

Sistem Navigasi *Waypoint* pada *Autonomous Mobile Robot*

Ahmad Sulkhan Taufik

Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya

taufik.teub08@gmail.com

Dosen Pembimbing: 1. Raden Arief Setyawan, ST., MT.

2. Waru Djuriatno, ST., MT.

Abstrak—*Autonomous mobile robot* adalah robot yang mampu bergerak secara mandiri (tidak selalu membutuhkan perintah). Sistem navigasi menjadi bagian terpenting agar *autonomous mobile robot* dapat bergerak secara mandiri. Dalam skripsi dirancang sistem navigasi luar ruang berbasis posisi dengan metode *waypoint*. Sistem navigasi diterapkan pada *autonomous mobile robot* yang bergerak di darat. Sistem navigasi dirancang agar *autonomous mobile robot* mampu mengenali posisi dan arah berdasarkan sistem koordinat Bumi, mampu melakukan koreksi arah gerak (*bearing correction*) dan memperkirakan jarak yang telah ditempuh (odometer) untuk meningkatkan akurasi dalam mencapai posisi tujuan, dengan rute yang telah ditentukan oleh operator. Modul GPS receiver digunakan sebagai penentu posisi, sedangkan modul *magnetic compass* digunakan sebagai penentu arah dalam sistem navigasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem navigasi *waypoint* mampu mengatur gerak *autonomous mobile robot* dalam mencapai posisi tujuan dengan akurasi sebesar 11 meter, serta mampu melakukan odometer dengan akurasi sebesar 0,5 meter.

Kata Kunci— *autonomous mobile robot*, GPS receiver, *magnetic compass*, navigasi *waypoint*.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi robotika telah sampai pada zaman *autonomous robot*. *Autonomous robot* adalah robot yang mampu berperilaku secara mandiri (hanya sesekali membutuhkan perintah). *Autonomous robot* dapat dibagi menjadi dua yaitu *autonomous stationary robot* dan *autonomous mobile robot*. *Autonomous stationary robot* telah banyak dikembangkan di dunia industri dengan jangkauan pergerakan yang terbatas. Oleh karena itu untuk memenuhi spesifikasi robot yang lebih fleksibel dan memiliki jangkauan pergerakan yang lebih luas, saat ini perkembangan teknologi dan penelitian lebih fokus ke arah *autonomous mobile robot*, yakni robot yang dapat berpindah posisi secara mandiri [1]-[3].

Sistem navigasi menjadi bagian terpenting pada *autonomous mobile robot* agar robot mampu bergerak secara mandiri. Sistem navigasi pada *autonomous mobile robot* dapat diartikan sebagai suatu kemampuan untuk memandu pergerakan dari suatu posisi ke posisi lain yang dituju melalui penentuan posisi dan arah gerakannya. [2].

Berdasarkan latar belakang tersebut, dirancanglah sistem navigasi luar ruang berbasis posisi dengan metode *waypoint*. Navigasi *waypoint* adalah suatu metode untuk mengatur gerak dari suatu posisi ke posisi lain yang dituju, dengan mengasumsikan setiap posisi dalam proses pergerakannya menjadi suatu titik dalam

sistem koordinat tertentu (*latitude* dan *longitude* bila berdasarkan sistem koordinat Bumi) [4].

Sistem navigasi menggunakan modul GPS receiver sebagai penentu posisi dan modul *magnetic compass* sebagai penentu arah [4]-[6]. Data dari kedua modul tersebut diproses oleh mikrokontroler pemroses utama. Untuk dapat mengatur kerja motor DC sebagai penggerak robot, mikrokontroler pemroses utama dibantu oleh mikrokontroler lain yang berfungsi sebagai pengatur *driver* motor.

Sistem navigasi dirancang untuk diterapkan pada *autonomous mobile robot*. *Autonomous mobile robot* menggunakan sistem penggerak roda (*tracked*) dan menggunakan sistem pergerakan *differential drive* [1]-[3]. Sistem navigasi yang dirancang merupakan sistem navigasi berbasis posisi dengan metode *waypoint*. Sistem navigasi dirancang untuk pergerakan di luar ruang, khususnya di wilayah darat dengan posisi dan rute yang telah ditentukan oleh operator (manusia). Sistem navigasi bekerja secara tunggal yang artinya tidak dilengkapi dengan sistem pendukung lainnya (contoh sistem pendukung adalah *obstacle avoidance system*). Sistem perangkat keras terutama modul-modul sensor dikondisikan mendekati ideal sesuai anjuran *datasheet* sehingga dapat mengurangi pengaruh-pengaruh lingkungan yang mengganggu kinerja sistem.

Sistem navigasi *waypoint* dirancang agar *autonomous mobile robot* mampu mengenali posisi dan arah berdasarkan sistem koordinat Bumi, mampu melakukan koreksi arah gerak (*bearing correction*) dan odometer untuk meningkatkan akurasi dalam mencapai posisi tujuan, dengan rute yang telah ditentukan oleh operator.

II. METODE PENELITIAN

Penyusunan skripsi ini didasarkan pada masalah yang bersifat aplikatif. Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian yang terdapat pada pendahuluan maka diperlukan metode untuk menyelesaikan masalah tersebut. Metode yang digunakan adalah studi literatur, penentuan spesifikasi alat, perancangan dan pembuatan alat, pengujian dan analisis, serta penarikan kesimpulan.

A. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari teori penunjang yang dibutuhkan dalam prancangan dan pembuatan alat. Teori yang diperlukan yakni

- Kinematika *mobile robot* dengan sistem *differential drive*
- Sistem koordinat Bumi
- *Global Positioning System* (GPS)
- Kompas
- Navigasi *waypoint*

B. Penentuan Spesifikasi Alat

Spesifikasi alat secara keseluruhan ditetapkan terlebih dahulu sebagai acuan dalam perancangan selanjutnya. Spesifikasi alat yang direncanakan adalah sebagai berikut:

- *Autonomous mobile robot* menggunakan sistem penggerak roda (*tracked*) yang terletak di sisi kiri dan kanan badan robot, serta digerakkan oleh dua motor DC.
- *Autonomous mobile robot* menggunakan sistem pergerakan *differential drive*, serta mampu melakukan gerak dasar yaitu maju, mundur, dan rotasi (hingga 360°) dengan selisih terbesar antara *bearing target* dengan *bearing* tercapai sebesar $\pm 2^\circ$.
- Sistem navigasi *waypoint* memiliki sistem odometer (kemampuan menghitung perkiraan jarak yang telah ditempuh) dengan akurasi 1 meter.
- Sistem navigasi *waypoint* dapat mencapai posisi tujuan dengan akurasi 5 meter (radius).
- Sistem navigasi *waypoint* dapat menyelesaikan misi dengan rute maksimal terdiri dari 10 posisi tujuan.
- Sistem navigasi *waypoint* menggunakan modul PMB-688 GPS receiver dengan protokol data NMEA0183 dan akurasi 5 meter (radius) untuk menentukan posisi *autonomous mobile robot* berdasarkan sistem koordinat Bumi, dengan datum WGS'84 [4]-[14].
- Sistem navigasi *waypoint* menggunakan modul CMPS03 *magnetic compass* dengan akurasi $\pm 5^\circ$ dan resolusi sebesar 1° untuk mengetahui arah mata angin yang direpresentasikan dengan nilai sudut 0° - 359° [4]-[6], [15], [16].
- Menggunakan catu daya rangkaian elektronik sebesar 5 V DC dan catu daya motor sebesar 24 V DC.

C. Perancangan dan Pembuatan Alat

Perancangan dan pembuatan alat dalam penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perancangan perangkat lunak (*software*). Perancangan alat diawali dengan perancangan diagram blok sistem secara keseluruhan.

Perancangan perangkat keras terdiri atas dua bagian yakni perancangan mekanik dan perancangan elektronik. Perancangan mekanik ditekankan pada pemasangan sensor dan bentuk robot secara umum dengan menggunakan perangkat lunak 3Ds MAX 2009. Perancangan elektronik ditekankan pada perancangan rangkaian antarmuka modul-modul yang digunakan. Seluruh rangkaian dirancang dalam bentuk skema rangkaian maupun papan rangkaian tercetak (PCB) dengan menggunakan perangkat lunak EAGLE (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) versi 5.11.0.

Perancangan perangkat lunak diawali dengan pembuatan diagram alir (*flowchart*) sistem navigasi *waypoint*. Lalu dilakukan penulisan program menggunakan *compiler* bahasa pemrograman C CVAVR (*Code Vision AVR C Compiler*) versi 2.05.0 [17]-[19].

D. Pengujian dan Analisis

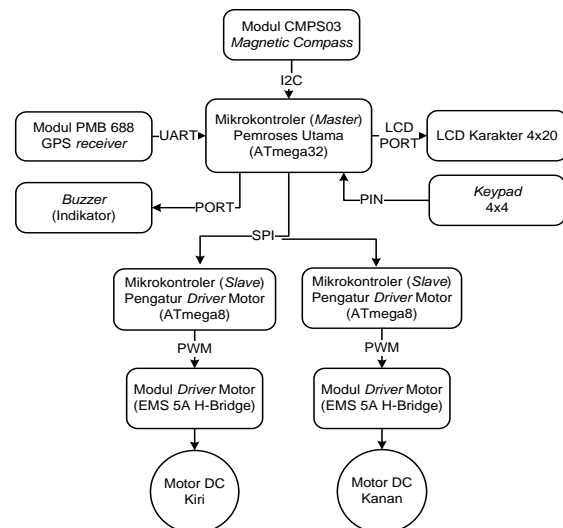
Pengujian dilakukan secara bertahap yaitu pada seluruh sub sistem terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan pengujian sistem secara keseluruhan. Masing-masing hasil pengujian kemudian dianalisis untuk dapat ditarik kesimpulan. Dimana parameter keberhasilan dari pengujian mengacu pada spesifikasi alat yang telah ditentukan.

Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian modul CMPS03 *magnetic compass*, pengujian modul PMB-688 GPS receiver, pengujian gerak rotasi, pengujian odometer, dan pengujian sistem secara keseluruhan.

III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

A. Perancangan Diagram Blok Sistem

Perancangan alat diawali dengan pembuatan diagram blok sistem secara keseluruhan. Diagram blok sistem secara keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 1.



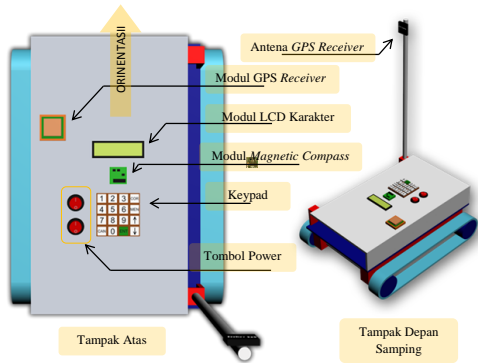
Gambar 1. Diagram Blok Sistem secara Keseluruhan

Sistem navigasi menggunakan modul PMB-688 GPS receiver sebagai penentu posisi dan modul CMPS03 *magnetic compass* sebagai penentu arah. Sistem navigasi juga dilengkapi *keypad* dan modul LCD untuk memudahkan operator dalam menentukan rute dan posisi tujuan robot. *Buzzer* digunakan sebagai penanda ketika robot telah mencapai posisi tujuan. Mikrokontroler ATmega32 pemroses utama bertugas memproses seluruh masukan, menjalankan perangkat lunak fungsi utama sistem navigasi *waypoint*, serta mengatur seluruh keluaran. Dalam mengatur gerak robot sebagai aksi keluaran dari sistem navigasi *waypoint*, mikrokontroler pemroses utama dibantu oleh mikrokontroler ATmega8 pengatur *driver motor*. Mikrokontroler pengatur *driver motor* berfungsi untuk mengatur masukan modul *driver motor* DC EMS 5A H-Bridge, sehingga kecepatan dan arah gerak motor DC dapat diatur.

B. Perancangan Bentuk Robot dan Pemasangan Sensor

Perancangan bentuk robot ditekankan pada perancangan modul *magnetic compass*. Modul *magnetic compass* harus terpasang sesuai orientasi robot. Selain itu modul juga diposisikan secara tepat agar

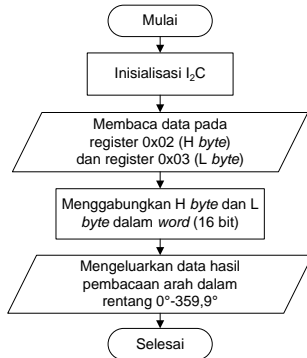
meminimalisir gangguan medan magnet yang berasal dari perangkat lain misalkan seperti motor, antena GPS, atau rangka robot yang mengandung bahan metal. Perancangan bentuk dan pemasangan sensor ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Perancangan Bentuk dan Pemasangan Sensor

C. Perancangan Perangkat Lunak Pemroses Data Modul CMPS03 Magnetic Compass

Modul CMPS03 *magnetic compass* berfungsi untuk mengkonversi besaran fisik arah mata angin menjadi besaran elektrik. Besaran elektrik kemudian diolah di dalam modul tersebut hingga dihasilkan data hasil pembacaan arah mata angin berupa nilai sudut yang dapat dibaca oleh mikrokontroler [16]. Data CMPS03 diakses oleh mikrokontroler pemroses utama melalui fasilitas I²C. Data yang diakses terdapat pada register 8 bit modul dengan alamat 0x02 (H byte) dan 0x03 (L byte) [15]. Data digabung dalam mikrokontroler dalam word (16 bit) agar dihasilkan rentang nilai 0-3599 dalam skala penuh. Data diproses dan dikeluarkan dalam rentang nilai 0°-359,9°. Diagram alir perangkat lunak pemroses data modul CMPS03 *magnetic compass* ditunjukkan dalam Gambar 3.

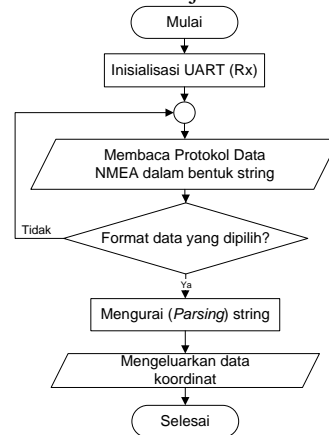


Gambar 3. Diagram Alir Perangkat Lunak Pemroses Data Modul CMPS03 *Magnetic Compass*.

D. Perancangan Perangkat Lunak Pemroses Data Modul PMB-688 GPS Receiver

Modul PMB-688 *GPS receiver* berfungsi untuk menentukan posisi secara global berdasarkan sistem koordinat Bumi. Modul PMB-688 *GPS receiver* menerima sinyal dari setidaknya 3 satelit GPS untuk melakukan penentuan posisi [5]-[7]. Data hasil penentuan posisi diakses oleh mikrokontroler melalui fasilitas UART. Data dengan standard NMEA diakses dalam bentuk string, lalu dipilih berdasarkan format data yang diinginkan. Data terpilih kemudian diurai untuk memperoleh nilai lintang, bujur, kualitas penentuan

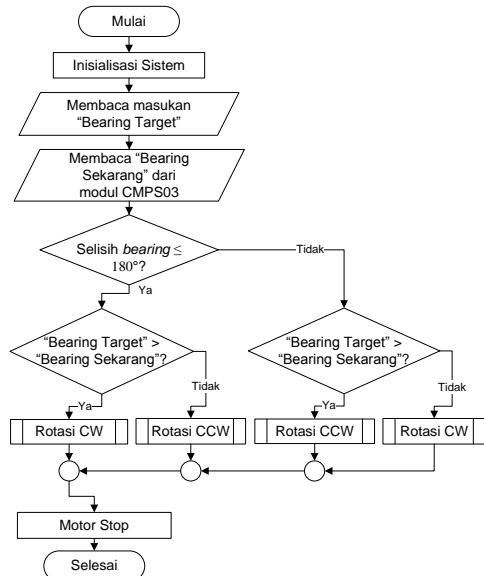
posisi, ataupun informasi hasil penentuan posisi lainnya sesuai isi format data tersebut. Modul PMB-688 hanya menyediakan protokol NMEA dalam format GGA, GSV, RMC, dan GSA (dapat dipilih: VTG dan GLL) [6]. Diagram alir perangkat lunak pemroses data modul PMB-688 *GPS receiver* ditunjukkan dalam Gambar 4.



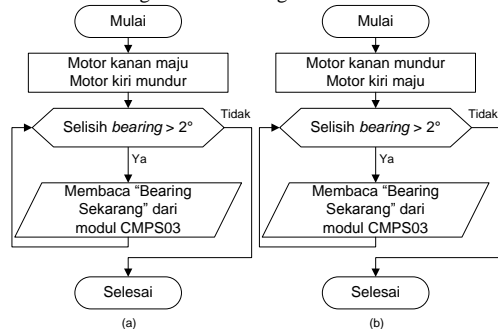
Gambar 4. Diagram Alir Perangkat Lunak Pemroses Data Modul PMB-688 *GPS Receiver*

E. Perancangan Perangkat Lunak Gerak Rotasi

Gerak rotasi dalam sistem navigasi digunakan sebagai aksi koreksi arah gerak. Gerak rotasi dirancang dengan masukan berupa *bearing* target, keluaran berupa aksi gerak robot (CW atau CCW), serta umpan balik berupa *bearing* sekarang yang diperoleh dari pembacaan modul CMPS03 *magnetic compass*. Diagram alir perangkat lunak gerak rotasi dan subfungsi rotasi ditunjukkan dalam Gambar 5 dan Gambar 6.



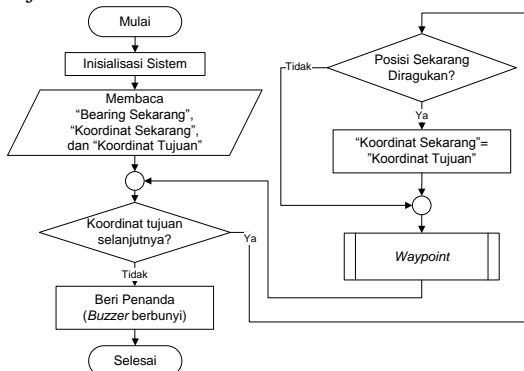
Gambar 5. Diagram Alir Perangkat Lunak Gerak Rotasi



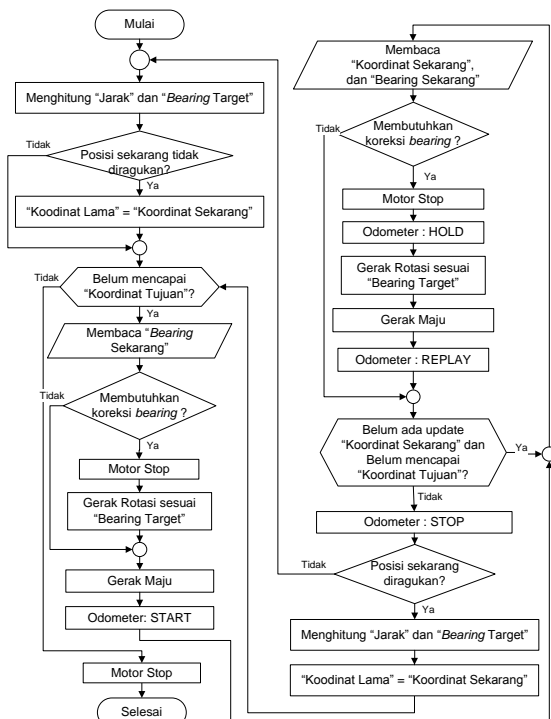
Gambar 6. Perangkat Lunak Gerak Rotasi CCW (a) dan CW (b)

F. Perancangan Perangkat Lunak Sistem Navigasi Waypoint

Sistem navigasi *waypoint* dirancang untuk mengatur gerak *autonomous mobile robot* dalam mencapai posisi tujuan. Sistem navigasi dirancang agar robot mampu mengenali posisi dan arah berdasarkan sistem koordinat Bumi, mampu melakukan koreksi arah gerak (*bearing correction*) dan odometer untuk meningkatkan akurasi dalam mencapai posisi tujuan, dengan rute yang telah ditentukan oleh operator. Diagram alir perangkat lunak sistem navigasi *waypoint* dan subfungsi *waypoint* ditunjukkan dalam Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Diagram Alir Perangkat Lunak Sistem Navigasi Waypoint



Gambar 8. Diagram Alir Perangkat Lunak Subfungsi Waypoint

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

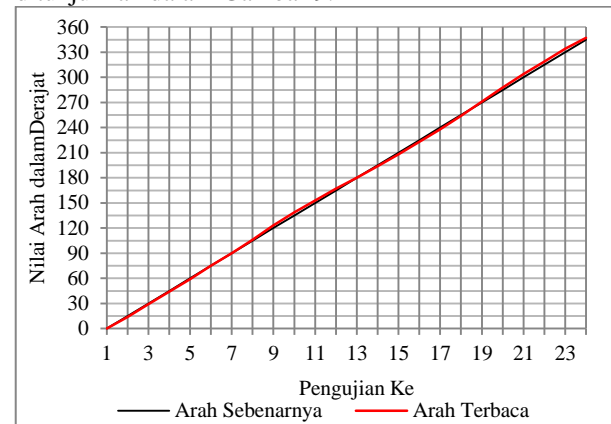
Pengujian dan analisis dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem, apakah sistem telah sesuai dengan perancangan. Pengujian dilakukan per blok sistem kemudian secara keseluruhan.

A. Pengujian Modul CMPS03 Magnetic Compass

Pengujian bertujuan untuk mengetahui akurasi modul CMPS03 dalam membaca arah mata angin. Nilai akurasi diperoleh berdasarkan nilai kesalahan terbesar yang terjadi dalam pengujian. Dalam pengujian digunakan

kompas konvensional sebagai acuan arah sebenarnya. Nilai kesalahan diperoleh dari selisih nilai yang terbaca oleh kompas konvensional dengan nilai yang terbaca oleh modul *magnetic compass*, yang tertampil pada modul LCD karakter.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kesalahan terbesar adalah $\pm 4^\circ$. Sehingga melalui pengujian tersebut dapat ditentukan akurasi modul CMPS03 yakni sebesar $\pm 4^\circ$. Nilai tersebut lebih baik dari nilai yang diharapkan yakni sebesar $\pm 5^\circ$. Hasil pembacaan arah Modul CMPS03 terhadap arah sesungguhnya ditunjukkan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Hasil Pembacaan Arah Modul CMPS03 terhadap Arah Sesungguhnya

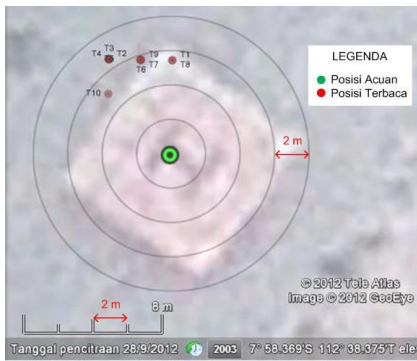
B. Pengujian Modul PMB-688 GPS Receiver

Pengujian bertujuan untuk mengetahui akurasi modul PMB-688 dalam hal penentuan posisi berdasarkan koordinat Bumi. Dalam pengujian digunakan *handheld GPS* Garmin OREGON 300 sebagai acuan. *Handheld GPS* digunakan sebagai acuan karena memiliki akurasi yang lebih tinggi yakni 3-2 meter (radius). Nilai kesalahan diperoleh dari perhitungan jarak antara koordinat yang terbaca pada layar *handheld GPS* dengan koordinat yang terbaca oleh modul *GSP receiver*, yang tertampil pada modul LCD karakter. Pengujian dilakukan di dua tempat berbeda.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kesalahan terbesar dari dua adalah 6,6 meter. Sehingga melalui pengujian tersebut dapat ditentukan akurasi modul PMB-688 yakni sebesar 6,6 meter (radius). Nilai tersebut lebih buruk dari nilai yang diharapkan yakni sebesar 5 meter (radius). Visualisasi hasil penentuan posisi terhadap posisi seharusnya menggunakan perangkat lunak peta digital Google Earth ditunjukkan dalam Gambar 10 untuk pengujian ke-1 dan Gambar 11 untuk pengujian ke-2.



Gambar 10. Visualisasi Hasil Penentuan Posisi Pengujian ke-1



Gambar 11. Visualisasi Hasil Penentuan Posisi Pengujian ke-2

Nilai akurasi pada pengujian cukup terpengaruh oleh adanya radiasi Matahari yang memicu timbulnya efek Ionosfer dan Troposfer yang dapat menyebabkan penurunan cepat rambat sinyal GPS [10]. Dimana akurasi GPS receiver pada pengujian ke-1 (waktu pengujian malam hari) lebih baik jika dibandingkan akurasi pada pengujian ke-2 (waktu pengujian siang hari).

C. Pengujian Gerak Rotasi

Pengujian bertujuan untuk mengetahui kesesuaian gerak rotasi dengan perancangan yang telah dilakukan. Gerak rotasi diharapkan dapat mencapai bearing target dengan selisih antara bearing target dengan bearing tercapai sekecil mungkin. Pengujian dilakukan pada medan uji yang nantinya akan dijadikan sebagai medan uji pada pengujian keseluruhan sistem. Pengujian ke-1 dilakukan di medan aspal, sedangkan pengujian ke-2 dilakukan di medan paving.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai selisih terbesar antara bearing target dengan bearing tercapai adalah sebesar $\pm 2^\circ$. Nilai tersebut telah sesuai dengan nilai yang diharapkan. Aksi gerak rotasi juga telah sesuai dengan perancangan. Selisih rata-rata pengujian ke-1 dan ke-2 memiliki perbedaan sebesar $0,7^\circ$, hal ini menunjukkan bahwa performa gerak rotasi dapat dipengaruhi kontur medan uji dan gaya gesek yang bekerja pada roda. Data hasil pengujian gerak rotasi ke-1 dan ke-2 ditunjukkan dalam Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian ke-1 Gerak Rotasi

No.	Bearing Awal	Bearing Target	Bearing Tercapai	Arah Putar	Selisih
1	0°	90°	89°	CW	1°
2	90°	45°	44°	CCW	1°
3	180°	265°	267°	CW	-2°
4	270°	280°	280°	CW	0°
5	330°	80°	80°	CW	0°
6	180°	0°	1°	CCW	-1°
7	0°	135°	133°	CW	2°
8	0°	270°	269°	CCW	1°
9	270°	265°	267°	CCW	-2°
10	0°	15°	15°	CW	0°

Selisih Rata-rata = 1°
Selisih Terbesar = 2°

Tabel 2. Data Hasil Pengujian ke-2 Gerak Rotasi

No.	Bearing Awal	Bearing Target	Bearing Tercapai	Arah Putar	Selisih
1	0°	90°	88°	CW	2°
2	90°	45°	47°	CCW	-2°
3	180°	265°	263°	CW	2°
4	270°	280°	279°	CW	1°

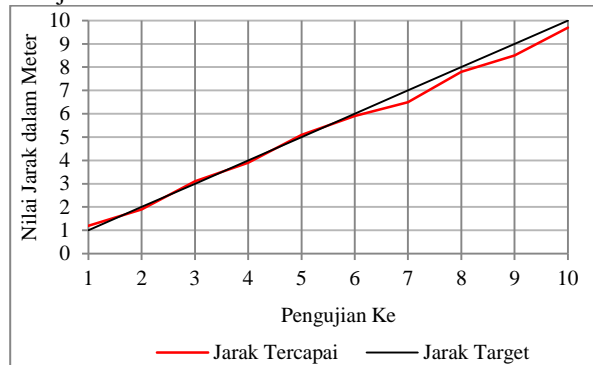
5	330°	80°	78°	CW	2°
6	180°	0°	1°	CCW	-1°
7	0°	135°	134°	CW	1°
8	0°	270°	272°	CCW	-2°
9	270°	265°	267°	CCW	-2°
10	0°	15°	13°	CW	2°

Selisih Rata-rata = 1,7°
Selisih Terbesar = 2°

D. Pengujian Odometer

Pengujian bertujuan untuk mengetahui akurasi sistem odometer. Dalam pengujian, robot diberi masukan berupa jarak target. Robot akan bergerak sejauh jarak target dengan menggunakan odometer tersebut. Kesalahan diperoleh dari selisih jarak target dengan jarak tercapai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kesalahan terbesar adalah 0,5 meter. Sehingga melalui pengujian tersebut dapat ditentukan akurasi dari odometer yakni sebesar 0,5 meter. Nilai tersebut lebih baik dari nilai yang diharapkan yakni sebesar 1 meter. Jarak tercapai terhadap jarak target pada pengujian odometer ditunjukkan dalam Gambar 12.



Gambar 12. Jarak Tercapai terhadap Jarak Target pada Pengujian Odometer

E. Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

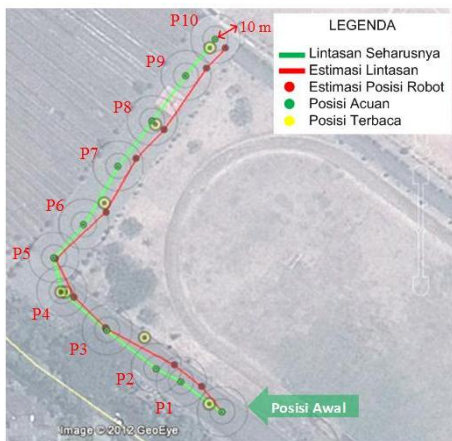
Pengujian bertujuan untuk mengetahui akurasi sistem navigasi waypoint dalam mengatur gerak autonomous mobile robot mencapai posisi tujuan. Dalam pengujian, robot diberikan 10 titik koordinat sebagai posisi tujuan. Seluruh posisi tujuan dan posisi awal telah ditandai dan ditentukan (menggunakan handheld GPS) sebagai acuan pengukuran kesalahan. Kesalahan diperoleh dari jarak yang terukur di lapangan antara posisi tujuan dengan posisi tercapai. Selama misi berjalan, robot mengirimkan pesan navigasi ke komputer untuk memudahkan analisis. Pesan navigasi diterima oleh komputer melalui fasilitas hyper terminal, lalu direkam dalam file teks. Selanjutnya dilakukan pengukuran kesalahan dan pencatatan koordinat posisi tercapai berdasarkan handheld GPS setelah misi navigasi selesai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kesalahan terbesar adalah 11 meter. Melalui pengujian tersebut dapat ditentukan akurasi dari sistem navigasi waypoint yakni sebesar 11 meter (radius). Nilai tersebut lebih buruk dari nilai yang diharapkan yakni sebesar 5 meter (radius). Kesalahan terbesar diakibatkan oleh rendahnya akurasi dan lemahnya sensitivitas GPS receiver terhadap perubahan posisi. Ketika terjadi kesalahan penentuan posisi awal, maka perhitungan bearing dan jarak tempuh pun salah. Kesalahan tersebut tidak dapat segera dikoreksi oleh sistem karena GPS receiver tidak

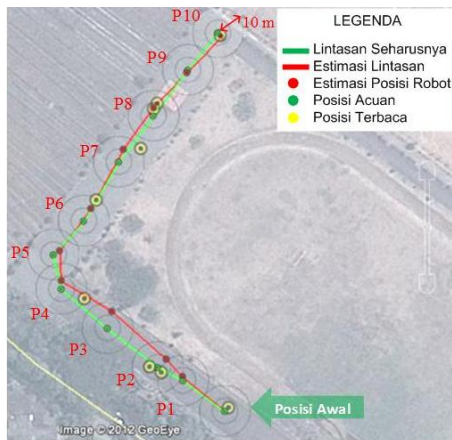
dapat menghasilkan data posisi terkini sesegera mungkin. Data hasil pengujian ditunjukkan dalam Tabel 3. Berdasarkan pesan navigasi dan hasil pengujian, hasil penentuan posisi serta estimasi lintasan robot dapat divisualisasikan menggunakan perangkat lunak peta digital Google Earth seperti ditunjukkan dalam Gambar 13 untuk pengujian ke-3 (T3) dan Gambar 14 untuk pengujian ke-4 (T4). Dimana pengujian ke-3 memiliki nilai rata-rata kesalahan terekecil, sedangkan pengujian ke-4 memiliki nilai rata-rata kesalahan terbesar.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

Posisi Tujuan	Kesalahan (meter)				
	Pengujian ke-				
	1 (T1)	2 (T2)	3 (T3)	4 (T4)	5 (T5)
P1	6,6	7,4	9,2	0,5	5
P2	4	6,5	8,7	4,2	6
P3	4,8	4,2	1	6,4	3,7
P4	3,6	3,8	5,7	2,3	3
P5	7	2	0,9	2,7	4,5
P6	4,3	7,4	10,6	6	4,2
P7	7	7,2	9,2	5,6	6
P8	5	2,6	6,4	4	0,6
P9	7	11	10	1,5	6,3
P10	1,7	4,2	6,4	1,7	4,2
Rata-rata Kesalahan	5,1	5,2	6,8	3,5	4,4



Gambar 13. Visualisasi Pengujian Ke-3



Gambar 14. Visualisasi Pengujian Ke-4

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis sistem navigasi *waypoint* pada *autonomous mobile robot*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Modul CMPS03 *magnetic compass* memiliki akurasi sebesar $\pm 4^\circ$.
- Modul PMB-688 GPS *receiver* memiliki akurasi sebesar 6,6 meter (radius).
- Gerak rotasi dapat mencapai *bearing* yang ditargetkan dengan selisih terbesar antara *bearing* target dengan *bearing* tercapai sebesar $\pm 2^\circ$.
- Gerak rotasi mampu menentukan aksi rotasi (CW atau CCW) untuk mencapai *bearing* target secara tepat, sesuai dengan perancangan.
- Sistem odometer memiliki akurasi sebesar 0,5 meter.
- Sistem navigasi *waypoint* mampu mengatur gerak *autonomous mobile robot* dalam mencapai posisi tujuan dengan akurasi sebesar 11 meter (radius).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Mc Comb dan M. Predko. 2006. *Robot Builder's Bonanza, Third Edition*. New York: McGraw-Hill.
- [2] R. Siegwart dan I. R. Nourbakhsh. 2004. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. London: MIT Press.
- [3] T. Braunl. 2008. *Embedded Robotics, Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems, Third Edition*. Verlag Heidelberg: Springer.
- [4] I. Marito. 2007. *Sistem Navigasi Helikopter Berdasarkan Data Posisi Secara Telemetri*. Depok: Skripsi Program Studi Teknik Elektro FT-UI.
- [5] T. I. Himawan. 2011. *Modul Bersuara Berbasis GPS sebagai Alat Bantu Pemandu bagi Tunanetra*. Malang: Skripsi Jurusan Teknik Elektro FT-UB.J. M. Zoog. 2001. *Compendium: Essential of Satellite Navigation*. Switzerland: U-Blox.
- [6] D. A. Wicaksono. 2009. *Rancang Bangun Sistem Navigasi GPS/INS dan Kompas Digital dengan Kalman Filter pada Mikrokontroler AVR*. Depok: Skripsi Program Studi Teknik Elektro FT-UI.
- [7] J. M. Zoog. 2001. *Compendium: Essential of Satellite Navigation*. Switzerland: U-Blox.
- [8] Polstar. 2007. *PMB-688 GPS Module*. Rocklin: Polstar.
- [9] K. Betke. 2001. *The NMEA 0183 Protocol*. New Bern: The NMEA.
- [10] P. Deifitte. 2010. *Perancangan Alat Sebagai Pengukur Ketinggian dari Permukaan Laut Menggunakan GPS, Mikrokontroler dan Visual Basic dengan Teknik Differensial GPS*. Depok: Skripsi Program Studi Teknik Elektro FT-UI.
- [11] H. Firmansyah. 2008. *Rancang Bangun Sistem GPS pada Sepeda Motor VIA AVR ATmega32*. Depok: Skripsi Program Studi Fisika FMIPA-UI.
- [12] M. C. Megasakti. 2010. *Rancang Bangun Auto Tracking dengan Menggunakan Microcontroller, GPS, SAT Finder dan Digital Compass untuk Sinkronisasi Azimuth Antena Terhadap Satelit Cakrawarta-2*. Depok: Skripsi Program S1 Ekstensi Teknik Elektro FT-UI.
- [13] A. Nugroho. 2008. *Rancang Bangun dan Pemrograman Sistem Transmisi Data GPS Menggunakan Teknologi CSD Sebagai Aplikasi Sistem Penjeakan Posisi Berbasis Mikrokontroler AVR ATmega 8535*. Depok: Skripsi Program Studi Teknik Elektro FT-UI.
- [14] Y. Setiawan. 2008. *Pemrograman Perangkat Lunak Aplikasi Sistem Penjeakan Posisi dengan GPS melalui Jaringan GSM-CSD berbasis Visual Basic*. Depok: Skripsi Program Studi Teknik Elektro FT-UI.
- [15] Tim Digiware. 2008. *CMPS03-Magnetic Compass*. Surabaya: Digiware.
- [16] Y. Gapaiasa. 2011. *Implementasi Sensor Kompas Digital untuk Memonitor Arah Muatan Roket*. Malang: Skripsi Jurusan Teknik Elektro FT-UB.
- [17] I. M. Joni dan B. Raharjo. 2008. *Pemrograman C dan Implementasinya*. Bandung: Informatika
- [18] A. Bejo. 2008. *C dan AVR Rahasia Kemudahan Bahasa C dalam Mikrokontroler ATmega8535*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [19] M. A. Heryanto. 2008. *Pemrograman Bahasa C untuk Mikrokontroler ATmega8535*. Yogyakarta: ANDI.