

Desain Kerjasama Mobile Manipulator Robot

^{1,2}Rafiuddin Syam, ¹Jumaddil Hair

¹Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

²Program Studi Teknik Mekanisasi Pengolahan Politeknik Palu

rafiuddinsyam@gmail.com, joemadil.hair@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat dua *mobile robot* yang mampu bekerjasama mengangkut objek serta membuat sistem kontrol kedua robot agar dapat berjalan dengan benar dan bekerjasama dengan baik melakukan proses pengangkutan objek. Tahap perancangan pada penelitian ini dimulai dengan pemilihan komponen mekanik dan elektronika, serta pembuatan program pada mikrokontroler minimum system ATmega16 dan Arduino Uno, menganalisa kinematika gerak *mobile robot* dan pengujian dengan membuat area kerja berupa lintasan *line follower* dan menghitung errornya. Dari proses perancangan, diperoleh dimensi *mobile robot* dengan ukuran 235mm x 187mm x 165mm. Dimensi rangka penyangga 86mm x 60mm x 154mm. Perhitungan kinematika *mobile robot*, diperoleh kecepatan sudut $\omega(t) = 0,31 \text{ rad/s}$, kecepatan linear 0,17m/s dan posisi robot pada $0,315(t)+\theta_0$. Beban maksimum yang bisa diangkat oleh *mobile robot* adalah 34 newton.

Kata Kunci: mobile robot, line follower, mikrokontroler

1 Pendahuluan

Kerjasama antar dua atau lebih robot merupakan salah satu cabang ilmu robotika yang terus dikembangkan. Hal ini terinspirasi dari fenomena perilaku makhluk hidup yang melakukan kerja kolektif di alam. Semut dan lebah yang bekerja mengangkut makanan, gerak manuver sekelompok ikan dilaut, serta kawanan burung yang terbang membentuk formasi merupakan beberapa contoh dari sekian banyak yang terjadi di alam raya. Pola gerak, lintasan, pengaturan posisi, pembagian peran, ketelitian kerja hingga proses harmoni yang terjadi oleh organisme mengilhami para ilmuwan untuk mendesain hal serupa dalam membuat robot [1]. Studi kritis tentang robot kerjasama telah dilakukan oleh Uny Cao, Alex Fukunaga dan Andrew Kahng yang menekankan pada berbagai hal secara teoritis yang dapat menjadi masalah dalam rancang bangun tentang robot kerjasama [2]. Dalam perkembangannya Tamio Arai, Enroco Pagello dan Lynne Parker membagi pembahasan mengenai robot kerjasama ini dalam beberapa kategori untuk memudahkan rancang bangun agar lebih fokus dan terarah.

Salah satu kategori rancang bangun robot kerjasama adalah transportasi objek. Yaitu proses memindahkan objek tertentu menggunakan dua robot atau lebih. Sujan dan Meggiolaro melakukan rancang bangun tentang *mobile robot* kerjasama memindahkan dan menyisipkan objek pada proses perakitan komponen menggunakan sistem kontrol gabungan PID dan model prediksi umpan maju [3]. Rancang bangun yang lain dilakukan oleh Hou Su menggunakan kontrol algoritma dinamis untuk *mobile robot* kerjasama mengangkut beban [1].

Mobile Robot merupakan salah satu jenis robot yang banyak diminati untuk diteliti dan dikembangkan. Penggunaan analisa kinematik dan dinamik akan menghasilkan kontrol gerakan robot yang baik. Analisa kinematik yaitu dalam hal persamaan matematis dan kontrol dasar dari konfigurasi robot untuk menjaga kestabilan robot. Sedangkan analisa

dinamik berupa pemodelan matematik sistem robot untuk meningkatkan kekokohan robot dalam gangguan maupun kondisi lingkungan yang dihadapi oleh robot [4].

Dalam rancang bangun ini dibuat dua mobile robot beroda yang bekerjasama berbasis line follower (pengikut garis) yang menyelesaikan tugas mengangkut beban dengan pengendali berupa mikrokontroller ATmega 16.

Adapun tujuan rancang bangun ini adalah untuk Merancang dan membuat dua *mobile robot* yang mampu bekerjasama, erencanakan sistem kontrol agar kedua robot dapat berjalan dengan benar dan bekerjasama dengan baik serta Menentukan stabilitas kedua robot yang bekerjasama dalam pergerakannya.

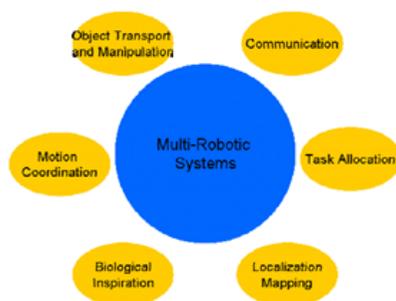
2 Tinjauan Pustaka

2.1 Konsep Kerjasama dalam Robotika

Penelitian tentang robot kerjasama (Cooperative Robotics) pertama kali muncul dalam konsep pemikiran rekayasa robotika modern pada akhir tahun 1980an dengan menitikberatkan pada beberapa manipulator dan mobile robot menunjukkan perilaku bekerjasama antar robot [5]. Penelitian tentang robot kerjasama mengalami perkembangan dikarenakan sistem multi robot dapat menyelesaikan tugas-tugas tertentu yang tidak dapat dilakukan oleh robot tunggal, karena pada akhirnya seberapapun kemampuan sebuah robot tentunya memiliki kemampuan yang terbatas [3].

Uny Cao dan kawan-kawan mendefinisikan perilaku kerjasama pada multi robot sebagai berikut: "Sistem multi robot akan menunjukkan perilaku kerjasama apabila saat diberikan tugas tertentu oleh programmer, terjadi peningkatan utilitas (kegunaan) sistem tersebut yang terjadi karena penggunaan mekanisme mendasar yaitu mekanisme kerjasama" [2]

Tamio Arai dkk memberikan pembagian tentang sistem kerjasama multi robot dalam tujuh topik riset, yaitu: model inspirasi biologis, sistem komunikasi, sistem arsitektur, mekanisme lokalisasi, manipulasi/transportasi objek, koordinasi pergerakan dan rekonfigurasi robot [5]. Hou Su menampilkan topik riset ini seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 1 Bidang penelitian robot kerjasama

Proses rancang bangun yang bekerja sama mengangkat dan memindahkan beban termasuk dalam topik sistem komunikasi, manipulasi/transportasi objek dan koordinasi pergerakan.

Komunikasi adalah sentral dari sistem robot majemuk karena menentukan bagaimana robot dapat berinteraksi dengan robot lain. Biasanya di bedakan menjadi komunikasi

implisit dan eksplisit, dimana implisit merupakan komunikasi terjadi sebagai akibat efek samping dari aksi yang lain sementara komunikasi eksplisit adalah aksi yang khusus dirancang untuk menyampaikan informasi ke robot yang lain dalam satu team [5]. Bentuk interaksi komunikasi dibedakan menjadi tiga yaitu: 1. Melalui lingkungan, penggunaan lingkungan sendiri sebagai media komunikasi; 2. Melalui sensor penggunaan sensor untuk observasi dan persepsi aksi dari kelompok; 3. Melalui penggunaan sinyal komunikasi untuk pertukaran pesan antara agen [6].

Manipulasi/transportasi objek bertujuan untuk memungkinkan beberapa robot bekerjasama membawa, mendorong atau mengangkat benda-benda yang menjadi tugasnya. Banyak penelitian yang menangani topik ini dimana lebih sedikit lagi yang telah diperlihatkan melalui sistem robotik. Wilayah penelitian ini memiliki sejumlah aplikasi praktis yang membuatnya menarik untuk dipelajari [5].

2.2 Mobile Robot

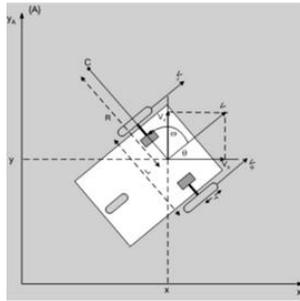
Mobile robot adalah konstruksi robot yang ciri khasnya adalah mempunyai aktuator berupa roda untuk menggerakkan keseluruhan badan robot tersebut sehingga robot tersebut dapat melakukan perpindahan posisi dari satu titik ke titik yang lain seperti pada gambar 2 di bawah ini



Gambar 2 Mobile robot line follower

2.2.1 Kinematika mobile robot

Pada model mobile robot dengan dua roda independent, setiap roda memiliki motor yang mengendalikannya. Perhitungan kinematika seperti pada gambar menggunakan sistem koordinat Cartesian. X_A dan Y_A merupakan bidang acuan global sementara x dan y adalah menyatakan posisi mobile robot pada bidang acuan X_A dan Y_A . θ menyatakan menyatakan posisi mobile robot terhadap koordinat acuan X_A dan Y_A .



Gambar 3 Kinematika gerak mobile pada sistem koordinat kartesian

Kecepatan robot ditentukan oleh kecepatan Linear (V) dan kecepatan sudut (ω), dimana L adalah jarak antara dua roda, r merupakan jari-jari kedua roda, R adalah jarak antara titik tengah kedua roda dengan titik pusat perputaran C.

Kecepatan linear dari setiap roda, masing masing roda kiri V_l dan kanan V_r ditentukan oleh hubungan antara kecepatan sudut dan jari-jari roda sebagai berikut:

$$V_r(t) = \omega_r(t) \cdot r_r \tag{1}$$

$$V_l(t) = \omega_l(t) \cdot r_l \tag{2}$$

karena roda kiri dan kanan sama besar maka jari-jarinya sama besar r.

$$\omega_r(t) = \frac{V_r(t)}{r} \tag{3}$$

$$\omega_l(t) = \frac{V_l(t)}{r} \tag{4}$$

Ketika robot melakukan gerak memutar (berotasi) sesaat dengan panjang jari-jari R diukur dari pusat rotasi C dan titik tengah kedua roda maka kecepatan rotasi disetiap titik robot tersebut selalu sama (robot adalah sistem mekanis yang rigid), sehingga Persamaan (5) dan/atau (6) berlaku untuk menghitung kecepatan rotasi dari robot tersebut:

$$\omega(t) = \frac{V_l(t)}{R + L/2} \tag{5}$$

$$\omega(t) = \frac{V_r(t)}{R + L/2} \tag{6}$$

berdasarkan persamaaan (5) dan (6) kecepatan rotasi robot tersebut dapat dihitung dengan berdasarkan informasi dari kedua kecepatan linear roda robot tersebut.

$$\omega(t) = \frac{V_r(t) - V_l(t)}{L} \tag{7}$$

Sedangkan jari-jari lintasan dapat dicari dengan mensubstitusikan persamaan (6) kedalam persamaan (5), dan memecahkannya untuk R:

$$R = \frac{L(V_r + V_l)}{2(V_r - V_l)} \tag{8}$$

terlihat pada persamaan (8), jari-jari lintasan lingkaran sesaat berbanding terbalik dengan selisih kedua kecepatan roda robot. Semakin kecil selisih kedua kecepatan roda maka jari-jari lingkaran sesaat R yang dibentuk oleh lintasan robot tersebut semakin panjang demikian pula sebaliknya. Jika kecepatan linear roda kanan V_r sama dengan kecepatan linear roda kiri V_l , maka jari-jari R menjadi tak terhingga (∞). Atau secara praktis robot akan bergerak membentuk lintasan garis lurus. Untuk gerakan robot berputar (berotasi) pada pusat sumbunya ($R = 0$) maka berdasarkan persamaan (8) kecepatan kedua roda tersebut harus berlawanan ($V_r = -V_l$).

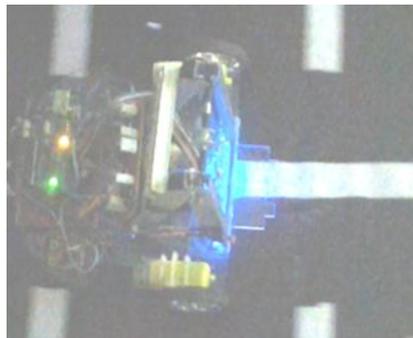
Berdasarkan persamaan (7) dan (8), maka kecepatan linear robot dapat dihitung dengan menggunakan persamaan $V(t) = \omega(t) \cdot R$ yang disubstitusi menjadi

$$V(t) = \frac{V_r(t) + V_l(t)}{2} \quad (9)$$

agar lebih sederhana, persamaan (2.7) dan (2.9) dapat dikumpulkan dalam persamaan matriks vektor sebagai berikut:

$$\begin{matrix} V(t) \\ \omega(t) \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{matrix} V_r(t) \\ V_l(t) \end{matrix} \quad (10)$$

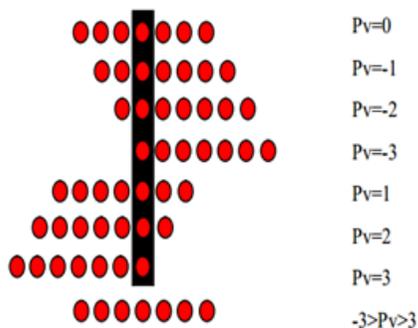
Persamaan (10) di atas pada dasarnya memperlihatkan relasi antara kecepatan linier roda-roda robot terhadap kecepatan linier dan kecepatan sudut robot. Dengan mengetahui kecepatan linier dan kecepatan sudut robot setiap saat, maka kecepatan pada setiap sumbu kartesian dapat dicari dengan cara memproyeksikan vektor kecepatan robot kepada sumbu-sumbu tersebut.



Gambar 4 Mobile robot line follower

Komponen vital pada line follower adalah sensor garis yang mendeteksi adanya garis pada permukaan lintasan robot. Informasi ini diteruskan ke microcontroller untuk diolah untuk menghasilkan gerak pada roda yang menyesuaikan posisi robot terhadap garis [7].

Yang dibaca oleh sensor adalah perbedaan warna antara *background* dan garis (jalur). Dari hasil perbedaan warna pada keseluruhan sensornya tersebut dirubah menjadi suatu nilai-nilai yang merepresentasikan rangkaian logika biner oleh microcontroller. Rangkaian logika biner inilah nantinya yang akan digunakan sebagai parameter dalam menentukan pergerakan dari robot [8].



Gambar 5 Logika sensor line follower

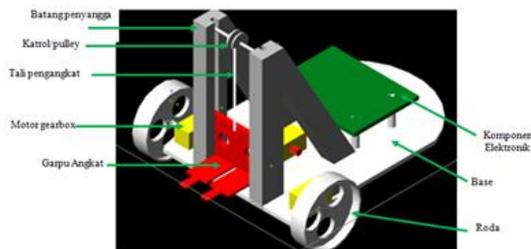
3 Metodologi Penelitian

Proses ini dilakukan dengan merancang, membuat sampai dengan merakit komponen menjadi sebuah mobile robot yang lengkap.

Tahapan ini dibagi menjadi tiga proses, terdiri dari perencanaan, yaitu pemilihan desain mobile robot yang akan digunakan; penyusunan dan pembuatan alat, meliputi pembuatan sistem mekanik, sistem elektronik, dan pembuatan program; uji coba, yaitu proses untuk mengevaluasi hasil pekerjaan apakah sesuai dengan yang diinginkan atau belum.

3.1 Perencanaan

Hal-hal yang dilakukan pada tahapan ini adalah: penentuan rancangan desain berdasarkan dimensi panjang, lebar dan tinggi seperti pada Gambar 6.



Gambar 6 Desain tiga dimensi mobile robot yang digunakan

3.2 Penyusunan dan pembuatan alat

Sistem mekanik, dibuat dengan menggunakan bahan lembar akrilik sebagai base, yang dipasang dua motor gearbox, serta roda bantu roll ball dibagian belakang. Untuk mekanisme angkat menggunakan batang aluminium sebagai rangka, motor gearbox dan fork (garpu angkat) dari bahan akrilik.

Sistem elektronik, menggunakan komponen elektronik sesuai dengan yang dibutuhkan. Komponen elektronik yang digunakan meliputi *microcontroller* Arduino dan ATmega16, *motor driver* dan *radio control*.

Pembuatan program, program dibuat berdasarkan mekanisme dari keseluruhan gerak dan kerjasama mobile robot menggunakan software arduino dan *minimum system* ATmega16.

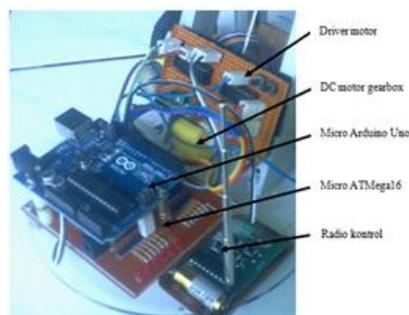
3.3 Eksperimen

Proses ujicoba dimulai dengan mengaktifkan mobile robot master dengan menekan push button pada robot. Selanjutnya robot master akan membaca lintasan garis pada area kerja. Robot master akan membaca lintasan garis sepanjang 90 cm dengan kombinasi data pengaturan PWM roda kiri dan kanan. Proses ini dilakukan beberapa kali sampai diperoleh nilai PWM yang menyebabkan robot bergerak konsisten pada lintasannya. Pengaturan PWM kedua roda dilakukan sampai dengan robot master persis berada di depan beban yang akan diangkat. Selanjutnya *microcontroller* mengaktifkan *transmitter* pada robot master dan *reciever* robot slave untuk menggerakkan robot slave sampai di depan beban. Tahap selanjutnya, kedua robot, bekerjasama mengangkat beban, kemudian kedua robot bergerak menuju target tempat diturunkannya beban.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Mendesain mobile robot kerjasama

Desain ini menjadi patokan perancangan robot dalam menyusun komponen sistem mekanik dan sistem elektronik pada mobile robot. Pada gambar 6 memperlihatkan desain mekanik mobile robot dalam gambar tiga dimensi. Model robot mobile ini terbagi atas dua bagian yaitu bagian base dan pengangkat. Base merupakan utama yang berfungsi sebagai dudukan dari komponen pengangkat maupun komponen mekanik lainnya yang pada gambar menunjukkan bagian yang berwarna putih. Dibagian kiri dan kanan depan terdapat roda yang berwarna abu-abu yang digerakkan oleh motor gearbox yang ditunjukkan dengan warna kuning. Pada rancangan mobile robot ini, dilengkapi dengan tiga motor gearbox, dua untuk menggerakkan roda, satu untuk mekanisme angkat dari garpu/lengan angkat. Dibagian belakang terdapat roda bantu berupa roll ball. Batang penyangga berwarna abu-abu sebagai tempat peletakkan poros katrol / pulley dan tempat naik turunnya lengan angkat. Tali pengangkat berwarna putih menghubungkan lengan angkat dengan motor gearbox melalui katrol. Penyusunan sistem elektronik mobile robot menggunakan komponen elektronik yang meliputi minimum system ATmega16, arduino uno, radio control, DC motor gearbox dan driver motor.

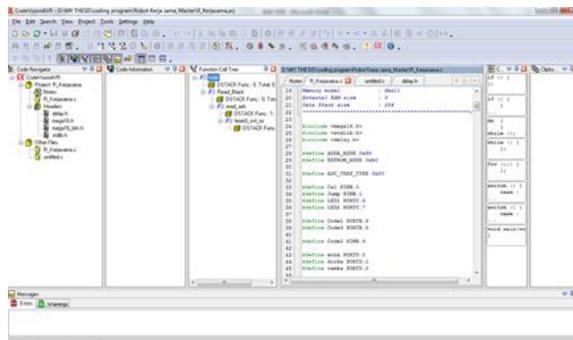


Gambar 7 Komponen elektronik pada mobile robot

4.2 Sistem kontrol mobile robot kerjasama

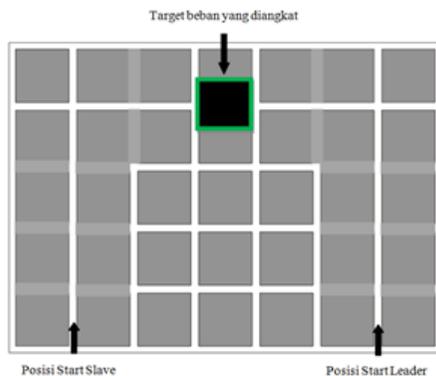
Tujuan pengontrolan pada mobile robot line follower adalah berupa *setpoint* dalam bentuk suatu keadaan dimana mobile robot diharuskan untuk tetap berada di tengah-tengah garis. Implementasi sistem kontrolnya dilakukan dengan pembuatan program pada mikrokontroler.

Tahap pembuatan program dilakukan untuk mengendalikan semua gerak mobile robot sesuai dengan yang diinginkan. Software yang digunakan meliputi Code Vision AVR pada minimum system ATmega16 untuk pergerakan mobile, dan Arduino 1.5.6 untuk koneksi radio kontrol antara mobile robot master dan mobile robot slave. Gambar dibawah menunjukkan tampilan software Code Vision AVR yang memuat program untuk mobile robot kerjasama. Program tersebut selanjutnya di upload ke microcontroller melalui kabel USB. Selanjutnya dilakukan uji coba dengan menjalankan mobile robot pada area kerjanya. Apabila pada proses uji ini coba belum sesuai, maka dilakukan pengecekan ulang pada program sehingga berjalan dengan benar.



Gambar 8 Tampilan software code vision AVR

Pengambilan data dilakukan dengan ukuran garis pada lapangan dengan lintasan awal 90 cm dan lintasan pertemuan dengan panjang total 134 cm. Lebar garis track adalah 3 cm. Gambar dibawah menunjukkan lintasan yang dilalui oleh mobile robot master dan mobile robot slave.



Gambar 9 Lintasan mobile robot

Pada bahasa pemrograman, digunakan 10 case. Case 1 sampai 9 untuk gerak lurus sepanjang lintasan dan case 10 untuk gerak belok kiri dan kanan. Untuk mengetahui hubungan antara case/data dengan kerja sensor dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 1 Sensor aktif pada setiap case

No	SB 1	SB 2	SB 3	SB 4	SB 5	SB 6	SB 7	SB 8	Case
1.	√	√	√	√	√	√	-	-	10
2.	√	√	-	-	-	-	-	-	8
3.	√	-	-	-	-	-	-	-	9
4.	-	-	-	-	-	-	-	√	1
5.	-	-	-	-	-	-	√	√	2
6.	-	-	-	-	-	√	√	-	3
7.	-	-	-	-	√	√	-	-	4
8.	-	-	-	√	√	-	-	-	5
9.	-	-	√	√	-	-	-	-	6
10	-	√	√	-	-	-	-	-	7

Sensor yang digunakan pada robot sebanyak delapan sensor yang pada pemrograman ditulis dengan kode SB1, SB2, SB3, SB4, SB5, SB6, SB7 dan SB8. Tanda check (√) menunjukkan sensor yang aktif pada tiap case. Case 10 memperlihatkan jumlah sensor aktif terbanyak yaitu sebanyak enam sensor, hal ini dikarenakan case 10 adalah menyatakan proses mobile robot saat melakukan gerak belok ke kiri maupun ke kanan.

Robot master dijalankan dengan mensest nilai PWM pada roda kiri dan kanan pada microcontroller ATmega16. Pengambilan data menggunakan 9 case (kondisi) nilai pwm kedua roda untuk gerak lurus, dan 1 case, yaitu case 10 untuk gerak belok kiri maupun kanan. Pengambilan data dilakukan beberapa kali sehingga diperoleh nilai PWM yang menunjukkan robot bergerak sesuai lintasan. Tabel 2 menunjukkan pengambilan data untuk robot master yang bergerak sesuai lintasan. Data nilai PWM ini digunakan juga pada robot slave pada lintasan lurus.

Tabel 2 Nilai PWM roda kanan dan kiri

No.	Nilai PWM roda kiri	Nilai PWM roda kanan
1.	90	50
2.	100	60
3.	140	90
4.	150	100
5.	170	170
6.	100	150
7.	90	140
8.	60	100
9.	50	90

Proses kerjasama mengangkat, memindahkan dan menurunkan objek pada robot master dan slave dilakukan dengan uji coba sebanyak enam kali dengan memvariasikan *delay time* antara kedua robot. Hal ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 3 Nilai delay time robot master dan slave

No	Mengangkat		Menurunkan	
	Delay_master	Delay_slave	Delay_master	Delay_slave
1.	110 ms	110 ms	120 ms	120 ms
2.	120 ms	120 ms	170 ms	170 ms
3.	350 ms	350 ms	230 ms	230 ms
4.	450 ms	450 ms	220 ms	220 ms
5.	320 ms	320 ms	340 ms	340 ms
6.	240 ms	240 ms	230 ms	230 ms

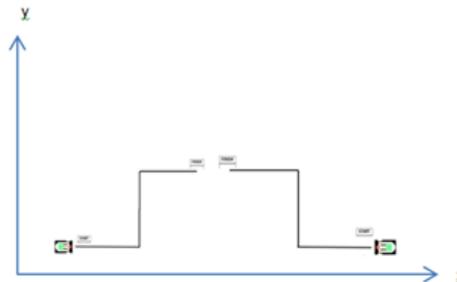
Dari enam kali uji coba, uji coba ke enam yang dijadikan referensi, karena nilai pada uji coba enam yang menunjukkan proses kerjasama antara robot master dan slave yang paling baik dan tepat.

4.3 Penentuan stabilitas mobile robot

Stabilitas mobile robot ditentukan dengan menghitung dan nilai error mobile robot sepanjang lintasan, analisa kinematika dan perhitungan beban angkat kedua robot.

4.3.1 Perhitungan error mobile robot pada lintasan

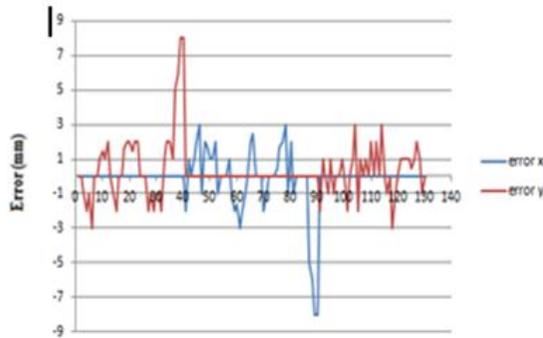
Perhitungan error mobile dilakukan pada kedua robot, yaitu mobile robot master dan robot slave.



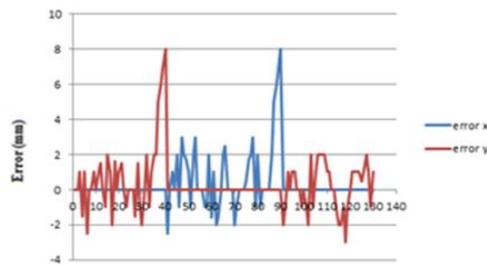
Gambar 10 Track lintasan mobile robot master dan slave

Pada lintasan yang dibuat seperti gambar di atas dilakukan percobaan error dengan sensor line tracking untuk mobile robot master. Robot master mulai jalan pada lintasan start, bergerak lurus berlawanan arah sumbu x sejauh 40 cm kemudian berbelok ke kanan sebesar 90° lalu bergerak lurus searah sumbu y sejauh 50 cm kemudian berbelok ke kiri sebesar 90° dan bergerak berlawanan arah sumbu x sejauh 40 cm. Hal serupa dilakukan oleh robot slave dari arah yang berlawanan.

Gambar dibawah memperlihatkan grafik error mobile master. Garis biru menyatakan nilai error x yaitu nilai penyimpangan sensor yang menjauhi lintasan searah sumbu x, sedangkan garis merah menyatakan nilai error y yaitu nilai penyimpangan sensor yang menjauhi lintasan searah sumbu y.



Gambar 11 Grafik error vs jarak mobile master



Gambar 12 Grafik error vs jarak mobile slave

Gambar 11 dan 12 diatas memperlihatkan grafik nilai error yang terjadi pada jarak 0-130 cm. Error terbesar terjadi pada jarak 40 cm dan 90 cm. Kondisi ini disebabkan karena pada jarak tersebut mobile robot melakukan transformasi (perubahan posisi) berbelok arah membentuk sudut 90° yang mengakibatkan sensor menjauh dari track dan menimbulkan nilai error yang besar. Nilai error terbesar adalah 8. Hasil perhitungan error dapat dilihat sebagai berikut

$$e_{total} = \sqrt{\frac{\sum_0^n e_x^2 + \sum_0^n e_y^2}{n}}$$

$$e_{total} = \sqrt{\frac{557.88 + 630.62}{260}}$$

$$= 2,13 \text{ mm}$$

4.3.2 Perhitungan kinematika mobile robot

Perhitungan kinematika berdasarkan asumsikan bahwa mobile robot bergerak dalam kawasan sumbu XY saja, dikarenakan mobile robot hanya bergerak dalam kawasan 2 dimensi (2D) dengan kontur medan kerja rata sehingga tidak memasukkan unsur sumbu Z.

$1 \text{ rad/s} \approx 0.159155 \text{ rotation per second} \approx 9.5493 \text{ rpm}$. $\omega_r = 50 \text{ rpm} = 5,2 \text{ rad/s}$; $\omega_l = 70 \text{ rpm} = 7,33 \text{ rad/s}$; $r = 28 \text{ mm} = 0,028 \text{ m}$ diperoleh kecepatan masing-masing roda, roda kanan $V_r(t) = 0,14 \text{ m/s}$, roda kiri $V_l(t) = 0,20 \text{ m/s}$. Dengan nilai jarak antara dua roda $L = 0,19 \text{ m}$ diperoleh kecepatan rotasi robot $\omega(t) = 0,31 \text{ rad/s}$.

Kecepatan linear robot diperoleh berdasarkan persamaan (9) $V(t) = 0,17 \text{ m/s}$. Posisi robot ditentukan dengan integrasi dari kecepatan sudut

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt \text{ yang disubstitusi ke persamaan menjadi } \theta(t) = \frac{(V_r(t) - V_l(t))(t)}{L} + \theta_0 = 0,315(t) + \theta_0.$$

4.3.3 Perhitungan beban maksimum objek yang diangkat

Perhitungan beban dilakukan berdasarkan *data sheet* motor DC yang digunakan mengangkat objek, yang memiliki tegangan $V = 6 \text{ volt}$ dan kuat arus $I = 0,36 \text{ ampere}$. Diperoleh daya $P = 2,16 \text{ watt}$. Selanjutnya nilai daya dimasukkan di perhitungan torsi $\tau = d \cdot P / (2 \cdot \pi \cdot n) = 3 \cdot 2,16 / (2 \cdot 3,14 \cdot 200) = 0,0051 \text{ Nm}$. Nilai torsi digunakan untuk menghitung gaya tali pengungkit $F = \tau / R = (0,051) / (0,0015) = 34 \text{ newton}$. Resultan gaya sesuai $\Sigma F = 0$ sehingga gaya $F = \text{beban } W$. Beban maksimum yang dapat diangkat oleh kedua mobile robot sebesar 34 newton.

5 Kesimpulan

Berdasarkan kajian teori, perancangan serta pengujian alat, dapat disimpulkan sebagai berikut

Dimesi *mobile robot* baik robot master maupun slave panjang 235mm, lebar 187mm, tinggi 165mm. Rangka penyangga panjang 86mm, lebar 60mm dan tinggi 154mm. Diameter roda 55mm.

Perhitungan kinematika mobile robot, diperoleh kecepatan sudut $\omega(t) = 0,31 \text{ rad/s}$, kecepatan linear 0,17m/s dan posisi robot pada $0,315(t) + \theta_0$. Beban maksimum yang bisa diangkat oleh mobile robot adalah 34 newton.

6 Nomenklatur

Daftar nomenklatur

θ	=	sudut arah hadap robot
e_{total}	=	Nilai error total pada sensor terhadap lintasan
F	=	Gaya
L	=	Jarak antara dua roda pada mobile robot
P	=	Daya
R	=	Jarak tengah roda & pusat rotasi

r	=	Jari-jari roda
τ	=	torsi
V_l	=	kecepatan linear roda kiri
V_r	=	kecepatan linear roda kanan
ω	=	kecepatan sudut

7 Daftar Pustaka

- [1] SuHao, "Cooperative Control of Payload Transport by Mobile Manipulator Collectives," New York, s.n., 2008.
- [2] U.Y Cao, A. Fukunaga, A Kahng, "Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions," Boston, KluwerAcademicPublishers, 1997.
- [3] T. Arai, E. Pagello, L. Parker, "Editorial: Advances in Multi-Robot Systems," IEEE Transactions On Robotics And Automation Vol.18, No.5, pp.655-661, 2002.
- [4] A. Korodi, M. Corman, "Wheeled Mobile Robot Model and Cooperative Formation Control," WSEAS Transactions on Systems, November 2012, Vol. XI, pp.618-627.
- [5] R. Syam, "Konsep dan Cara Membuat Mobile Robot," Makassar, Membumi Publishing, 2012.
- [6] Yuliza "Komunikasi Antar Robot Menggunakan RF Xbee dan Arduino Microcontroller," IncomTech, Jurnal Telekomunikasi dan Komputer, 2013, Vol. IV, pp.53-68.
- [7] R. Syam, "Fuzzy Logic Control for Pneumatic Excavator Model," International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), Vol. X, pp.21647-21657, 2015.
- [8] A. Pratama, N. Suweden, A. Swamardika, "Sistem Kontrol Pergerakan Pada Robot Line Follower Berbasis Hybrid PID-Fuzzy Logic," Prosiding Conference on Smart-Green Technology Systems , 2013 (ISBN: 978-602-7776-72-2).