. Terdapat dua kontribusi pada Buku Tugas Akhir ini. Pertama, melakukan implementasi metode untuk mendesain lintasan referensi yang ingin dilacak dari posisi awal robot menuju posisi terakhir. Kedua, merancang pengontrol pada DDWMR yang dapat menjejaki lintasan referensi yang telah didesain pada tahap sebelumnya. Untuk memverifikasi hasil perancangan, dilakukan simulasi dan eksperimen terkait desain lintasan referensi serta implementasi kontrol penjejakan lintasan pada model DDWMR yang diperoleh. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lintasan referensi merupakan lintasan yang layak dan mampu menghubungkan beberapa titik jalan yang memiliki spesifikasi yang telah ditentukan. Selain itu, hasil simulasi juga memverifikasi bahwa algoritme kontrol yang telah dirancang mampu menggerakkan robot untuk menjejaki lintasan referensi yang telah didesain pada tahap sebelumnya. Keandalan algoritme pengontrol juga divalidasi melalui proses eksperimen secara riil dan dapat diverifikasi bahwa algoritme pengontrol dapat diimplementasikan secara praktis untuk menggerakkan DDWMR dalam melacak lintasan referensi.

Abstract

This final research project reports the development of tracking controller for a differential drive wheeled mobile robot (DDWMR) platform. The motions of the DDWMR platform are described using its kinematic model. The objective of the control design task is to ensure that the robot can track a predetermined reference trajectory. To achieve this objective, this project develops a method to generate a reference trajectory between given initial and final poses using polynomial function curves. Based on the constructed reference trajectory, Lyapunov-based method is then used to derive tracking control signal for the left and right wheels of the DDWMR to ensure the tracking of the reference trajectory. Both simulation and experimental results are described to illustrate the effectiveness of the proposed trajectory generation and tracking controller design methods.

Kata Pengantar

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan berkat dan rahmat-Nya, Buku Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Buku Tugas Akhir yang berjudul 'Perancangan Kontrol Pelacakan Lintasan untuk Robot Otonom Bergerak Beroda dengan Penggerak Diferensial' disusun, sebagai syarat untuk mengikuti Sidang Tugas Akhir pada mata kuliah Tugas Akhir II (IME 184500) pada Program Studi Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika Universitas Katolik Parahyangan. Disadari bahwa penulisan Buku Tugas Akhir ini dapat terselesaikan karena ada banyak dorongan yang diberikan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

- **Tua A. Tamba, ST., Ph.D. dan Faisal Wahab, S.Pd., M.T.** selaku dosen pembimbing penulis pada mata kuliah Tugas Akhir II di Program Studi Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika Universitas Katolik Parahyangan.
- **Bapak Eliyumus Gulo dan Ibu Yasnah Manao** selaku orang tua yang telah memberi dukungan dan motivasi agar penulis selalu semangat dalam mengerjakan Buku Tugas Akhir hingga selesai.
- **Nenek Mafini** yang tiada hentinya terus mendoakan kelancaran penulis dalam membuat Buku Tugas Akhir ini.
- **Yehezkiel Chrisby Gulo dan Bram Helmi Chrisby Gulo** selaku abang dan adik yang telah memberikan motivasi kepada penulis untuk selalu memberikan yang terbaik dalam mengerjakan Buku Tugas Akhir ini.
- **Jonathan Chandra, Ajeng Rizky Octavia, dan Roinaldo Pho** selaku kakak tingkat yang telah menolong penulis dalam memberikan saran dan kritik dalam penyusunan Buku Tugas Akhir ini.
- **Muhammad Akbar Almusazahan, Erwin Setiawan, Frans Cevin Hutabarat, Glenn Bonaventura, Leornadus Gilang, Wendi Kristianto, Radifsya Leyndiva Desvabrahma, Justin Sunarto, dan Mathilda Laurensia** yang telah memberikan dukungan, perhatian, serta diskusi yang bermanfaat dalam penyusunan Buku Tugas Akhir ini.

- Kepada seluruh dosen serta tata usaha Program Studi Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberikan bekal ilmu serta dukungan sehingga penulis dapat menyusun Buku Tugas Akhir ini.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan semua pihak yang telah menolong. Penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya jika ada kekurangan atau hal-hal yang kurang berkenan dalam penyusunan Buku Tugas Akhir ini. Akhir kata, terimakasih atas pengertian dan kerja sama Anda. Besar harapan penulis, agar Buku Tugas Akhir ini dapat memberikan kontribusi yang berguna bagi perkembangan Program Studi Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika Universitas Katolik Parahyangan pada khususnya serta khazanah keilmuan Teknik Mekatronika pada umumnya.

Daftar Isi

Abstrak	ix
Abstract	xi
Kata Pengantar	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Tabel	xix
Daftar Gambar	xxi
Daftar Simbol dan Variabel	xxvii
Daftar Singkatan	xxix
1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah dan Asumsi	5
1.4 Tujuan Tugas Akhir	5
1.5 Manfaat Tugas Akhir	5
1.6 Metodologi Penelitian Tugas Akhir	6
1.7 Sistematika Penulisan	7
2 Tinjauan Pustaka	9
2.1 Robot Bergerak Beroda	9
2.2 Model Kinematika DDWMR	10
2.3 Kontrol Penjejakan Lintasan	14
2.4 Analisis Kestabilan Lyapunov	18

2.4.1	Pendahuluan	19
2.4.2	Metode Lyapunov Langsung	20
3	Perancangan Sistem	22
3.1	Generasi Lintasan Analitik	22
3.2	Kurva Halus Global	23
3.3	Perancangan Kontrol Penjejakan Berbasis Analisis Kestabilan Lyapunov	27
3.3.1	Profil Kecepatan Angular	30
3.4	Identifikasi Perangkat & Tempat Pengujian	31
3.4.1	Deskripsi LEGO	34
3.5	Persiapan Eksperimen	35
4	Analisis Sistem	38
4.1	Simulasi Lintasan	38
4.1.1	Kasus Tanpa Batasan Kondisi	38
4.1.2	Kasus Dengan Batasan Kondisi	41
4.2	Simulasi Model Putaran Tertutup DDWMR	44
4.2.1	Simulasi Untuk Kasus Tanpa Batasan Kondisi	45
4.2.2	Simulasi Untuk Kasus Dengan Batasan Kondisi	48
4.3	Implementasi Lokalisasi DDWMR dengan Pengolahan Citra	51
4.3.1	Kalibrasi Kamera	51
4.3.2	Segmentasi Gambar	59
4.3.3	Proses Pengenalan Objek (<i>Morphological</i>)	65
4.4	Lokalisasi Waktu Riil (<i>Real Time</i>)	67
4.4.1	Konversi Satuan Piksel	67
4.4.2	Konversi Kecepatan LEGO	68
4.5	Eksperimen Putaran Terbuka	71
4.5.1	Skenario Gerak Lurus	72
4.5.2	Skenario Gerak Melingkar	73
4.5.3	Gerak Membentuk Kurva Sinusoidal	74
4.6	Simulasi Putaran Tertutup	76
4.6.1	Simulasi Dengan Dua Titik Jalan	76
4.6.2	Simulasi Dengan Tiga Titik Jalan	79
4.6.3	Simulasi Dengan Empat Titik Jalan	82
4.6.4	Simulasi Dengan Sembilan Titik Jalan	84
4.7	Eksperimen Putaran Tertutup	88
4.7.1	Eksperimen Dengan Dua Titik Jalan	89
4.7.2	Eksperimen Dengan Tiga Titik Jalan	92
4.7.3	Eksperimen Dengan Empat Titik Jalan	95
4.7.4	Eksperimen Dengan Sembilan Titik Jalan	98
5	Simpulan dan Saran	101
5.1	Simpulan	101

5.2	Saran	102
	Daftar Pustaka	105
	Lampiran A Fungsi Lintasan Referensi	110
A.1	Fungsi Lintasan Referensi Tanpa Batasan Kondisi	111
A.2	Lintasan Referensi Dengan Batasan Kondisi	112
A.2.1	Parameter Batasan Kondisi Untuk Setiap Segmen	112
A.2.2	Parameter Konstanta $c_0 \dots c_6$ dan $d_0 \dots d_6$ Untuk Masing-Masing Segmen Fungsi Lintasan Referensi	113
	Lampiran B Diagram Alir Implementasi Metode Kontrol	116
B.1	Diagram Alir Implementasi Putaran Terbuka	117
B.2	Diagram Alir Implementasi Putaran Tertutup	118
	Lampiran C Tabel Error Hasil Eksperimen Pelacakan Lintasan Referensi	120
C.1	Error Hasil Eksperimen Pelacakan Lintasan Referensi Dua Titik Jalan	121
C.2	Error Hasil Eksperimen Pelacakan Lintasan Referensi Tiga Titik Jalan	123
C.3	Error Hasil Eksperimen Pelacakan Lintasan Referensi Empat Titik Jalan	124

Daftar Tabel

4.1	Tabel koordinat titik jalan pada perancangan lintasan referensi.	39
4.2	Tabel titik tambahan beserta waktu capai.	42
4.3	Tabel koordinat titik jalan pada simulasi dengan dua titik jalan.	77
4.4	Tabel koordinat titik jalan pada simulasi dengan tiga titik jalan.	79
4.5	Tabel titik tambahan pada simulasi dengan tiga titik jalan.	80
4.6	Tabel koordinat titik jalan pada simulasi dengan empat titik jalan.	82
4.7	Tabel titik tambahan pada simulasi dengan empat titik jalan.	83
4.8	Tabel koordinat titik jalan pada simulasi dengan sembilan titik jalan.	86
4.9	Tabel titik tambahan pada simulasi dengan sembilan titik jalan.	86
4.10	Tabel koordinat titik jalan pada eksperimen dengan dua titik jalan.	90
4.11	Tabel koordinat titik jalan pada eksperimen dengan tiga titik jalan.	93
4.12	Tabel titik tambahan pada eksperimen dengan tiga titik jalan.	93
4.13	Tabel koordinat titik jalan pada eksperimen dengan empat titik jalan.	96
4.14	Tabel titik tambahan pada eksperimen dengan empat titik jalan.	96
C.1	Data eror hasil eksperimen antara pose LEGO terhadap lintasan referensi dengan dua titik jalan.	121
C.2	Lanjutan Tabel C.1.	122
C.3	Data eror hasil eksperimen antara pose LEGO terhadap lintasan referensi dengan tiga titik jalan.	123
C.4	Data eror hasil eksperimen antara pose LEGO terhadap lintasan referensi dengan empat titik jalan.	124
C.5	Lanjutan Tabel C.4.	125

Daftar Gambar

1.1	Bentuk umum DDWMR dalam merancang kontrol.	3
1.2	Proses penelitian Tugas Akhir.	7
2.1	Model DDWMR dalam melakukan analisis geometri.	11
2.2	Lapangan tempat pengujian. (a) Peletakan dua gaya paralel pada DDWMR; (b) Proses penjumlahan dua gaya paralel.	12
2.3	Vektor kecepatan linier roda kiri dan kanan saat melakukan rotasi <i>counterclockwise</i>	13
2.4	Visualisasi eror antara pose robot aktual dan lintasan referensi.	15
2.5	Visualisasi penjabaran eror pose robot aktual terhadap pose lintasan referensi.	16
2.6	Ilustrasi beberapa konsep kestabilan. (a) Stabil Lyapunov; (b) Stabil asimtotik; (c) Tidak stabil.	20
3.1	Visualisasi metode kurva halus global.	26
3.2	Ilustrasi penempatan titik tambahan untuk memperoleh parameter batasan kondisi dua titik jalan awal dan akhir.	27
3.3	LEGO MINDSTORM EV3.	31
3.4	LOGITECH C920.	32
3.5	Adaptor nirkabel WIFI EDIMAX N150.	33
3.6	Penempatan perangkat di dalam ruangan.	34
3.7	Bagian-bagian pada LEGO.	35
3.8	Penanda posisi.	36
3.9	Lapangan tempat pengujian. (a) Lapangan pengujian sebelum ditambah triplek; (b) Lapangan pengujian sesudah ditambah triplek.	36
3.10	Dimensi lapangan.	37
4.1	Lintasan/Posisi referensi untuk kasus tanpa batasan kondisi.	39
4.2	Sudut orientasi referensi untuk kasus tanpa batasan kondisi.	40
4.3	Kecepatan linier referensi untuk kasus tanpa batasan kondisi.	40
4.4	Kecepatan angular referensi untuk kasus tanpa batasan kondisi.	41
4.5	Hasil plot fungsi lintasan/posisi referensi DDWMR untuk kasus dengan batasan kondisi.	43

4.6 Hasil simulasi fungsi sudut orientasi referensi DDWMR dengan batasan kondisi.	43
4.7 Hasil plot fungsi kecepatan linier referensi DDWMR untuk kasus dengan batasan kondisi.	44
4.8 Hasil plot fungsi kecepatan angular referensi DDWMR dengan batasan kondisi.	44
4.9 Diagram blok simulasi putaran tertutup.	45
4.10 Perbandingan hasil simulasi putaran tertutup dengan lintasan referensi tanpa batasan kondisi.	46
4.11 Perbandingan sudut orientasi referensi dengan aktual untuk kasus tanpa batasan kondisi.	46

4.33 Fokus pada bagian gambar dengan intensitas warna biru yang relatif tinggi.	62
4.34 <i>Grayscale</i> menggunakan lapisan gambar RGB. (a) Lapisan berwarna merah; (b) Lapisan berwarna hijau; (c) Lapisan berwarna merah; (d) Gambar RGB.	63
4.35 Visualisasi pemanfaatan proses pemisahan warna untuk <i>grayscale</i> . (a) Penambahan objek bangku berwarna merah; (b) Representasi lapisan merah dari gambar RGB.	64
4.36 Visualisasi proses binarisasi pada setiap lapisan warna. (a) Binarisasi lapisan warna merah; (b) Binarisasi lapisan warna hijau; (c) Binarisasi lapisan warna biru; (d) Hasil penggunaan <i>operator</i> gerbang logika	

4.55	Eror posisi pada simulasi antara DDWMR terhadap lintasan referensi dengan empat titik jalan.	83
4.56	Eror sudut orientasi pada simulasi antara DDWMR terhadap lintasan referensi dengan empat titik jalan.	84
4.57	Sinyal kontrol untuk kedua motor pada simulasi antara DDWMR terhadap lintasan referensi dengan empat titik jalan.	84
4.58	Posisi DDWMR hasil simulasi pelacakan lintasan referensi dengan sembilan titik jalan.	85
4.59	Eror posisi pada simulasi antara DDWMR terhadap lintasan referensi dengan sembilan titik jalan.	87
4.60	Eror sudut orientasi pada simulasi antara DDWMR terhadap lintasan	

4.78 Sinyal kontrol untuk kedua motor pada simulasi antara DDWMMR terhadap lintasan referensi dengan sembilan titik jalan menggunakan konstanta pengontrol yang rendah.	100
B.1 Diagram alir pengujian putaran terbuka.	117
B.2 Diagram alir pengujian putaran tertutup.	118

Daftar Simbol dan Variabel

X	Sumbu horizontal koordinat <i>global cartesian</i>	X
Y	Sumbu vertikal koordinat <i>global cartesian</i>	Y
	Posisi pusat massa DDWMR di sumbu X	x
	Posisi pusat massa DDWMR di sumbu Y	y
	Sumbu horizontal <i>frame</i> robot	x_{robot}
	Sumbu vertikal <i>frame</i> robot	y_{robot}
	Kecepatan linier DDWMR	v
	Kecepatan angular DDWMR (<i>counterclockwise</i>)	ω
	Kecepatan angular roda kanan	ω_R
	Kecepatan angular roda kiri	ω_L
	Jarak antara dua roda robot DDWMR	$2l$
	Jari-jari roda DDWMR	r
	Diameter roda DDWMR	$2r$
	Sudut orientasi DDWMR	φ
	Turunan pertama posisi x aktual robot terhadap waktu	\dot{x}
	Turunan pertama posisi y aktual robot terhadap waktu	\dot{y}
	Turunan pertama sudut orientasi φ aktual robot terhadap waktu	$\dot{\varphi}$
	Turunan pertama posisi x referensi robot terhadap waktu	\dot{x}^*
	Turunan pertama posisi y referensi robot terhadap waktu	\dot{y}^*
	Turunan pertama sudut orientasi φ referensi robot terhadap waktu	$\dot{\varphi}^*$
	Kecepatan linier referensi DDWMR	v^*
	Kecepatan angular referensi DDWMR	ω^*
	Fungsi Lyapunov	V
	Simbol dari n buah dimensi bola dengan radius ε	Σ_ε
	Simbol dari n buah dimensi bola dengan radius δ	Σ_δ
	Kedadaan awal (<i>initial state</i>) ketika t_0	x_0
	Kedadaan titik ekulibrum	x_e
	Perbedaan posisi horizontal antara robot aktual dan robot referensi terhadap sumbu x_{robot}	e_1
	Perbedaan posisi vertikal antara robot aktual dan robot referensi terhadap sumbu y_{robot}	e_2
	Perbedaan sudut orientasi vektor kecepatan linier robot referensi terhadap sumbu x_{robot}	e_3
	Turunan pertama terhadap waktu	$\frac{d}{dt}$
	Turunan kedua terhadap waktu	$\frac{d^2}{dt^2}$

t	Waktu
t_0	Waktu awal simulasi
t_f	Waktu akhir simulasi
(x_0, y_0)	Titik jalan awal
(x_f, y_f)	Titik jalan akhir
(K_1, K_2, K_3)	Konstanta pengontrol
γ	Titik tambahan pada perancangan lintasan referensi
$c_0 \cdots c_6$	Konstanta polinomial orde enam di sumbu horizontal
$d_0 \cdots d_6$	Konstanta polinomial orde enam di sumbu vertikal
w	Faktor skala
R	Matriks rotasi (parameter ekstrinsik)
z	Vektor translasi (parameter ekstrinsik)
Q	Matriks intrinsik
s	Koefisien <i>skew</i>
(f_x, f_y)	<i>Focal length</i> dalam piksel
(c_x, c_y)	Representasi <i>optical center</i> dalam piksel
$x_{distorted}$	Koordinat titik gambar yang terdistorsi di sumbu X
$y_{distorted}$	Koordinat titik gambar yang terdistorsi di sumbu Y
(k_1, k_2, k_3)	Koefisien distorsi radial
(p_1, p_2)	Koefisien distorsi tangensial
k	Waktu diskret
x_{piksel}	Dimensi satu piksel dalam satuan (m) pada sumbu horizontal
y_{piksel}	Dimensi satu piksel dalam satuan (m) pada sumbu vertikal
(x_L, x_R)	Nilai kecepatan persentase motor kiri dan kanan LEGO
(y_L, y_R)	Nilai kecepatan motor kiri dan kanan LEGO dalam satuan (rad s^{-1})
$\omega_{R \text{ LEGO}}$	Kecepatan persentase motor kanan LEGO
$\omega_{L \text{ LEGO}}$	Kecepatan persentase motor kiri LEGO
$K_{\omega_{R \text{ LEGO}}}$	Konstanta pengali kecepatan persentase motor kanan LEGO
$K_{\omega_{L \text{ LEGO}}}$	Konstanta pengali kecepatan persentase motor kiri LEGO

Daftar Singkatan

DDWMR	<i>Differential Drive Wheeled Mobile Robots</i>
KBBI	Kamus Besar Bahasa Indonesia
MIMO	<i>Multi Input Multi Output</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
DC	<i>Direct Current</i>
ROI	<i>Region Of Interest</i>

Bab 1

Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang masalah yang menjadi motivasi untuk melakukan penelitian terkait pengontrolan *Differential Drive Wheeled Mobile Robots* (DDWMR) dalam melakukan penjejakan/pelacakan suatu lintasan referensi tertentu. Bab ini juga berisi mengenai identifikasi dan perumusan masalah berdasarkan penjabaran latar belakang masalah. Selain itu, dijelaskan juga batasan masalah dan asumsi dalam penelitian, tujuan, manfaat, metodologi, dan sistematika penulisan dari Buku Tugas Akhir.

1.1 Latar Belakang Masalah

Robot bergerak beroda (*wheeled mobile robots*) merupakan robot yang dapat bergerak dari suatu titik menuju titik lain secara otonom, tanpa bantuan eksternal dari manusia [1]. Berbeda dari mayoritas robot pada industri yang hanya dapat bergerak pada ruang kerja terbatas, robot bergerak beroda memiliki fitur khusus karena dapat bergerak dengan bebas dalam ruang konfigurasi yang telah ditentukan. Kemampuan mobilitas tersebut membuat aplikasi penggunaan robot bergerak beroda dalam kehidupan nyata dapat dilakukan pada lingkungan yang terstruktur maupun tidak terstruktur. Robot jenis ini sudah banyak diaplikasikan dalam kehidupan nyata untuk berbagai tujuan seperti pelayanan medis dan melakukan inspeksi serta pengawasan terhadap area yang berbahaya [2].

Mengontrol DDWMR agar mengikuti sebuah lintasan referensi tertentu merupakan salah satu tantangan penting dalam studi dan perancangan DDWMR. Hal tersebut disebabkan oleh sistem yang memiliki batasan *nonholonomic* di mana robot tidak dapat melakukan gerak searah dengan sumbu putar roda. Sebagai contoh, dalam sebuah ruang konfigurasi dua dimensi (*cartesian coordinate*), DDWMR sedang berada pada posisi sudut orientasi 0° terhadap sumbu koordinat horizontal tidak dapat melakukan gerak menyamping pada sumbu koordinat vertikal. Untuk dapat

melakukan gerak translasi pada sumbu koordinat vertikal, robot harus melakukan gerak rotasi terlebih dahulu sebesar 90° . Untuk menyelesaikan objektif kontrol tersebut, perlu dilakukan proses pendefinisian eror berupa perbedaan antara pose aktual robot terhadap pose referensi yang diinginkan [3]. Sistem kontrol yang dirancang nantinya harus menjamin nilai eror pose minimum atau menuju nol.

Secara umum, struktur DDWMR terbagi menjadi tiga subsistem, yaitu struktur mekanis, aktuator, dan sumber tenaga. Dalam merancang kontrol, terdapat berbagai pendekatan dengan mempertimbangkan salah satu atau beberapa dari tiga subsistem tersebut. Menurut referensi [4], pendekatan untuk memecahkan masalah tersebut dapat diklasifikasi berdasarkan pembuatan model matematis dari struktur mekanis. Terdapat dua jenis model, yaitu merancang kontrol dengan meninjau model kinematika atau berdasarkan model dinamika. Pendekatan model kinematika terbagi menjadi tiga jenis, yaitu: (i) mempertimbangkan kinematika struktur mekanis [5,6], (ii) mempertimbangkan kinematika struktur mekanis dan dinamika dari aktuator [7,8], (iii) mempertimbangkan kinematika struktur mekanis, dinamika dari aktuator, dan dinamika sumber tenaga [9,10]. Pada pendekatan model dinamika, perancangan kontrol dapat dilakukan dengan dua metode: (i) mempertimbangkan dinamika struktur mekanis [11,12], (ii) mempertimbangkan dinamika struktur mekanis dan dinamika aktuator [13,14].

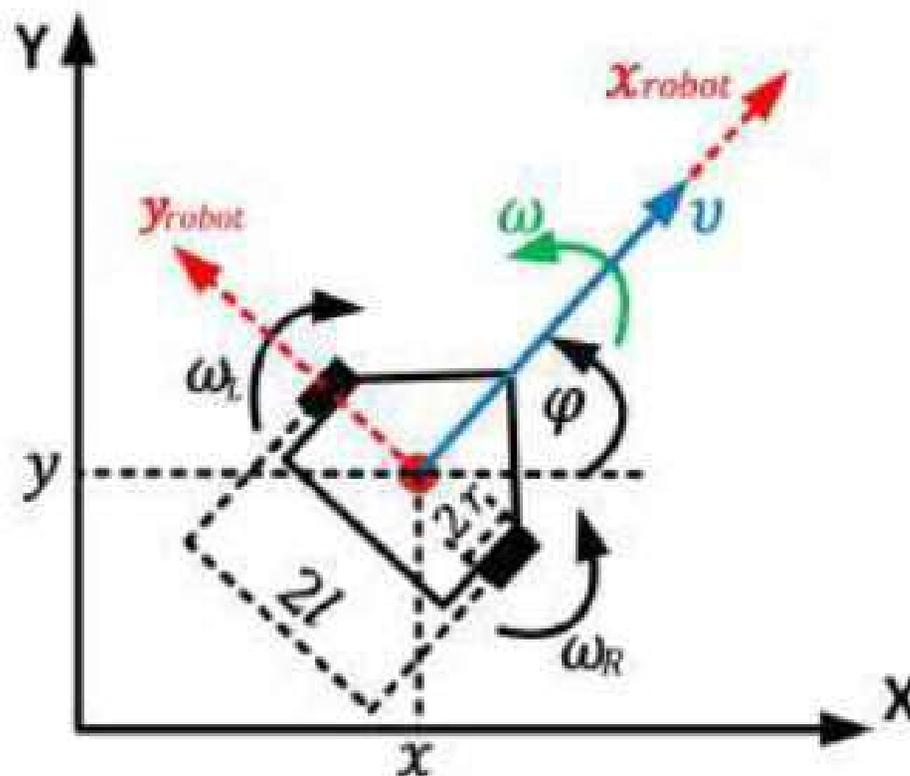
Berdasarkan kajian literatur, terdapat beberapa metode perancangan kontrol yang dapat diimplementasikan pada DDWMR, yaitu:

1. Pengontrol kinematika yang berbasis analisis kestabilan Lyapunov [5].
2. Pengontrol adaptif [15].
3. Kombinasi antara pengontrol kinematika dan *neural network* [16].
4. Kombinasi antara pengontrol kinematika, *differential flatness*, dan PI (*Proportional Integral*) [4].

Pada referensi [5], dikembangkan rancangan kontrol kinematika untuk melakukan pelacakan lintasan referensi berbasis pada metode Lyapunov dengan *control input* yang terbatas untuk menjamin DDWMR stabil asimtotik. Pada referensi [15] dirancang kontrol kinematika DDWMR agar dapat merancang pengontrol dinamika torsi dengan pendekatan *adaptive backstepping*. Pada referensi [4] didesain pengontrol untuk pelacakan lintasan referensi menggunakan pengontrol *hierarchichal switch* di mana pengontrol kinematika, *differential flatness*, dan PI (*Proportional Integral*) masing-masing diaplikasikan terhadap tiga subsistem dari DDWMR, yaitu struktur mekanis, aktuator, dan sumber tegangan. Pada referensi [16] diimplementasikan metode kontrol kinematika dan pengontrol torsi jaringan neural pada sekumpulan robot agar selalu terpusat secara asimtotik untuk membentuk suatu formasi yang telah ditentukan di sepanjang lintasan referensi yang telah ditentukan.

Bentuk umum struktur DDWMR dalam merancang pengontrol dapat ditinjau pada Gambar 1.1 di mana kedua roda memiliki jarak sebesar $2l$ dan diameter masing-masing

roda sebesar $2r$. Kedua notasi tersebut dinyatakan dalam satuan meter (m). Masing-masing roda kiri dan kanan memiliki kecepatan angular yang dinotasikan sebagai ω_L dan ω_R dengan satuan radian per detik (rad s^{-1}). Posisi robot direpresentasikan pada sebuah koordinat *global cartesian* (X, Y) oleh titik berwarna merah dengan koordinat (x, y) dan nilainya dinyatakan dalam satuan meter (m). Titik tersebut merupakan *origin* dari *frame* robot [15]. Sudut orientasi dari robot dinotasikan sebagai φ di mana didefinisikan sebagai perbedaan sudut antara vektor kecepatan linier DDWMR terhadap sumbu X dan nilainya dinyatakan dalam satuan radian (rad). Titik (x, y, φ) tersebut juga dapat dinyatakan sebagai pose. Badan robot secara keseluruhan mempunyai kecepatan linier v yang segaris dengan sumbu horizontal *frame* robot (x_{robot}) dan nilainya dinyatakan dalam satuan meter per detik (m s^{-1}) serta memiliki kecepatan angular atau kecepatan rotasi yang dinotasikan ω dengan nilai satuannya radian per detik (rad s^{-1}).



Gambar 1.1. Bentuk umum DDWMR dalam merancang kontrol.

Persoalan lain juga muncul di mana aplikasi pada robot yang bergerak secara otonom (*autonomous mobile robot*) membutuhkan referensi lintasan global (*global path*) yang harus dilacak oleh robot tersebut. Pembuatan lintasan perlu dilakukan sebagai referensi yang perlu diikuti oleh DDWMR agar mencapai posisi akhir dari posisi awal robot bergerak. Referensi [17] menyebutkan bahwa perancangan gerak untuk robot otonom merupakan hal yang tidak mudah karena batasan *nonholonomic* dari robot (batasan kinematika) di mana variabel dari sistem yang diturunkan terhadap waktu (seperti \dot{x} , \dot{y} , $\dot{\varphi}$) tidak dapat diintegrasikan secara simultan. Selain itu, kandidat lintasan referensi yang harus dilewati oleh robot tidak selalu layak (*feasible*) untuk

sistem *nonholonomic* sehingga robot kesulitan dalam melacaknya. Agar lintasan referensi yang ditentukan dapat dilacak oleh robot dengan batasan *nonholonomic*, maka perancangan lintasan referensi yang layak untuk dilacak juga perlu dilakukan secara bersamaan.

Referensi [18] menyebutkan bahwa pada akhirnya, lintasan referensi yang layak dapat menjadi acuan bagi robot *nonholonomic* untuk dapat bergerak dari posisi awal menuju posisi akhir yang diinginkan dengan batasan kondisi yang telah ditentukan. Metode yang diperkenalkan untuk membuat lintasan yang layak adalah generasi lintasan analitik (*analytic trajectory generation*) di mana metode tersebut dapat berfungsi pada ruang kerja tanpa halangan/rintangannya. Selain itu, metode ini dapat bekerja dengan baik pada skala regional untuk mengontrol dalam waktu riil di mana robot hanya memanfaatkan solusi analitik dari lintasan.

Syarat lintasan referensi dapat dikatakan layak adalah garis kurvanya halus serta memenuhi batasan kondisi yang telah ditentukan. Referensi [19] menjelaskan bahwa kurva dapat dikatakan halus jika tidak memiliki kemiringan (*slope*) yang diskontinu saat melewati beberapa titik pada sebuah bidang. Jika dikaitkan pada konteks pembuatan lintasan referensi, solusi analitik tersebut memiliki turunan kedua untuk setiap titik dari lintasan referensi. Karena itu, referensi [18] menggunakan metode kurva halus global (*global smooth curves*) yang terinspirasi dari prosedur kurva halus tidak beraturan (*smooth irregular curves*) pada [19] untuk menghasilkan batasan kondisi yang bersifat kontinu pada titik jalan global (*global waypoint*) yang akan dilalui dan metode tersebut diintegrasikan dengan metode generasi lintasan analitik.

Umumnya, di berbagai literatur, fokus penelitian dilakukan terbatas pada salah satu topik, baik itu perancangan pengontrol atau perancangan lintasan referensi. Untuk itu, Tugas Akhir ini menggabungkan dua fokus penelitian tersebut di mana dirancang lintasan referensi dan pengontrol secara berurutan. Rancangan lintasan referensi yang diajukan berupa fungsi polinomial dengan variabel waktu dan diintegrasikan ke dalam pengontrol berbasis kestabilan Lyapunov. Hasil simulasi secara numerik beserta hasil eksperimen secara riil dipaparkan untuk membuktikan kehandalan pengontrol yang dirancang.

1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Dari penjabaran latar belakang masalah pada Subbab 1.1, dapat diidentifikasi masalah untuk menentukan pengontrol agar DDWMR dapat menjejaki sebuah lintasan referensi dengan mengontrol *input* agar eror berupa pose antara robot aktual dan lintasan referensi seminimal mungkin (menuju nol). Dari identifikasi masalah, dirumuskan beberapa pertanyaan masalah untuk sistem DDWMR pada Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Bagaimana bentuk model sistem DDWMR dan eror pose?
2. Bagaimana cara merancang lintasan referensi yang layak?

3. Bagaimana cara mengontrol DDWMR agar mengikuti lintasan referensi?

1.3 Batasan Masalah dan Asumsi

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang terdapat dalam Tugas Akhir ini antara lain:

1. Pemodelan sistem DDWMR dilakukan dengan meninjau struktur mekanis dari DDWMR.
2. Pemodelan sistem dilakukan menggunakan pendekatan analisis kinematika.
3. Sistem kontrol DDWMR dirancang menggunakan pengontrol kinematika yang berbasis pada analisis kestabilan Lyapunov.
4. Pemodelan lintasan referensi dilakukan dengan menggunakan metode generasi lintasan analitik berupa polinomial parametrik orde enam dan metode kurva halus global.
5. Proses pelacakan lintasan referensi diasumsikan tidak terdapat rintangan (*obstacle*) statis atau bergerak selama DDWMR beroperasi.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Adapun tujuan dari penulisan Buku Tugas Akhir ini adalah:

1. Menentukan model kinematika dan eror pose DDWMR.
2. Merancang lintasan referensi yang layak.
3. Mengontrol DDWMR agar dapat menjejaki lintasan referensi.
4. Memverifikasi hasil perancangan lintasan referensi dan kehandalan dari algoritme kontrol.

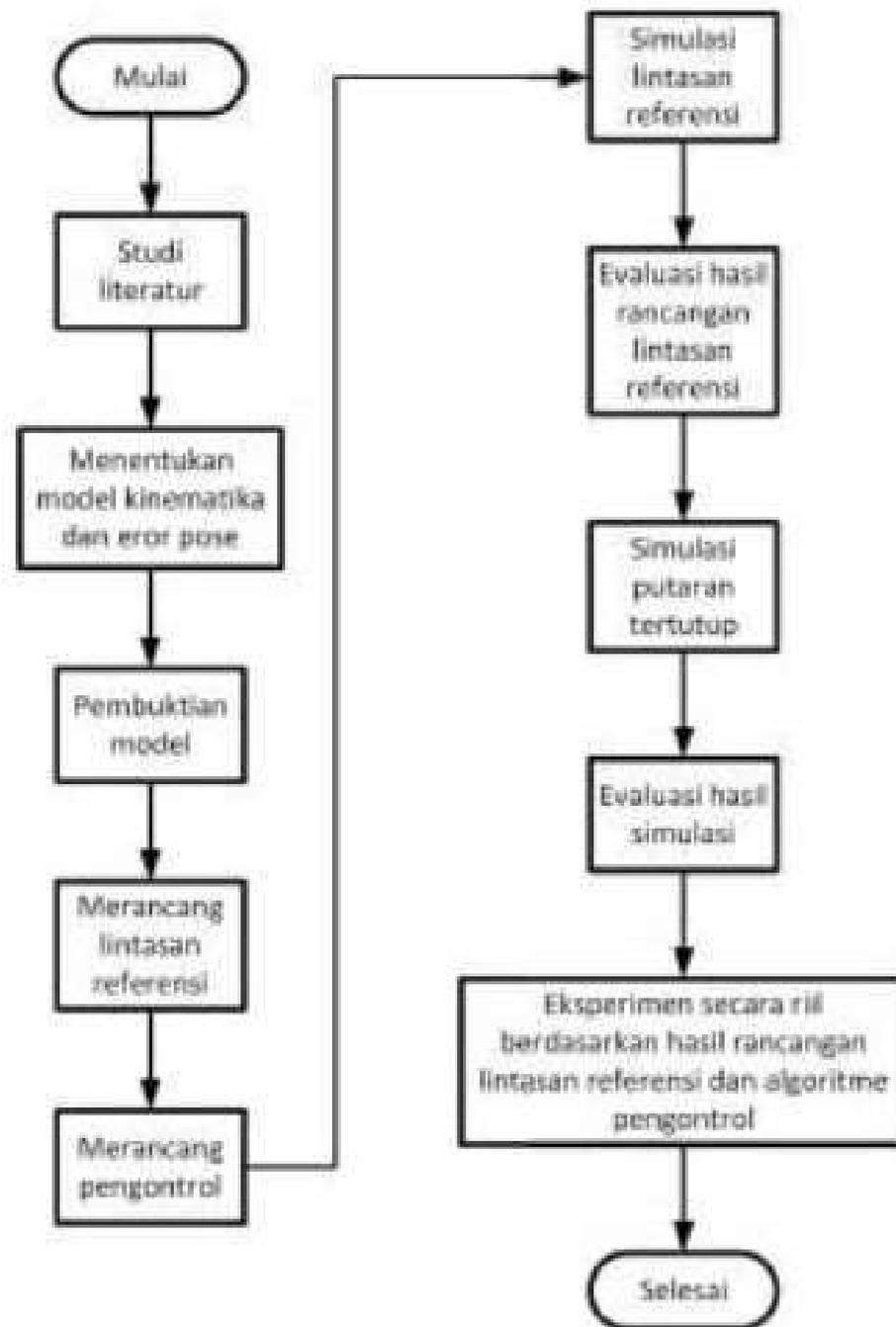
1.5 Manfaat Tugas Akhir

Beberapa manfaat dari penelitian pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Mampu menentukan model kinematika dan eror pose DDWMR.
2. Mampu merancang lintasan referensi yang layak.
3. Mampu mengontrol DDWMR agar mengikuti lintasan referensi tertentu.

1.6 Metodologi Penelitian Tugas Akhir

Metodologi penelitian yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah eksperimen yang didasarkan pada kajian literatur. Kajian tersebut bertujuan untuk menentukan model kinematika dan model eror pose untuk sistem DDWMR. Model kinematika dan eror pose kemudian dibuktikan dengan melakukan analisis geometri dengan meninjau robot pada sebuah ruang konfigurasi *cartesian*. Model dari lintasan yang menjadi referensi kemudian dirancang dengan metode generasi lintasan analitik dan kurva halus global. Untuk memperoleh model dari *control input*, digunakan metode Lyapunov langsung (*Lyapunov direct method*) di mana fungsi Lyapunov yang digunakan didasarkan pada persamaan yang diajukan pada literatur yang dikaji. Kemudian dilakukan pembuatan lintasan referensi melalui proses simulasi menggunakan MATLAB untuk memperoleh bentuk visual lintasan serta grafik sudut orientasi dan kecepatan yang menjadi referensi bagi DDWMR. Pada proses akhir, dilakukan simulasi putaran tertutup (*closed loop*) untuk meninjau pose DDWMR yang telah dikontrol terhadap lintasan referensi yang telah dirancang. Hasil perancangan lintasan referensi beserta algoritme pengontrol divalidasi melalui eksperimen secara riil. Diagram alir metodologi penelitian dapat ditinjau pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Proses penelitian Tugas Akhir.

1.7 Sistematika Penulisan

Buku Tugas Akhir ini dibagi menjadi 5 bab, yakni sebagai berikut:

1. **Bab 1 Pendahuluan.** Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang masalah, identifikasi dan perumusan masalah, batasan masalah dan asumsi, tujuan, manfaat, metodologi serta sistematika penulisan Buku Tugas Akhir.
2. **Bab 2 Tinjauan Pustaka.** Bab ini berisi pemaparan lebih jauh mengenai robot bergerak beroda, model kinematika, model eror pose serta dinamika eror yang diperlukan dalam kontrol penjejakan lintasan. Pemaparan teori tentang pengontrolan DDWMR berbasis pada metode analisis kestabilan Lyapunov juga diberikan.

3. **Bab 3 Perancangan Sistem.** Dalam bab ini dipaparkan proses perancangan lintasan referensi menggunakan metode generasi lintasan analitik dan metode kurva halus global. Pemaparan proses perancangan kontrol penjejakan lintasan berbasis pada analisis kestabilan Lyapunov juga diberikan. Terakhir, dijabarkan perangkat keras yang digunakan selama proses eksperimen secara riil serta beberapa persiapan yang perlu dilakukan sebelum eksperimen secara riil dilakukan.
4. **Bab 4 Analisis Sistem.** Pada bab ini, akan dipaparkan hasil simulasi rancangan lintasan referensi. Selain itu, metode pengontrol yang telah dirancang pada bab sebelumnya akan diverifikasi melalui simulasi putaran tertutup (*closed loop*). Hasil rancangan berupa simulasi dilakukan melalui perangkat lunak MATLAB. Hasil eksperimen secara riil juga diberikan pada bab ini untuk memvalidasi hasil perancangan algoritme kontrol pelacakan lintasan referensi pada proses simulasi.
5. **Bab 5 Simpulan dan Saran.** Pada bab ini dipaparkan simpulan untuk menjawab identifikasi masalah dan tujuan dari Tugas Akhir ini. Selain itu, diberikan saran untuk penelitian selanjutnya terkait topik DDWMR yang didasarkan pada proses simulasi dan eksperimen.