

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Fahmi Yudha Susetyo

NIM : 40040322650064

Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi

Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun Sistem Penggerak dan Navigasi Teach-and-Repeat pada Robot Mobile Pemetik Cabai Beroda Empat (CHIMI-Bot) Menggunakan Kendali PI dan LiDAR *Scan Matching*

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No. 17 Tahun 2010 dan Peraturan Perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 25 September 2026

Yang membuat pernyataan,



Fahmi Yudha Susetyo

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, serta shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Penggerak dan Navigasi *Teach-and-Repeat* pada Robot Mobile Pemetik Cabai Beroda Empat (CHIMI-Bot) Menggunakan Kendali PI dan *LiDAR Scan Matching*”. Tugas akhir diajukan sebagai salah satu memperoleh gelar sarjana Teknik terapan (S.Tr.T.) dari Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro. Tersusunnya laporan ini tentu tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, atas rahmat, kesehatan, kemudahan, dan kekuatan yang diberikan kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Ibu (almh.) dan Ayah, yang doa, kasih sayang, serta dukungannya menjadi alasan penulis bertahan hingga tugas akhir ini selesai. Semoga karya ini menjadi salah satu bentuk bakti penulis kepada beliau, dan semoga Allah SWT menempatkan Ibu di tempat terbaik di sisi-Nya.
3. Ibu Megarini Hersaputri, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas waktu, tempat, kesempatan, serta bimbingan yang diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir.
4. Bapak Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
5. Pandu dan Kezia, selaku rekan satu tim robot pemetik cabai yang telah menjadi teman diskusi dan bekerja sama dalam pengerjaan serta integrasi sistem.
6. Syarkiah Riskil Hasanah Harahap, selaku pendukung utama penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini, atas dukungan, doa, dan semangat yang tidak pernah putus.

7. Rekan-rekan angkatan Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi 2022, yang telah menjadi teman diskusi dan penyemangat dalam menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.
8. Bagus Putra dan Raenixie, selaku sahabat penulis yang selalu memberikan dukungan dan semangat selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan ini dapat dengan mudah dipahami oleh para pembaca serta bermanfaat bagi banyak pihak.

Semarang, 25 September 2026

Penulis



Fahmi Yudha Susetyo

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	Error! Bookmark not defined.	
HALAMAN PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.	
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.	
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii	
KATA PENGANTAR	iii	
DAFTAR ISI	v	
DAFTAR GAMBAR	ix	
DAFTAR TABEL	xii	
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv	
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL	xv	
INTISARI	xviii	
ABSTRACT.....	xix	
BAB	I	PENDULUAN
.....	20	
1.1 Latar Belakang	20	
1.2 Rumusan Masalah	21	
1.3 Tujuan	22	
1.4 Manfaat	22	
1.5 Batasan Masalah.....	23	
1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir.....	24	
BAB	II	RUMUSAN
TEORI.....	Error! Bookmark not defined.	

2.1	Tinjauan Pustaka.....	Error! Bookmark not defined.
2.2	Robot Pemanen (<i>Harvesting Robot</i>)	Error! Bookmark not defined.
2.3	Robot <i>Mobile Beroda Empat</i>	Error! Bookmark not defined.
2.3.1	Dinamika traksi robot	Error! Bookmark not defined.
2.4	Motor DC dan <i>Rotary Encoder</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4.1	Motor DC PG45 dengan <i>encoder</i> 200 PPR.....	Error! Bookmark not defined.
2.4.2	<i>Rotary encoder</i> dan perhitungan kecepatan.....	Error! Bookmark not defined.
2.5	Sistem Kendali PI	Error! Bookmark not defined.
2.5.1	Sistem kendali <i>open loop</i> dan <i>closed loop</i>	Error! Bookmark not defined.
2.5.2	Algoritma kontroler PI.....	Error! Bookmark not defined.
2.5.3	Implementasi PI diskret dan <i>anti-windup</i>	Error! Bookmark not defined.
2.5.4	Karakteristik respons sistem	Error! Bookmark not defined.
2.6	Penentuan Parameter Awal PI dengan Ziegler–Nichols Metode Pertama	Error! Bookmark not defined.
2.6.1	Prinsip Ziegler–Nichols metode pertama.....	Error! Bookmark not defined.
2.6.2	Pengujian <i>step</i> manual dan identifikasi parameter K, L, dan T	Error! Bookmark not defined.
2.6.3	Perhitungan nilai awal Kp dan Ki.....	Error! Bookmark not defined.
2.7	<i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	Error! Bookmark not defined.
2.8	<i>Driver Motor</i> BTS7960.....	Error! Bookmark not defined.
2.9	YDLIDAR T-mini Plus 25.....	Error! Bookmark not defined.

2.10	Mikrokontroler STM32F411CEU6.....	Error! Bookmark not defined.
2.11	NVIDIA Jetson Orin Nano.....	Error! Bookmark not defined.
2.12	Komunikasi UART	Error! Bookmark not defined.
2.13	Perangkat Lunak Pengembangan	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODE PENELITIAN.....		Error! Bookmark not defined.
3.1	Diagram Blok dan <i>Flowchart</i>	Error! Bookmark not defined.
3.1.1	Blok diagram sistem keseluruhan	Error! Bookmark not defined.
3.1.2	Rangkaian elektrikl keseluruhan	Error! Bookmark not defined.
3.1.3	Rangkaian elektrikl modul kontrol	Error! Bookmark not defined.
3.1.4	<i>Flowchart</i> sistem keseluruhan	Error! Bookmark not defined.
3.1.5	<i>Flowchart</i> sistem <i>teach</i> dan <i>repeat</i> ...	Error! Bookmark not defined.
3.2	Gambar 3D	Error! Bookmark not defined.
3.3	Perhitungan Perancangan Sistem Penggerak	Error! Bookmark not defined.
3.3.1	Parameter rancangan.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.2	Perhitungan gaya traksi dan torsi roda	Error! Bookmark not defined.
3.3.3	Perhitungan kecepatan putar roda.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.4	Perhitungan <i>encoder</i> untuk satu putaran roda	Error! Bookmark not defined.
3.3.5	Perhitungan parameter PWM.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.6	Perhitungan parameter awal kendali PI	Error! Bookmark not defined.
3.3.7	Prosedur penalaan halus parameter PI	Error! Bookmark not defined.
3.4	Teknik Fabrikasi.....	Error! Bookmark not defined.

3.4.1 Alat dan bahan**Error! Bookmark not defined.**

3.4.2 Perancangan perangkat keras.....**Error! Bookmark not defined.**

3.4.3 Perancangan perangkat lunak**Error! Bookmark not defined.**

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS.....Error! Bookmark not defined.

4.1 Pengujian Komponen dan Subsistem.....**Error! Bookmark not defined.**

4.1.1 Pengujian rotary *encoder* dan pembacaan kecepatan **Error! Bookmark not defined.**

4.1.2 Karakteristik motor dalam kondisi *open loop***Error! Bookmark not defined.**

4.2 Penentuan Parameter Awal dan Pengujian Kendali PI**Error! Bookmark not defined.**

4.2.1 Pengujian respons *step open loop*.....**Error! Bookmark not defined.**

4.2.2 Identifikasi parameter K, L, dan T....**Error! Bookmark not defined.**

4.2.3 Perhitungan nilai awal Kp dan Ki.....**Error! Bookmark not defined.**

4.2.4 Penerapan parameter PI pada STM32**Error! Bookmark not defined.**

4.2.5 Pengujian respons kecepatan motor dengan kendali PI..... **Error! Bookmark not defined.**

4.2.6 Penalaan halus parameter PI**Error! Bookmark not defined.**

4.2.7 Perbandingan kinerja tanpa kendali dan dengan kendali PI **Error! Bookmark not defined.**

4.2.8 Pengujian ketahanan PI terhadap perubahan beban..... **Error! Bookmark not defined.**

4.3 Pengujian Sistem Terintegrasi.....**Error! Bookmark not defined.**

4.3.1 Pengujian keseragaman kecepatan roda kiri dan kanan..... **Error! Bookmark not defined.**

4.3.2 Pengujian *Error* Jarak Waypoint pada *Occupancy Grid* **Error! Bookmark not defined.**

4.3.3	Pengujian <i>local LiDAR scan matching</i> pada tahap <i>Repeat</i>	Error! Bookmark not defined.
4.4	Analisis Kinerja Sistem.....	Error! Bookmark not defined.
4.4.1	Analisis pencapaian kriteria kinerja..	Error! Bookmark not defined.
4.4.2	Analisis sumber <i>error</i> dan keterbatasan sistem	Error! Bookmark not defined.
BAB V PENUTUP		Error! Bookmark not defined.
5.1	Kesimpulan	Error! Bookmark not defined.
5.2	Saran.....	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA		Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN		Error! Bookmark not defined.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Diagram gaya pada model kendaraan dua gandar	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2. 2	Contoh bentuk fisik motor DC dengan gearbox planetary PG45	Error! Bookmark not defined.

Gambar 2. 3 Pencacahan sinyal kuadratur pada encoder interface mode STM32
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 4 Diagram blok sistem kendali closed loop**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 5 Contoh respons sistem dengan anti-windup integrator clamping
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 6 Karakteristik respons tangga sistem kendali**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 7 Kurva reaksi unit step dan penentuan parameter L, T, serta K.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 8 Pembangkitan PWM edge-aligned pada timer STM32 (ARR = 8)
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 9 Rangkaian aplikasi jembatan-H menggunakan dua IC BTS7960
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 10 Sistem koordinat polar YDLIDAR T-mini Plus**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 11 Hasil mapping SLAM**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2. 12 Konfigurasi pin papan pengembangan STM32F411CEU6 (Black Pill).....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 1 Blok diagram sistem keseluruhan robot pemetik cabai.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 2 Rangkaian elektrikal keseluruhan**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 3 Skematik modul kontrol STM32F411CEU6**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 4 Konfigurasi pin STM32F411CEU6 pada STM32CubeMX..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 5 Flowchart sistem keseluruhan CHIMI-Bot**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 6 Flowchart proses Teach dan perekaman map/route**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 7 Flowchart proses Repeat menggunakan local LiDAR scan matching
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 8 Desain tiga dimensi robot pemetik cabai**Error! Bookmark not
defined.**

Gambar 3. 9 Konfigurasi TIM1 sebagai antarmuka encoder**Error! Bookmark not
defined.**

Gambar 3. 10 Konfigurasi TIM2 sebagai pembangkit PWM**Error! Bookmark
not defined.**

Gambar 3. 11 Konfigurasi USART2 untuk komunikasi dengan Jetson Orin Nano
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 1 Pembacaan pencacah encoder roda kiri pada lima pengulangan satu
putaran roda.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 2 Pembacaan pencacah encoder roda kanan pada lima pengulangan satu
putaran roda.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 3 Dokumentasi pembacaan tachometer optik pada dua belas titik
pengujian.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 4 Sebaran dead zone tiap pengulangan dan penetapan u0 serta u1 kedua
motor**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 5 Karakteristik duty cycle terhadap kecepatan dan kemiringan lokal
kurva.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 6 Respons step open loop motor kiri beserta garis singgung dan
penandaan t0, ta, serta tb**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 7 Respons step open loop motor kanan beserta garis singgung dan
penandaan t0, ta, serta tb**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 8 Sebaran respons step lima pengulangan motor kiri dan motor kanan
.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 9 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM
(Percobaan 10)**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 10 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 18)**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 11 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 12)**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 12 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 11)**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 13 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 17)**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 14 Respons tanpa PI dan dengan PI pada setpoint 8 RPM..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 15 *Occupancy grid* aktual dan posisi *Waypoint* 0 sampai *Waypoint* 3**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 16 Dokumentasi pengukuran *Waypoint* 1 dari *Waypoint* 0: (a) kamera terhadap *Waypoint* 1; (b) roda terhadap *Waypoint* 1.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 17 Dokumentasi pengukuran *Waypoint* 2 dari *Waypoint* 0: (a) roda terhadap *Waypoint* 2; (b) kamera terhadap *Waypoint* 2.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 18 Dokumentasi pengukuran *Waypoint* 3 dari *Waypoint* 0: (a) dan (b) pengukuran posisi roda terhadap *Waypoint* 3.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 19 Lima peta yang digunakan pada pengujian *local LiDAR scan matching*: (a) Pengujian 1, (b) Pengujian 2, (c) Pengujian 3, (d) Pengujian 4, dan (e) Pengujian 5**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 20 Perbandingan simpangan baku raw yaw offset dan hasil filter Kalman pada lima percobaan.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 21 Raw yaw offset dan yaw offset Kalman terhadap waktu pada (a) Percobaan 1, (b) Percobaan 2, (c) Percobaan 3, (d) Percobaan 4, dan (e) Percobaan 5.....**Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tinjauan pustaka penelitian terdahulu ..**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 2. 2 Spesifikasi motor DC PG45 dengan encoder 200 PPR..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 2. 3 Data yang dicatat pada identifikasi respons step **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 2. 4 Spesifikasi modul driver motor BTS7960 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 2. 5 Spesifikasi sensor YDLIDAR T-mini Plus..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 2. 6 Spesifikasi mikrokontroler STM32F411CEU6 .. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 2. 7 Spesifikasi NVIDIA Jetson Orin Nano (modul 8 GB dan papan pembawa developer kit)**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 1 Pemetaan pin driver motor

BTS7960.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 2 Pemetaan pin encoder motor DC PG45 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 3 Pemetaan pin komunikasi serial.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 4 Konfigurasi timer, interupsi, dan basis waktu STM32F411CEU6**Error!
Bookmark not defined.**

Tabel 3. 5 Parameter rancangan sistem penggerak **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 6 Hubungan duty cycle dan nilai CCR.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 7 Ringkasan hasil perhitungan perancangan..... **Error! Bookmark not
defined.**

Tabel 3. 8 Parameter hasil identifikasi respons step dan nilai awal PI **Error!
Bookmark not defined.**

Tabel 3. 9 Format pencatatan iterasi penalaan halus parameter PI **Error!
Bookmark not defined.**

Tabel 3. 10 Bahan yang digunakan**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 11 Alat yang digunakan**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 1 Hasil verifikasi pencacahan encoder untuk satu putaran
roda.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 2 Perbandingan kecepatan hasil encoder dan tachometer **Error!
Bookmark not defined.**

Tabel 4. 3 Hasil pengujian pencarian dead zone duty cycle **Error! Bookmark not
defined.**

Tabel 4. 4 Penetapan u_0 dan u_1 untuk pengujian respons step...**Error! Bookmark
not defined.**

Tabel 4. 5 Karakteristik duty cycle terhadap kecepatan pada open loop **Error!
Bookmark not defined.**

Tabel 4. 6 Data respons step open loop motor kiri **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 7 Data respons step open loop motor kanan **Error! Bookmark not
defined.**

Tabel 4. 8 Rangkuman hasil identifikasi parameter K, L, dan T **Error! Bookmark
not defined.**

Tabel 4. 9 Hasil perhitungan Ziegler–Nichols tiap pengulangan motor kiri..**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 10 Hasil perhitungan Ziegler–Nichols tiap pengulangan motor kanan
.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 11 Nilai awal PI hasil Ziegler–Nichols metode pertama**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 12 Parameter kendali PI yang diterapkan pada STM32F411CEU6 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 13 Karakteristik respons Percobaan 10 pada setpoint 8 RPM**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 14 Lima percobaan penalaan parameter PI motor kiri..**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 15 Lima percobaan penalaan parameter PI motor kanan.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 16 Perbandingan parameter awal Ziegler–Nichols dan parameter utama
.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 17 Perbandingan kinerja tanpa kendali dan dengan kendali PI**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 18 Hasil pengujian ketahanan kendali PI terhadap perubahan beban
.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 19 Keseragaman kecepatan roda kiri dan roda kanan...**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 20 Hasil evaluasi error jarak waypoint pada occupancy grid**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 21 Hasil local LiDAR scan matching pada lima percobaan**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 22 Rekapitulasi scan matching menurut fase pada lima percobaan..**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 23 Perbandingan *raw yaw offset* dan *yaw offset* hasil filter Kalman**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 24 Ringkasan kinerja kendali PI pada setpoint 8 RPM. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 25 Sumber *error* dan keterbatasan system..... **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rekapitulasi percobaan yang ditempatkan pada Lampiran **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 2 Respons kecepatan Percobaan 1 pada setpoint 8 RPM **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 3 Respons kecepatan Percobaan 2 pada setpoint 8 RPM **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 4 Respons kecepatan Percobaan 3 pada setpoint 8 RPM **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 5 Respons kecepatan Percobaan 4 pada setpoint 8 RPM **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 6 Respons kecepatan Percobaan 5 pada setpoint 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 7 Respons kecepatan Percobaan 6 pada setpoint 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 8 Respons kecepatan Percobaan 8 pada *setpoint* 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 9 Respons kecepatan Percobaan 9 pada setpoint 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 10 Respons kecepatan Percobaan 13 pada setpoint 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 11 Respons kecepatan Percobaan 14 pada setpoint 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 12 Respons kecepatan Percobaan 15 pada setpoint 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 13 Respons kecepatan Percobaan 16 pada *setpoint* 8 RPM **Error!**

Bookmark not defined.

Lampiran 14 Karakteristik lima peta referensi LiDAR yang digunakan pada
pengujian scan matching **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 15 Peta hasil percobaan scan-match **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran 16 Daftar berkas pengujian LiDAR **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Definisi
ACK	<i>Acknowledgement</i>
APB	<i>Advanced Peripheral Bus</i>
ARM	<i>Advanced RISC Machines</i>
ARR	<i>Auto-Reload Register</i>
CCR	<i>Capture/Compare Register</i>
CPR	<i>Count Per Revolution</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EXTI	<i>External Interrupt</i>
FPU	<i>Floating-Point Unit</i>
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
HSI	<i>High Speed Internal oscillator</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LPWM	<i>Left Pulse Width Modulation</i>
MFPSO	<i>Moth-flame Particle Swarm Optimization</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PI	<i>Proportional-Integral</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PPR	<i>Pulse Per Revolution</i>
PSC	<i>Prescaler</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	<i>Revolution Per Minute</i>
RPWM	<i>Right Pulse Width Modulation</i>
RX	<i>Receive</i>

Singkatan	Definisi
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
SWD	<i>Serial Wire Debug</i>
SYSCLK	<i>System Clock</i>
TFT	<i>Thin Film Transistor</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
TOPS	<i>Tera Operations Per Second</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
TX	<i>Transmit</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UFQFPN	<i>Ultra Thin Fine Pitch Quad Flat Pack No-lead</i>
USART	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
ZN	<i>Ziegler–Nichols</i>

Simbol	Definisi	Satuan
a	Percepatan robot	m/s ²
CPR	Jumlah pencacahan <i>encoder</i> per putaran roda	<i>count</i> /putaran
D	Diameter roda	m
e	<i>Error</i> kecepatan (<i>setpoint</i> dikurangi kecepatan terukur)	RPM
F	Gaya traksi yang dibutuhkan	N
fPWM	Frekuensi PWM	Hz
g	Percepatan gravitasi	m/s ²
K	Penguatan proses hasil identifikasi	RPM/%
Kd	Konstanta derivatif	—
Ki	Konstanta integral	%/(RPM·s)
Kp	Konstanta proporsional	%/RPM
L	Waktu tunda ekuivalen hasil identifikasi	s
m	Massa total robot	kg
Mp	<i>Maximum overshoot</i>	%
n	Kecepatan putar roda	RPM
N	Jumlah pulsa <i>encoder</i> per putaran poros motor	PPR

Simbol	Definisi	Satuan
r	Jari-jari roda	m
T	Konstanta waktu proses hasil identifikasi	s
T_i	Waktu integral	s
t_r	<i>Rise time</i>	s
t_s	<i>Settling time</i>	s
T_s	Periode pencuplikan <i>loop</i> kendali	s
u	Sinyal kendali dalam <i>duty cycle</i>	%
u_0, u_1	<i>Duty cycle</i> sebelum dan sesudah <i>step</i>	%
u_{dead}	<i>Duty cycle</i> saat motor mulai berputar	%
u_{ff}	<i>Duty cycle</i> awal (<i>feedforward</i>)	%
v	Kecepatan linier robot	m/s
y_0, y_1	Kecepatan stabil sebelum dan sesudah <i>step</i>	RPM
y_{maks}	Kecepatan puncak respons	RPM
y_{ss}	Kecepatan keadaan stabil	RPM
θ	Arah hadap robot	derajat
μ_r	Koefisien hambat gelinding	—
τ	Torsi poros roda	N·m

INTISARI

Robot mobile pemetik cabai memerlukan pengendalian kecepatan roda dan navigasi yang mendukung pengulangan lintasan. Penelitian ini merancang sistem penggerak dan navigasi teach-and-repeat pada robot beroda empat CHIMI-BOT menggunakan kendali Proportional Integral (PI) dan LiDAR scan matching. Sistem menggunakan dua motor DC PG45 berencoder, driver BTS7960, STM32F411CEU6, Jetson Orin Nano, dan YDLIDAR T-mini Plus 25. Parameter PI ditentukan melalui pengujian step open loop menggunakan Ziegler–Nichols metode pertama, kemudian dilakukan penalaan halus. Initial duty motor kiri dan kanan ditetapkan masing-masing 17,1% dan 20,1% berdasarkan karakteristik penggerak. Encoder menjadi sumber utama odometri, sedangkan LiDAR memberikan koreksi pose terbatas terhadap peta hasil Teach. Pada setpoint 8 RPM, steady state error motor kiri dan kanan masing-masing 0,67% dan 0,53%, dengan selisih kecepatan stabil 0,012 RPM. Respons transien kedua motor masih menunjukkan overshoot. Lima pengujian Repeat/Homing menghasilkan 3.029 Accepted dari 7.089 upaya, dengan rasio penerimaan gabungan 42,73%. Rata-rata best score dan score improvement antarpercobaan masing-masing 0,144 dan 0,096. Analisis 3.017 pasangan pembaruan yaw menunjukkan rata-rata simpangan baku raw $3,298^\circ$ dan Kalman $2,676^\circ$, dengan rata-rata penurunan per percobaan 19,06%. Hasil menunjukkan kendali PI menghasilkan kecepatan akhir kedua roda yang berdekatan, sedangkan filter Kalman mengurangi variasi koreksi yaw. Akurasi yaw absolut belum dapat ditentukan tanpa acuan eksternal tersinkron.

Kata kunci: robot pemetik cabai, kendali PI, *teach-and-repeat*, LiDAR *scan matching*, filter Kalman.

ABSTRACT

A mobile chili-picking robot requires wheel speed control for repeated navigation. This study develops the drive and teach-and-repeat navigation system of the four-wheeled CHIMI-BOT using Proportional Integral (PI) control and LiDAR scan matching. The system comprises two PG45 DC motors with encoders, BTS7960 drivers, an STM32F411CEU6, a Jetson Orin Nano, and a YDLIDAR T-mini Plus 25. PI parameters were determined through open-loop step tests using the first Ziegler–Nichols method, followed by fine tuning. Initial duty cycles were set to 17.1% and 20.1% for the left and right motors, respectively. Encoder odometry remained the primary source, with bounded LiDAR corrections against Teach maps. At 8 RPM, steady-state errors were 0.67% and 0.53%, with a steady-state speed difference of 0.012 RPM. Both motors still exhibited transient overshoot. Five Repeat/Homing trials yielded 3,029 accepted matches from 7,089 attempts, giving an overall acceptance rate of 42.73%. Trial-averaged best score and score improvement were 0.144 and 0.096. Analysis of 3,017 paired yaw updates yielded mean raw and Kalman standard deviations of 3.298° and 2.676°, with a mean per-trial reduction of 19.06%. PI control achieved similar steady-state wheel speeds, while Kalman filtering reduced yaw correction variability. Absolute yaw accuracy remains undetermined without a synchronized external reference.

Keywords: chili-picking robot, PI control, teach-and-repeat, LiDAR scan matching, Kalman filter.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang pertanian terus meningkat seiring kebutuhan akan efisiensi dan produktivitas yang lebih tinggi. Di Indonesia, cabai merupakan salah satu komoditas hortikultura strategis dengan tingkat produksi yang cukup besar. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik yang dilaporkan Rizaty, produksi cabai rawit Indonesia pada tahun 2022 mencapai 1,55 juta ton, meningkat 11,5% dibandingkan tahun sebelumnya [1]. Tingginya volume produksi tersebut menuntut efisiensi dalam proses budidaya dan pemanenan, sedangkan pemanenan manual menghadapi kebutuhan tenaga kerja dan konsistensi operasi yang mendorong pengembangan robot pemanen.

Salah satu solusi yang berkembang adalah penerapan robotika pada sektor pertanian, khususnya penggunaan robot *mobile* yang mampu bergerak secara mandiri di antara barisan tanaman. Penelitian mengenai *harvesting robot* telah berkembang pesat sejak beberapa dekade terakhir, dan sistem robot panen umumnya terdiri atas platform *mobile*, lengan manipulator, serta sistem navigasi dan visi [2]. Robot *mobile* memiliki mobilitas yang fleksibel serta dapat diintegrasikan dengan sistem kendali dan sensor untuk mendukung navigasi maupun identifikasi posisi tanaman, sehingga proses pemantauan dan pemetikan dapat berlangsung lebih terkontrol dan konsisten dibandingkan metode manual.

Namun demikian, terdapat beberapa permasalahan spesifik yang perlu diselesaikan dalam implementasinya. Permasalahan pertama terletak pada sistem penggerak robot. Pada penggerak diferensial, perbedaan karakteristik motor dan pembebanan dapat menyebabkan ketidaksamaan kecepatan putar roda kiri dan kanan. Kendali kecepatan dan sinkronisasi motor pada platform diferensial empat roda merupakan persoalan yang telah diteliti oleh Reda et al. [3]. Permasalahan kedua adalah kebutuhan menentukan posisi platform terhadap tanaman sebelum pemetikan, karena ketepatan persepsi, desain robot, dan perencanaan gerak merupakan aspek yang saling terkait dalam pemanenan selektif.

Beberapa penelitian sebelumnya mengendalikan kecepatan motor robot *mobile* dengan keluarga kontroler PID. Penelitian ini menggunakan struktur *Proportional–Integral* (PI), yang menggabungkan aksi proporsional dan integral tanpa suku derivatif. Nilai awal K_p dan K_i dihitung secara manual dengan Ziegler–Nichols metode pertama berdasarkan respons *step* motor dalam kondisi *open loop* [4]. Nilai tersebut kemudian dimasukkan ke antarmuka dan

diuji pada sistem *closed loop*. Sensor *Light Detection and Ranging* (LiDAR) digunakan untuk membentuk peta pada tahap *teach* dan sebagai sumber pencocokan pemindaian pada tahap *repeat*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan sistem penggerak robot mobile pemetik cabai beroda empat dengan kendali PI dan *rotary encoder* sebagai umpan balik kecepatan. Parameter Kp dan Ki ditentukan dari pengujian *step* setelah *duty cycle dead zone* motor diketahui. Prinsip penentuan posisi robot mobile dipelajari melalui kajian teknik lokalisasi [5]. YDLIDAR T-mini Plus 25 digunakan untuk merekam lingkungan ke *occupancy grid* pada tahap *teach*, kemudian pemindaian terkini dibandingkan dengan peta tersebut melalui *local scan matching* untuk memberikan koreksi *pose* pada tahap *repeat*.

Hipotesis penelitian ini adalah penerapan kendali PI pada sistem penggerak robot mobile beroda empat mampu meningkatkan kestabilan dan akurasi kecepatan dibandingkan sistem tanpa kendali. Penentuan nilai awal Kp dan Ki menggunakan Ziegler–Nichols metode pertama diharapkan menghasilkan titik awal penalaan yang layak sehingga *steady state error* dan perbedaan kecepatan kedua roda dapat diperkecil setelah pengujian *closed loop*. Pada tingkat atas, transformasi koordinat dan *local scan matching* LiDAR diharapkan menyediakan koreksi posisi dan arah hadap terhadap peta *teach* tanpa mengubah umpan balik kendali kecepatan PI yang tetap berasal dari *rotary encoder*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, terdapat beberapa rumusan masalah dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana merancang dan membangun sistem penggerak robot *mobile* pemetik cabai beroda empat dengan kendali PI berbasis motor DC dan *rotary encoder*?
2. Bagaimana menentukan nilai awal Kp dan Ki menggunakan Ziegler–Nichols metode pertama berdasarkan respons *step* motor?
3. Bagaimana kinerja sistem kendali PI yang diterapkan ditinjau dari *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*?
4. Bagaimana mengintegrasikan transformasi koordinat YDLIDAR T-mini Plus 25 dan *local scan matching* terhadap peta hasil *teach* untuk mengoreksi perkiraan *pose* robot pada tahap *repeat*?

1.3 Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem penggerak robot *mobile* pemetik cabai beroda empat dengan kendali PI berbasis motor DC dan rotary *encoder*.
2. Menentukan nilai awal K_p dan K_i menggunakan Ziegler–Nichols metode pertama berdasarkan respons *step* motor.
3. Menganalisis kinerja sistem kendali PI yang diterapkan berdasarkan *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*.
4. Mengimplementasikan transformasi koordinat YDLIDAR T-mini Plus 25 dan *local scan matching* terhadap peta hasil *teach* sebagai koreksi perkiraan *pose* robot pada tahap *repeat*.

1.4 Manfaat

Bagi Penulis

Penelitian ini memberikan pengalaman langsung dalam merancang dan mengimplementasikan sistem kendali PI pada robot *mobile*, memahami sistem *closed loop*, menerapkan identifikasi respons *step* dan penalaan Ziegler–Nichols metode pertama, serta mengintegrasikan YDLIDAR T-mini Plus 25 untuk pembentukan *occupancy grid*, transformasi koordinat, dan *local scan matching* pada sistem *teach-and-repeat*.

Bagi Masyarakat

Penelitian ini memberikan kontribusi bagi para petani cabai, khususnya yang menerapkan sistem budidaya hidroponik, melalui pengembangan prototipe robot *mobile* pemetik cabai yang lebih efisien, konsisten, dan berbiaya rendah dibandingkan solusi yang telah ada. Dengan adanya sistem otomasi pemetikan ini, ketergantungan pada tenaga kerja manual dapat dikurangi.

Bagi Pembaca

Penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan kendali PI pada robot *mobile*, khususnya penentuan nilai awal K_p dan K_i dari respons *step* menggunakan Ziegler–Nichols metode pertama. Hasil penelitian juga dapat menjadi acuan implementasi sederhana

transformasi koordinat LiDAR dan *local scan matching* terhadap peta hasil *teach* pada pengendali tingkat atas tanpa memindahkan *loop* kendali kecepatan dari mikrokontroler.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan penelitian ini terarah, ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Robot *mobile* yang dirancang mampu bergerak maju serta berbelok ke kanan dan kiri. Namun, penelitian ini dibatasi pada pengendalian gerak lurus sehingga kemampuan bermanuver tidak menjadi fokus pengujian dan analisis.
2. Sistem penggerak menggunakan konfigurasi penggerak diferensial dengan dua roda penggerak bermotor pada sisi kiri dan kanan, sedangkan dua roda lainnya berfungsi sebagai penopang.
3. Sistem kendali PI hanya diterapkan pada sistem penggerak robot untuk menjaga kestabilan dan kesamaan kecepatan putar kedua roda penggerak.
4. Pengujian sistem penggerak dilakukan pada permukaan lantai yang rata dan datar, sehingga hasil pengujian tidak mewakili kondisi medan yang tidak beraturan.
5. Ziegler–Nichols metode pertama hanya digunakan untuk menentukan nilai awal K_p dan K_i dari respons *step* motor secara manual; sistem tidak melakukan penalaan otomatis dan nilai K_d ditetapkan 0.
6. Sensor YDLIDAR T-mini Plus 25 digunakan untuk membentuk *occupancy grid* pada tahap *teach* dan sebagai sumber *local scan matching* pada tahap *repeat*. *Scan matcher* menggunakan odometri *encoder* sebagai *predicted pose* dan hanya melakukan pencocokan lokal terhadap peta yang telah direkam; penelitian tidak membangun SLAM penuh maupun perencanaan lintasan global.
7. Kinerja kendali PI dievaluasi menggunakan *rise time*, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error* keadaan. Integrasi *scan matcher* dievaluasi secara terpisah berdasarkan ketersediaan peta referensi, parameter penerimaan hasil pencocokan, serta data koreksi posisi dan *yaw* yang benar-benar tercatat pada pengujian.
8. Pengujian dilakukan pada lintasan lurus di dalam ruangan dengan tanaman cabai hidroponik tersusun di sisi lintasan. Tahap *teach* merekam rute, *occupancy grid*, dan titik berhenti, sedangkan tahap *repeat* menggunakan data tersebut sebagai referensi. Evaluasi *scan matching* dibatasi pada lingkungan dan konfigurasi pengujian tersebut.

1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir

Penulisan laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika laporan tugas akhir sesuai topik yang diangkat penulis.

BAB II DASAR TEORI

Bagian ini berisi teori-teori yang berkaitan dengan sistem penggerak, kendali PI, LiDAR, transformasi koordinat, dan *local scan matching* yang digunakan pada penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bagian ini berisi metode penelitian yang digunakan penulis, meliputi diagram blok dan *flowchart* sistem, implementasi transformasi LiDAR dan *local scan matching*, perhitungan perancangan, desain tiga dimensi, rangkaian elektrikal, serta teknik fabrikasi.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Bagian ini berisi pengujian dan analisa sistem penggerak, perekaman rute dan peta LiDAR, serta verifikasi implementasi *local scan matching* pada tahap *repeat*.

BAB V PENUTUP

Bagian ini berisi kesimpulan berdasarkan hasil pengujian serta saran pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya.