



PROPOSAL TESIS

**KONTROL MOBILE ROBOT MENGGUNAKAN
KOMBINASI HYBRID VELOCITY OBSTACLE
DENGAN SAFE INTERVAL PATH PLANNING
UNTUK MENGHINDARI RINTANGAN DINAMIS**

LENA SUSIANTI
NRP 6022221011

DOSEN PEMBIMBING
DR. TRIHASTUTI AGUSTINAH, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2023

LEMBAR PENGESAHAN PROPOSAL TESIS

Judul : Kontrol Mobile Robot Menggunakan Kombinasi Hybrid Velocity
Obstacle Dengan Safe Interval Path Planning Untuk Menghindari
Rintangan Dinamis

Oleh : Lena Susianti


NRP : 6022221011

Telah diseminarkan pada

Hari : Rabu
Tanggal : 5 Juli 2023
Tempat : B104

Mengetahui/menyetujui

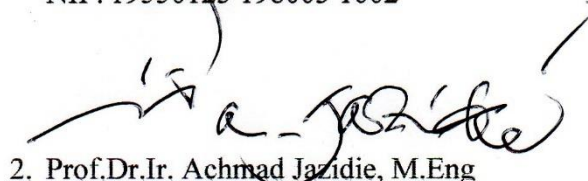
Dosen Penguji:



Calon Dosen Pembimbing




1. Prof.Ir. Abdullah Alkaf, M.Sc Ph.D
NIP: 19550123 198003 1002

1. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T
NIP. 19680812 199403 2001


2. Prof.Dr.Ir. Achmad Jazidie, M.Eng
NIP: 19590219 198610 1001


3. Dr.Ir. Ari Santoso, DEA
NIP: 19660218 199102 1001


4. Yurid Eka Nugraha, S.T., M.Eng., Ph.D
NPP: 2023199511059

Halaman ini sengaja dikosongkan

KONTROL MOBILE ROBOT MENGGUNAKAN KOMBINASI HYBRID VELOCITY OBSTACLE DENGAN SAFE INTERVAL PATH PLANNING UNTUK MENGHINDARI RINTANGAN DINAMIS

Nama mahasiswa : Lena Susianti
NRP : 6022221011
Pembimbing : Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T

ABSTRAK

Strategi penghindaran rintangan bergerak pada *mobile robot indoor* pada umumnya dilakukan dengan cara menghindar dengan berbelok. Namun pada hal itu menyebabkan terjadinya penyimpangan pada jalur optimal yang sebelumnya telah dirancang. Penelitian ini mengusulkan metode penghindaran rintangan dengan pendekatan perhitungan interval aman tanpa melakukan manuver berbelok menggunakan metode *Safe Interval Path Planning* (SIPP).

Untuk menghasilkan metode penghindaran rintangan yang aman dan nyaman bagi lingkungan sekitar metode *Hybrid Velocity Obstacle* akan di modifikasi dengan menambahkan strategi SIPP dalam algoritmanya.

Keberhasilan metode ini akan diuji dengan berbagai macam skenario, lalu akan dibandingkan dengan metode penghindaran rintangan lain untuk melihat performa dari metode yang diusulkan.

Kata kunci: *safe interval path planning, hybrid velocity obstacle*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	3
ABSTRAK	5
DAFTAR ISI.....	7
DAFTAR GAMBAR.....	9
DAFTAR TABEL.....	11
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Kontribusi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.1.1 Modified Headed Social Force Model Based on Hybrid Velocity Obstacles for Mobile Robot to Avoid Disturbed Groups of Pedestrians [4] ...	5
2.1.2 <i>Collision Avoidance of Multimodal Moving Object for Mobile Robot using Hybrid Velocity Obstacles [9]</i>	12
2.1.3 <i>Safe Interval Path Planning with Kinodynamic Constraints [5]</i>	21
2.2 Teori Dasar.....	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	29
3.1 Model Nonholonomic Mobile robot	29
3.2 Model Objek Rintangan Dinamis	30
3.3 Algoritma Safe Interval Path Planning Interval Projection (SIPP-IP)....	33
3.4 Sensor LIDAR	34
3.5 <i>Objective Fuction</i> untuk Jalur Terpendek (Shortest Path)	35
3.6 Skema Keseluruhan Sistem.....	36
3.7 Hipotesis Penelitian	37
3.8 Rancangan Pengujian.....	37
3.9 Kriteria Pengujian	37
BAB 4 RENCANA DAN JADWAL KEGIATAN.....	38

4.1	Jadwal Kegiatan.....	38
	DAFTAR PUSTAKA	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kemungkinan pergerakan manusia tunggal	6
Gambar 2.2 Interaksi antara manusia dengan objek statis	7
Gambar 2.3 Kinematika dan dinamika mobile robot	8
Gambar 2.4 Struktur Sistem Navigasi.....	9
Gambar 2.5 Konfigurasi Path Planning menggunakan PRM.....	9
Gambar 2.6 Hasil simulasi skenario 1. Penghindaran tabrakan untuk menghindari sekelompok pejalan kaki, pejalan kaki tunggal, Formasi FF dan individu manusia berinteraksi dengan objek statis HOI.	11
Gambar 2.7 Hasil simulasi skenario 2. Menghindari dua kelompok pejalan kaki yang terganggu, tunggal pejalan kaki, sekelompok formasi F terdiri dari tiga orang.....	12
Gambar 2.8 Interaksi antara mobile robot dengan objek bergerak secara multi modal.....	13
Gambar 2.9 objek bergerak dengan lintasan melingkar	14
Gambar 2.10 objek bergerak dengan lintasan cloverleaf	14
Gambar 2.11 Struktur sistem penghindaran tabrakan berbasis HVO untuk pelacakan lintasan pada mobile robot dengan dua roda differential-steering	15
Gambar 2.12 Konfigurasi Mobile Robot	16
Gambar 2.13 Hybrid Velocity Obstacle	19
Gambar 2.14 hasil Simulasi	20
Gambar 2.15 Proyeksi dari time Inteval di SIPP-IP	24
Gambar 2.16 Runtime SIPP-IP, SIPP 1 dan SIPP 2 dibandingkan dengan A*	26
Gambar 2.17 Konstruksi Velocity Obstacle.....	26
Gambar 3.1 Objek bergerak dengan lintasan oval	32
Gambar 3.2 Objek bergerak dengan lintasan Lissajous	32
Gambar 3.3 Objek bergerak dengan lintasan Cloverleaf	33
Gambar 3.4 Gambar Konfigurasi sudut Pemindaian LIDAR	34
Gambar 3.5 Implementasi fungsi tujuan pada Jalur.....	35
Gambar 3.6 Skema Keseluruhan.....	36

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beberapa tahun terakhir terlihat peningkatan dalam popularitas *autonomous mobile robot* karena kepraktisan dan potensi penggunaannya di dunia modern [1]. Kebutuhan pasar terhadap robot pelayan diproyeksikan naik secara substantif menjelang 2026 hingga menembus nilai 110.4 Billion USD. Kebutuhan per tahun terhadap robot pelayan rata-rata mengalami peningkatan hingga 25%. Asia-Pasifik merepresentasikan pasar dunia terbesar dan tercepat pertumbuhannya untuk wilayah penjualan robot pelayan. Di antara beberapa jenis robot pelayan, sistem robot logistik dan transpor mencakup 53% dari total kebutuhan pasar terhadap robot pelayan. Data ini menegaskan bahwa kebutuhan terhadap riset di bidang mobile robot untuk melayani kepentingan logistik dan transpor masih sangat tinggi, sehingga secara tidak langsung meningkatkan minat serta jumlah penelitian dan pengembangan yang berkaitan dengan hal tersebut [2].

Robot pelayan yang berupa mobile robot dan bergerak menggunakan roda dikenal sebagai mobile robot beroda atau *Wheeled Mobile Robot* (WMR). WMR dengan otonomi level tinggi yang dikembangkan dan dioperasikan untuk lingkungan dalam ruangan disebut sebagai *autonomous indoor vehicle* (AIV). Dalam penelitian ini AIV yang bertugas mengantarkan barang dari suatu lokasi asal menuju ke lokasi target disebut robot transpor beroda.

Sistem robot transpor beroda sebagai bagian dari domain robot logistik dan transpor membutuhkan peningkatan dalam teknologi navigasi, persepsi dan kognisi dengan derajat kompleksitas yang tinggi dan bergantung pada lingkungan kerjanya. Terdapat lima tantangan yang harus diatasi dalam pengembangan generasi berikutnya dari sistem robot transpor, yaitu: navigasi otonom, pemetaan dan lokalisasi, adaptasi terhadap lingkungan yang bergerak, tata letak, operasi dalam jarak dekat dengan manusia dan objek bergerak seperti

robot transpor beroda lainnya. Penelitian ini berfokus pada permasalahan yang terakhir, yaitu robot yang beroperasi dalam lingkungan manusia.

Dalam misi bergerak dari posisi awal ke posisi target di lingkungan kerja, *mobile robot* harus didukung dengan kemampuan menghindari rintangan berupa rintangan statis dan dinamis. Rintangan statis dapat berupa dinding, pintu, meja, dan benda lainnya yang tidak berpindah, sedangkan rintangan dinamis dapat berupa orang yang berjalan dengan lintasan tertentu baik sendiri maupun berkelompok, *mobile robot* lain yang beroperasi di lingkungan yang sama dengan robot, dan lain sebagainya [3].

Dalam upaya membangun robot transpor dengan kemampuan navigasi otonom yang bersifat *safety critical* yaitu memperhatikan keamanan dan kenyamanan manusia di sekitar, maka penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode penghindaran rintangan dan pengaturan kecepatan yang menyediakan keamanan dan kenyamanan bagi manusia di lingkungan kerja.

Penelitian pendahulu pada umumnya hanya melibatkan sisi fisik manusia dan berasumsi bahwa objek rintangan memiliki kecepatan konstan. Individu dan kelompok manusia diasumsikan bergerak secara linear [3]. Pada kenyataannya, manusia sebagai individu atau kelompok bergerak secara tidak linear (non linier) dengan kecepatan tidak konstan. Gerakan non linier dari objek rintangan dapat berupa lintasan melingkar (*circular*), berpola daun semanggi (*cloverleaf*), atau pola tak tentu (*unknown*). Objek rintangan yang bergerak di sekitar robot dengan lintasan non linier beragam pola disebut sebagai rintangan bergerak multi modalitas. Riset yang meneliti penghindaran rintangan untuk mengatasi gerakan non linear multi modalitas dengan memperhatikan keselamatan fisik dan kenyamanan psikologi manusia telah dilakukan oleh Fuad dkk [4].

Dalam navigasi robot di lingkungan kerja perlu mempertimbangkan percepatan atau kecepatan *mobile robot* yang tidak konstan dan dapat berubah hingga berhenti pada beberapa waktu, agar saat kemungkinan tabrakan terjadi robot dapat menghindari tabrakan bukan dengan berpindah dan menjauh

melainkan berhenti sejenak dalam interval waktu tertentu hingga rintangan menjauh dan robot kembali melanjutkan perjalanan. Hal itu akan membuat robot dapat mempertahankan jalur untuk sampai ke tujuan dengan jarak yang lebih efisien.

Penelitian terkait interval waktu dengan memperhatikan kendala waktu yang telah dilakukan oleh peneliti pendahulu adalah Safe Interval Path Planning yang memperhatikan kinodynamic konstrain [5], Safe Interval Path Planning yang berbasis kontrol kedataran [6], Safe Interval Path Planning pada waktu kontinu [7], Safe Interval Path Planning pada multi objektif [8].

Namun, riset yang meneliti penghindaran rintangan untuk mengatasi non linieritas multi modalitas dengan cara berhenti pada interval waktu tertentu dengan memperhatikan keamanan dan kenyamanan psikologi manusia belum pernah dilakukan. Sehingga orisinalitas penelitian ini terletak pada modifikasi metode penghindaran rintangan Hybrid Velocity Obstacle dengan strategi Safe Interval Path Planning untuk memberikan rasa aman dan nyaman bagi manusia di lingkungan kerja robot dengan memperhatikan sifat non linier dari individu

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada kebutuhan navigasi terhadap otonom robot transpor beroda dalam kemampuan menghindari rintangan yang telah diuraikan pada latar belakang maka rumusan masalah dari proposal tesis ini adalah bagaimana menerapkan strategi *Safe Interval Path Planning* pada metode *Hybrid Velocity Obstacles* dalam menghindari rintangan yang mempertimbangkan rasa aman dan nyaman bagi manusia di lingkungan kerja robot dengan memperhatikan sifat *non linear* dari individu atau kelompok manusia serta mempertimbangkan kinematika dan dinamika dari mobile robot.

1.3 Tujuan

Dalam upaya menghasilkan metode penghindaran rintangan dengan cara mengurangi kecepatan dan berhenti pada mobile robot guna menghindari

tabrakan terhadap objek bergerak non linier dan tabrakan terhadap kelompok manusia dengan memperhatikan kinematika dan dinamika mobile robot.

Manfaat yang diharapkan adalah semakin memperbaiki kemampuan robot dalam melakukan penghindaran tabrakan terhadap rintangan bergerak multimodalitas dan kelompok pedestrian yang bergerak saat beroperasi di lingkungan.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat batasan masalah untuk membatasi permasalahan yang muncul diantaranya:

1. Robot *nonholonomic mobile robot system differential drive* beroda dua
2. Rintangan terdiri dari dua individu manusia, kelompok manusia, dan mobile robot
3. Gerak sosial manusia dinyatakan dalam gerak nonlinier
4. *Mobile robot* memiliki kecepatan maksimum tertentu
5. Gaya gesek pada roda diabaikan

1.5 Kontribusi

Menghasilkan metode penghindaran rintangan dengan cara mengurangi kecepatan dan berhenti sesaat pada mobile robot guna menghindari tabrakan dengan objek bergerak non linier dan tabrakan terhadap kelompok manusia dengan memperhatikan kinematika dan dinamika mobile robot.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Pada bab ini akan membahas materi yang berhubungan dengan penelitian yang akan dikerjakan, diantaranya kajian penelitian terkait dan teori dasar. Penelitian yang dilakukan dalam merancang algoritma penghindaran rintangan dengan metode dan strategi. Beberapa perpustakaan terdahulu mengenai penelitian terkait penghindaran rintangan pada mobile robot akan dijadikan sebagai bahan literatur. Teori-teori dasar untuk menunjang metode yang diusulkan juga akan dijelaskan

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Sub bab terkait akan menjelaskan penelitian-penelitian mengenai metode penghindaran rintangan mobile robot untuk melaksanakan tugas bergerak dengan misi tertentu dari suatu posisi awal ke posisi target.

2.1.1 Modified Headed Social Force Model Based on Hybrid Velocity

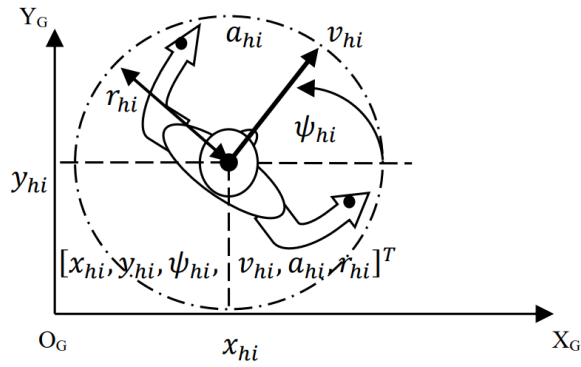
Obstacles for Mobile Robot to Avoid Disturbed Groups of Pedestrians [4]

Paper ini menjelaskan tentang metode penghindaran rintangan yang mempertimbangkan keamanan dan kenyamanan pedestrian yang berjalan secara non linier dengan kelajuan yang tidak konstan serta mempertimbangkan kecepatan rotasi dan translasi robot. Metode ini disebut dengan *Modified Headed Sosial Force Model Based on Hybrid Velocity Obstacles*, dimana *Headed Social Force Model* adalah metode penghindaran rintangan yang mempertimbangkan kenyamanan psikologi bagi manusia yang cenderung berkelompok saat berjalan, dan *Hybrid Velocity Obstacle* adalah metode penghindaran rintangan yang mampu menjaga keselamatan objek di sekitarnya. HVO digunakan untuk menghitung kecepatan linier dan kecepatan sudut yang digunakan untuk menghindari rintangan dengan lintasan non linier.

Jenis pedestrian yang dihindari dengan aman dan nyaman oleh mobile robot berupa pejalan kaki dengan formasi dan interaksi yang bermacam-macam.

Individu manusia dapat dideskripsikan dengan pose manusia X-Y koordinat $[x_{hi}, y_{hi}, \psi_{hi}]^T$, kecepatan v_{hi} , akselerasi a_{hi} , dan radius individu tubuh manusia r_{hi} dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$S_{hi} = [x_{hi}, y_{hi}, \psi_{hi}, v_{hi}, a_{hi}, r_{hi}]^T \quad (1)$$



Gambar 2.1 Kemungkinan pergerakan manusia tunggal

Manusia yang berinteraksi dengan benda-benda statis di lingkungan seperti papan pesan, lukisan, dan tampilan layar dinyatakan dalam bentuk persamaan,

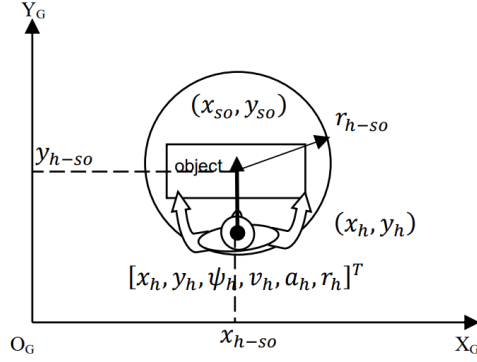
$$S_{h-so_m} = [x_{h-so_m}, y_{h-so_m}, r_{h-so_m}]^T \quad (2)$$

di mana (x_{h-so_m}, y_{h-so_m}) merepresentasikan m^{th} adalah titik poin di area *human object Interaction*. Radius dalam area ini dinotasikan dengan r_{h-so_m} titik tengah dan radius HOI dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$(x_{h-so_m}, y_{h-so_m}) = (x_{so}, y_{so}) \quad (3)$$

$$x_{h-so_m} = \sqrt{(x_{so} - x_h)^2 + (y_{so} - y_h)^2} \quad (4)$$

diasumsikan bahwa lokasi objek statis (x_{so}, y_{so}) di posisikan di tengah area HOI.



Gambar 2.2 Interaksi antara manusia dengan objek statis

Penelitian ini mendeskripsikan geometri pergerakan manusia dengan model *non-holonomic* yang digambarkan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_h & \dot{y}_h & \dot{\psi}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_h & 0 & \sin \psi_h & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h & \omega_h \end{bmatrix} \quad (5)$$

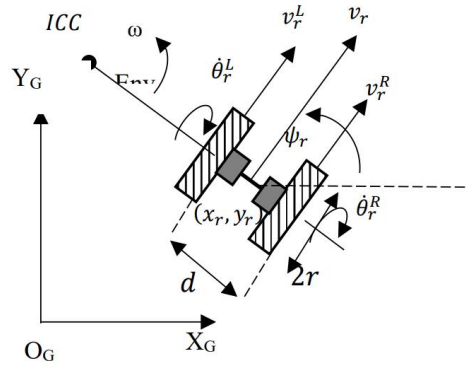
v_h adalah kecepatan manusia bergerak dengan $[v_h, \omega_h]^T$ pose pundak terhadap nilai tengah dinotasikan dengan $[x_h, y_h]^T$ yang merepresentasikan koordinat umum manusia. Transisi dari koordinat tubuh manusia ke koordinat global dengan *forward kinematics* model manusia nonholonomic direpresentasikan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} v_h \\ \omega_h \end{bmatrix} = r_h \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{d_h} & -\frac{1}{d_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_h^R \\ \dot{\theta}_h^L \end{bmatrix} \quad (6)$$

di mana langkah kaki manusia r_h , diameter tubuh d_h , kecepatan dari langkah kaki manusia $\dot{q}_h = [\dot{\theta}_h^R \ \dot{\theta}_h^L]^T$ digunakan untuk pergerakan manusia dengan pengaruh dari kecepatan linier dan angular v_h . Model *inverse kinematics* digunakan agar mendapatkan kecepatan langkah kaki manusia dengan \dot{q}_h dari kecepatan linier dan angular v_h didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_h^R \\ \dot{\theta}_h^L \end{bmatrix} = \frac{1}{r_h} \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_h}{2} \\ 1 & -\frac{d_h}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ \omega_h \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dinamika dan kinematika mobile robot yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



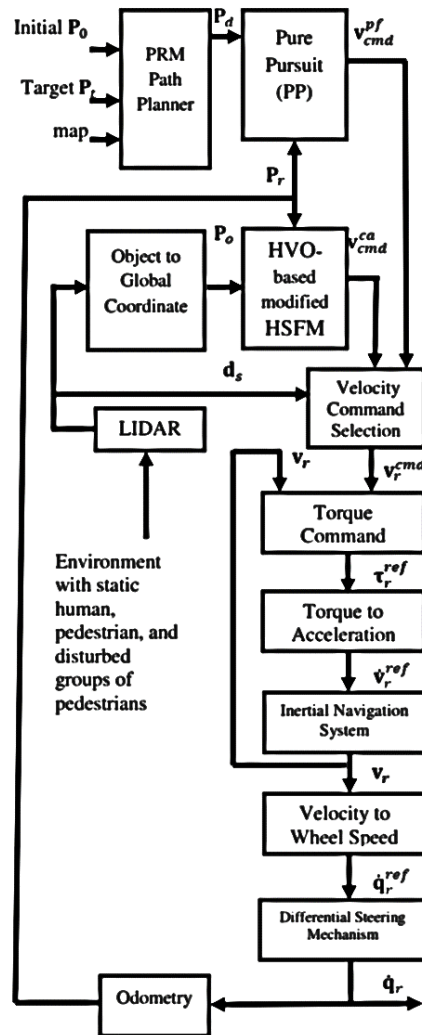
Gambar 2.3 Kinematika dan dinamika mobile robot

Jarak aman dan nyaman yang dijaga oleh robot diuji menggunakan metode *Threat Level Index* (TLI) untuk mengevaluasi jarak dan kenyamanan dan keamanan untuk masing-masing objek yang ada dilingkungan.

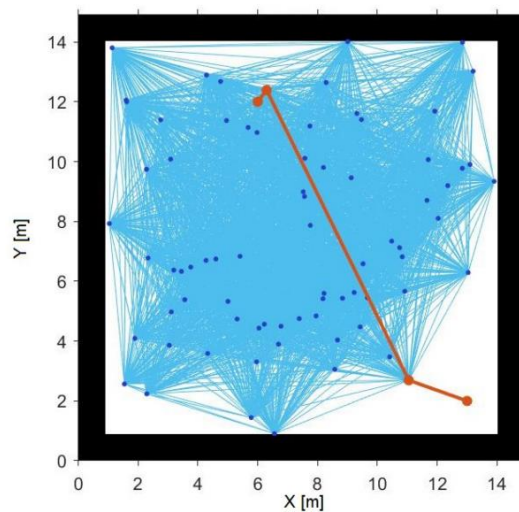
$$TLI = e^{\frac{d_r - o}{\sigma}} \quad (8)$$

Indeks evaluasi ini membandingkan antara standar deviasi dan jarak sebenarnya masing-masing keberadaan mobile robot d_{r-o} . Standar deviasi didefinisikan pada 0.65 m. Nilai parameter dapat memberikan ruang untuk robot bergerak.

Desain struktur sistem penghindaran rintangan untuk mobile robot yang diinginkan sebagai referensi $p_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$ dihasilkan dari PRM perencanaan lintasan pada gambar 2.5. Referensi ini dihubungkan dengan menentukan *waypoint* secara acak yang dapat dideteksi oleh mobile robot. Pose robot sebenarnya dinotasikan dengan $P_r = [x_r, y_r, \psi_r]^T$ dan pose rintangan dinyatakan dengan $P_o = [x_o, y_o, \psi_o]^T$.



Gambar 2.4 Struktur Sistem Navigasi



Gambar 2.5 Konfigurasi Path Planning menggunakan PRM

Desain kinematika dan dinamika mobile robot ditentukan pada pusat massa digambarkan sebagai G. Titik ini mewakili robot dalam koordinat XY. Pose mobile robot dan transisi konfigurasinya dituliskan sebagai berikut:

$$P_r = [x_r \ y_r \ \psi_r]^T \quad (9)$$

$$\dot{P}_h = [\dot{x}_r \ \dot{y}_r \ \dot{\psi}_r]^T \quad (10)$$

Kecepatan Eulerian digunakan untuk memperbaharui pose robot sebagai berikut:

$$[x_h(k+1) \ y_h(k+1) \ \psi_h(k+1)] = [x_h(k) \ y_h(k) \ \psi_h(k)] + kT[\dot{x}_h(k) \ \dot{y}_h(k) \ \dot{\psi}_h(k)] \quad (11)$$

Persamaan yang digunakan mobile robot terdiri dari *repulsive force* dan *attractive force*

$$F_r^{HVO-mod\ SFM} = \sum F_{r-obs}^{rep} + F_{r-tar}^{att} \quad (12)$$

dan untuk *repulsive force* dibagi menjadi:

1. Objek gangguan statis didekripsikan sebagai berikut:

$$F_{h-so}^{rep} = K_h^{str} \exp \exp \left(\frac{(r_{h-so} - d_{h-so})}{K_h^{rng}} \right) n_{h-so} + K_h^{cmp} g(r_{h-so} - d_{h-so}) n_{h-so} + K_h^{fri} g(r_{h-so} - d_{h-so}) \Delta v_{so-h}^t t_{h-so} \quad (13)$$

2. Single statis atau pergerakan manusia diformulasikan dengan:

$$F_{h-sh}^{rep} = K_h^{str} \exp \exp \left(\frac{(r_{h-sh} - d_{h-sh})}{K_h^{rng}} \right) n_{h-sh} + K_h^{cmp} g(r_{h-sh} - d_{h-sh}) n_{h-sh} + K_h^{fri} g(r_{h-sh} - d_{h-sh}) \Delta v_{sh-h}^t t_{h-sh} \quad (14)$$

3. Interaksi objek manusia diformulasikan sebagai berikut:

$$F_{h-hoi}^{rep} = K_h^{str} \exp \exp \left(\frac{(r_{h-hoi} - d_{h-hoi})}{K_h^{rng}} \right) n_{h-hoi} + K_h^{cmp} g(r_{h-hoi} - d_{h-hoi}) n_{h-hoi} + K_h^{fri} g(r_{h-hoi} - d_{h-hoi}) \Delta v_{sh-h}^t t_{h-hoi} \quad (18)$$

Penjumlahan untuk seluruh persamaan *repulsive force* dengan berbagai macam skenario sehingga menjadi:

$$\sum F_{r-obs}^{rep} = F_{h-so}^{rep} + F_{h-so}^{rep} + F_{h-sh}^{rep} + F_{h-gh}^{rep} \quad (19)$$

Sedangkan untuk memberikan robot bantuan menemukan target dengan *attractive force* adalah:

$$F_{r-tar}^{att} = K_r^v (v_r^{des} - v_r^{act}) \quad (20)$$

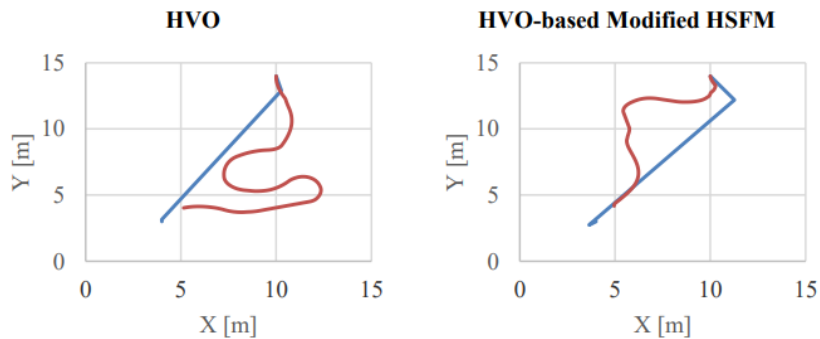
Kecepatan yang diinginkan berdasarkan pemindaian LIDAR di sekitar robot seperti berikut:

$$\begin{aligned} HVO &= \bigcup_{o \in O} V O_{r|o} \cup \bigcup_{ro \in R} R V O_{r|ro} \cup \bigcup_{h \in P} N L V O_{r|h} \\ V_{safe \Omega} &= \overline{HVO_{\Omega}} = \{v_r \in v | v_r \notin HVO_{\Omega}\} \\ v_r^{des} &= (v_{max, v_r^{hvo*}}^{ca}) \end{aligned} \quad (21)$$

Kecepatan sudut angular ditentukan dengan memanfaatkan penginderaan LIDAR maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

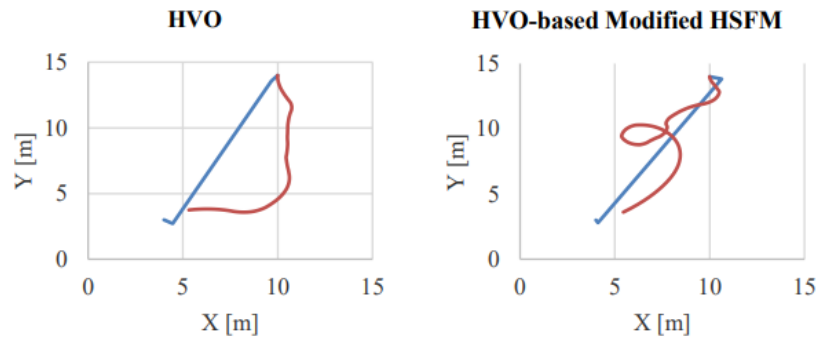
$$\omega_{cmd}^{ca} = \{\psi_r^* \in \psi | \frac{arg d_{\psi_r^* \in ds}(d_s)}{(\Delta \psi_r^*)}\} \quad (22)$$

Simulasi sistem navigasi dalam ruangan dengan kinematika dan dinamikanya hasilnya nilai referensi ada di garis biru dan aktualnya pada garis merah. Metode penghindaran tabrakan untuk menghindari sekelompok pejalan kaki GP, tunggal pejalan kaki SP, FFormasi FF dan individu manusia berinteraksi dengan objek statis HOI yang diilustrasikan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Hasil simulasi skenario 1. Penghindaran tabrakan untuk menghindari sekelompok pejalan kaki, pejalan kaki tunggal, Formasi FF dan individu manusia berinteraksi dengan objek statis HOI.

Skenario dua robot menghindari dua kelompok pejalan kaki yang terganggu, tunggal pejalan kaki, sekelompok formasi F terdiri dari tiga orang dan hasilnya dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hasil simulasi skenario 2. Menghindari dua kelompok pejalan kaki yang terganggu, tunggal pejalan kaki, sekelompok formasi F terdiri dari tiga orang.

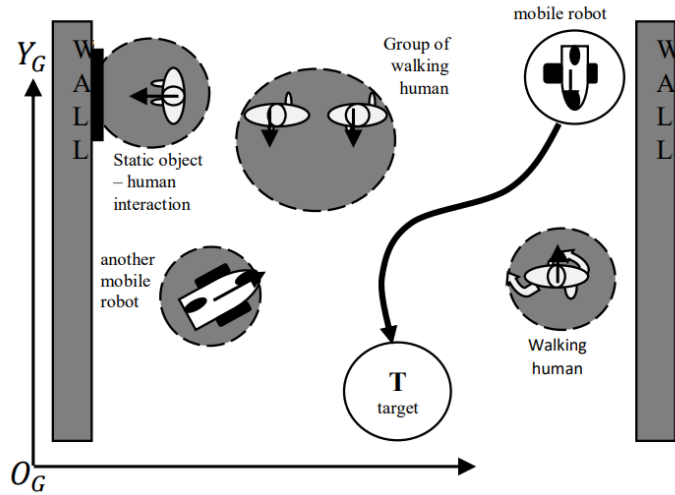
Berdasarkan penjabaranyang telah dijelaskan sebelumnya, kelebihan paper ini adalah peneliti telah mempertimbangkan metode penghindaran rintangan untuk objek dengan bentuk non linier yang kompleks dengan tetap mempertimbangkan keamanan dan kenyamanan manusia yang bergerak di lingkungan sekitar. Namun kecepatan yang konstan pada paper ini masih bisa di kembangkan menjadi kecepatan yang tidak konstan (terdapat percepatan, perlambatan, bahkan berhenti) pada gerak mobile robot saat menghindari rintangan sehingga diharapkan mobile robot dapat mengikuti jalur dengan baik.

2.1.2 Collision Avoidance of Multimodal Moving Object for Mobile Robot using Hybrid Velocity Obstacles [9]

Multi Modal Moving Object atau objek bergerak multi modalitas merupakan rintangan bergerak dengan lintasan nonlinier. Rintangan tersebut terdiri dari objek bergerak dengan lintasan melingkar (*circular*), lintasan seperti daun semanggi (*cloverleaf*) dan gerak dengan lintasan yang tidak diketahui. Contoh objek yang bergerak secara multi modalitas adalah individu pedestrian, kelompok pedestrian, dan mobile robot lain.

Gambar 2.8 menggambarkan ilustrasi dari skenario penghindaran rintangan oleh mobile robot di ruangan tertutup dengan dinamika rintangan berupa objek bergerak multi modalitas. Robot bertugas mengantarkan barang ke suatu lokasi target tertentu dengan tetap memelihara keselamatan object disekitarnya. Lingkaran dengan garis putus-putus pada bagian kelilingnya dan area abu-abu merepresentasikan standar keselamatan yang harus dihindari oleh robot.

Masing-masing gerakan objek yang ada di skenario tersebut memberi pengetahuan berupa model gerakan dan bagaimana objek tersebut bergerak, sehingga dapat digunakan dalam konteks yang berbeda.



Gambar 2.8 Interaksi antara mobile robot dengan objek bergerak secara multi modal

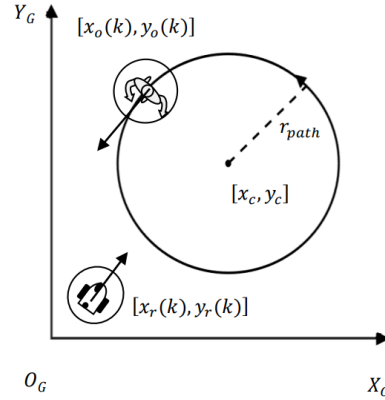
Gerakan dengan pengulangan terdiri dari gerakan objek dengan lintasan melingkar (*circular*) atau lintasan seperti daun semanggi (*cloverleaf*). Lintasan melingkar diekspresikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x_o(k) &= x_c + r_{path} \cos(k\omega_o T) \\ y_o(k) &= y_c + r_{path} \sin(k\omega_o T) \end{aligned} \quad (23)$$

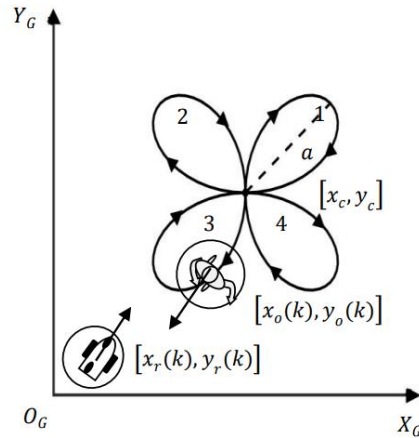
titik pusat dari jalur berbentuk lingkaran direpresentasikan dengan x_c dan y_c dengan radius r_{path} , $k = 0, 1, 2, \dots$, sedangkan ω_o merepresentasikan kecepatan angular objek dan T merupakan time sampling. Gambar 2.2 memberikan ilustrasi sebuah objek yang bergerak dengan lintasan melingkar.

Bentuk objek yang bergerak dengan pola lintasan berulang kedua adalah lintasan *cloverleaf* sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.3. Lintasan *cloverleaf* diekspresikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}x_o(k) &= x_c + a \cos(k\omega_o T) \\y_o(k) &= y_c + a \cos(k\omega_o T)\end{aligned}\tag{24}$$



Gambar 2.9 objek bergerak dengan lintasan melingkar

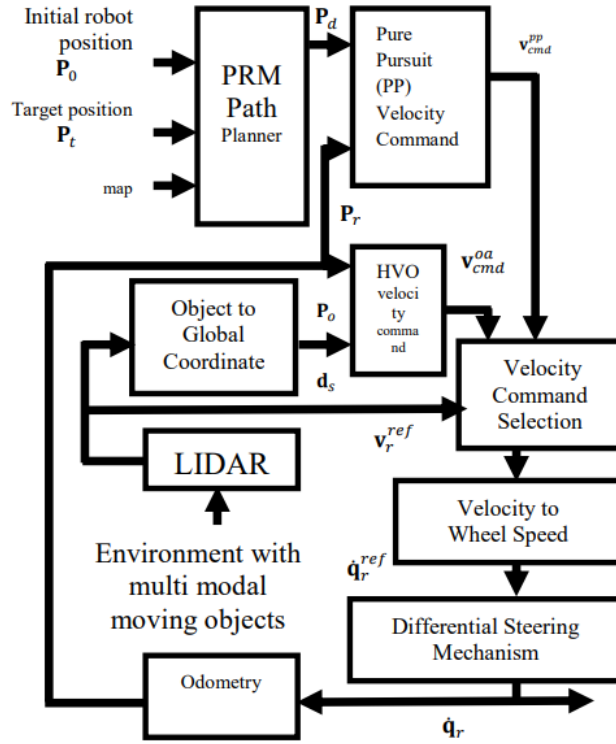


Gambar 2.10 objek bergerak dengan lintasan cloverleaf

Titik simpul (*node*) direpresentasikan sebagai titik penting untuk pembuatan gerak mobile robot. Jalur non linier sebagai kumpulan node yang terkait $[x_o(k), y_o(k)]$ didapat dari informasi posisi titik awal ke posisi target yang ditentukan dengan memberikan initial posisi dan posisi target.

Struktur pelacakan lintasan (*trajectory tracking*) berbasis rintangan dengan kinematika mobile robot menggunakan dua roda ditampilkan pada gambar 2.7.

mobile robot diatur dengan menggunakan titik referensi yang diinginkan. Sehingga dapat direpresentasikan dengan persamaan $p_d = [x_d y_d \psi_d]^T$. Waypoint yang dibentuk melalui pose robot yang akan membentuk lintasan yang akan dilalui oleh robot dari titik awal hingga target.



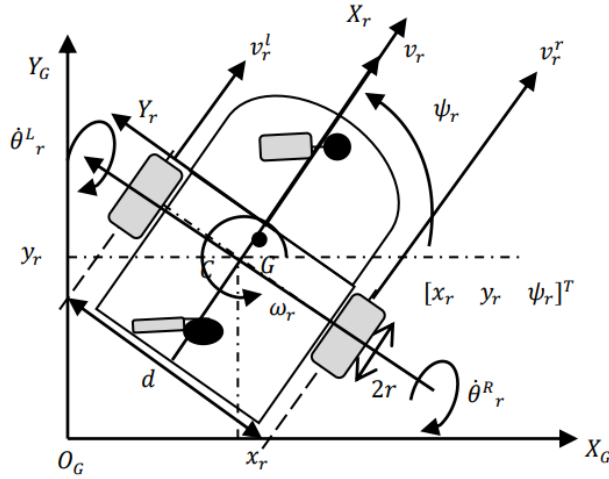
Gambar 2.11 Struktur sistem penghindaran tabrakan berbasis HVO untuk pelacakan lintasan pada mobile robot dengan dua roda differential-steering

Ketika mobile robot menghindari rintangan, maka standar jarak aman perlu dinotasikan. Objek rintangan bergerak multi modalitas yang ada di sekitar mobile robot didefinisikan sebagai $p_o = [x_o y_o \psi_o]^T$ sehubungan dengan batasan luar setiap objek. Penelitian ini mengusulkan Proximity Index (PI) untuk evaluasi jarak aman setiap objek pada sekitar lingkungan dengan:

$$PI = \frac{\sigma}{d_{r-o}} \quad (2.3)$$

Nilai evaluasi indeks adalah perbandingan antara jarak aman terdekat dari objek σ dengan jarak aktual mobile robot dari setiap objek d_{r-o} . Parameter ini dipilih sesuai

dengan ukuran robot, untuk d_{r-o} ditentukan dengan jarak *Euclidean*. Standarisasi garis aman adalah 0.5 m atau sama dengan 0.7 dari *PI*. Semakin kecil nilai *PI*, maka semakin aman kondisinya. Ketika nilai *PI* lebih besar dari 0.7, maka keamanan objek terancam, potensi tabrakan semakin besar.



Gambar 2.12 Konfigurasi Mobile Robot

2.1.1 Kinematika dan Dinamika Robot

Penelitian ini mendefinisikan mobile robot sebagai robot sebagai robot *differential steering* perodua untuk mengantarkan tugas mengantarkan barang dari suatu posisi awal menuju suatu posisi target di suatu lingkungan dalam ruangan. Postur robot dalam sistem koordinat kartesius ditampilkan dalam gambar 2.8, dengan d merepresentasikan lebar robot, C adalah titik tengah dari sumbu roda, pusat massa dinyatakan dengan G , titik ini merepresentasikan robot dalam koordinat global X - Y . Motor kanan dan kiri memutar roda dengan diameter $2r$. Pose dan transisi konfigurasi dari robot berturut-turut dinyatakan sebagai berikut:

$$P_r = [x_r \ y_r \ \psi_r]^T \quad (2.4)$$

$$\dot{P}_r = [\dot{x}_r \ \dot{y}_r \ \dot{\psi}_r]^T \quad (2.5)$$

Posisi robot adalah x_r dan y_r dan orientasi adalah ψ_r , transisi konfigurasi robot dari koordinat tubuh menjadi koordinat global dinyatakan sebagai berikut:

$$[\dot{x}_r \ \dot{y}_r \ \dot{\psi}_r] = [\cos \psi_r \ 0 \ \sin \psi_r \ 0 \ 0 \ 1][v_r \ \omega_r] \quad (2.6)$$

Di mana kecepatan mobile robot $V_r = [v_r \ \omega_r]^T$ menyebabkan perubahan pada pose robot dalam koordinat global $\dot{P}_r = [\dot{x}_r \ \dot{y}_r \ \dot{\psi}_r]^T$. Model forward kinematik dari mobile robot dinyatakan sebagai berikut,

$$[v_r \ \omega_r] = r \left[\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{d} - \frac{1}{d} \right] [\dot{\theta}_r^R \ \dot{\theta}_r^L] \quad (2.7)$$

Di mana kecepatan roda $\dot{q}_r = [\dot{\theta}_r^R \ \dot{\theta}_r^L]^T$ digunakan untuk menggerakkan robot berdasarkan radius roda r dan lebar d sehingga mempengaruhi kecepatan linier v_r dan kecepatan angular ω_r . Disisi lain, invers kinematik digunakan untuk menentukan kecepatan roda \dot{q}_r dari efek linier dan kecepatan angular V_r adalah sebagai berikut,

$$[\dot{\theta}_r^R \ \dot{\theta}_r^L] = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{d} - \frac{1}{d} \right] [v_r \ \omega_r] \quad (2.8)$$

Integrasi Eulerian dimanfaatkan untuk memperbarui pose robot sebagai berikut:

$$\begin{aligned} [x_r(k+1) \ y_r(k+1) \ \psi_r(k+1)] \\ = [x_r(k) \ y_r(k) \ \psi_r(k)] + kT[\dot{x}_r(k) \ \dot{y}_r(k) \ \dot{\psi}_r(k)] \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.1.2 LIDAR Sensor

Mobile robot dalam penelitian ini menggunakan simulasi LIDAR (Light Detection and Ranging) scan dengan penginderaan maksimal 20 m. Dipasang pada sudut mobile robot dengan total 8 titik. Setiap titik memiliki jarak 45°. Berdasarkan pembacaan LIDAR, pilihan kecepatan yang digunakan untuk menghasilkan kecepatan yang sesuai dengan algoritma -1 dapat ditentukan.

2.1.3 Kontroler Pure Pursuit

Pure Pursuit (PP) adalah metode pelacakan yang efektif untuk penjejakan lintasan. Digunakan untuk memandu gerakan robot dari posisi awal hingga sampai di posisi target, kedua nilai ini merupakan bagian dari himpunan pemandu (*waypoint*) p_d sebagai salah satu parameter yang dibutuhkan untuk PP. Parameter lain di antaranya adalah jarak pandang kedepan (*look ahead*

distance), kecepatan linier yang diinginkan, dan kecepatan angular maksimum. Berdasarkan pada parameter ini, *PP* menghitung kecepatan linier v_{cmd}^{pf} dan kecepatan angular ω_{cmd}^{pf} sebagai perintah kecepatan V_{cmd}^{pf} untuk keperluan penjejakan lintasan guna mencapai titik pandang ke depan dengan memberikan pose robot aktual P_r sebagai masukan.

2.1.4 Metode Penghindaran Rintangan menggunakan *Hybrid Velocity Obstacles*

HVO menghasilkan keluaran dalam bentuk kecepatan $V_{cmd}^{oa} = [v_{cmd}^{oa} \ \omega_{cmd}^{oa}]^T$ untuk keperluan penghindaran tabrakan. Perintah kecepatan ini dihasilkan dengan cara metode HVO bersama input yang terdiri dari pose objek rintangan P_o dan robot P_r . Lebih jauh \dot{q}_r digunakan untuk memutar kedua motor robot sehingga menghasilkan transisi konfigurasi \dot{P}_r . Dengan manfaat integrasi Eulerian, pose robot P_r dapat diketahui berdasarkan nilai transisi konfigurasi \dot{P}_r .

Kontroler ini menghitung peringatan kecepatan linier dan sudut yang menggerakkan robot dari posisinya saat ini untuk mencapai beberapa sudut pandang maju di depan robot. *PP* dapat digunakan sebagai waypoint spesifik. Kecepatan linier dan angular dari path tracking $V_{cmd}^{pp} = [v_{cmd}^{pp} \ \omega_{cmd}^{pp}]^T$. HVO menghasilkan keluaran dalam bentuk kecepatan $V_{cmd}^{oa} = [v_{cmd}^{oa} \ \omega_{cmd}^{oa}]^T$ untuk tujuan penghindaran rintangan. Kecepatan ini menghasilkan implementasi dari HVO dengan diberikan masukan yang terdiri dari pose rintangan p_o dan pose robot p_r .

Tentukan kecepatan mobile robot v_r dalam ruang V yang dapat menyebabkan tabrakan antara mobile robot MR dan rintangan O dalam setiap titik waktu t antara t_0 dan Time Horizon (TH).

$$VO = \cup_{t=t_0}^{TH} \{v_r \in V | \exists t \in [t_0, TH], MR(t) \cap O(t) \neq \emptyset\}$$

Dalam kasus penghindaran rintangan O memiliki karakteristik penghindaran yang sama dengan mobile robot Mr. RVO diformulasikan sebagai berikut

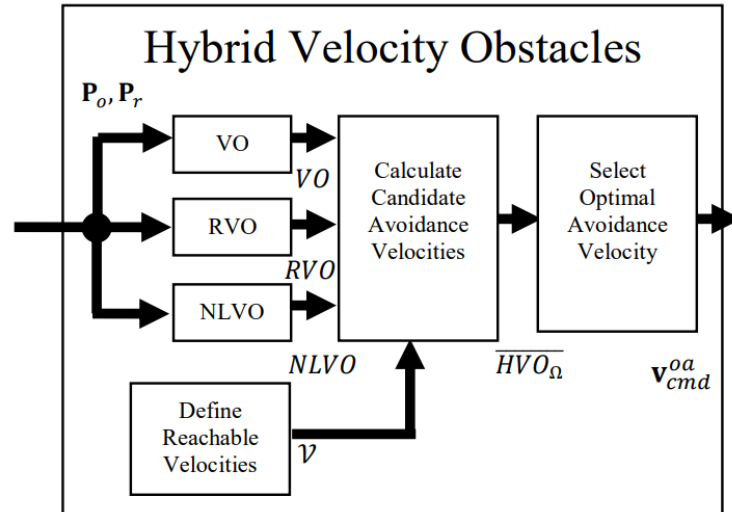
$$RVO_o^r(v_o, v_r, a_o^r) = \cup_{t=t_0}^{TH} \left\{ v'_r \mid \frac{1}{a_o^r} v'_r + \left(1 - \frac{1}{a_o^r}\right) v_r \in VO_o^r(v_o) \right\}$$

Pergerakan manusia merupakan rintangan yang kompleks dengan arah dan kecepatan yang tidak pasti. Penelitian ini menggunakan HVRO dan NLVO yang dapat digunakan untuk non-linier objek bergerak, NLVR adalah persamaan umum dari VO dalam tujuan dan magnitude kecepatan rintangan v_o

$$NLVO = VO \Leftrightarrow \exists (t_1, t_2) \in [t_0, TH]^2 \mid t_1 \neq t_2 \text{ dan } v_o(t_1) \neq v_o(t_2)$$

$$HVO = \cup_{o \in O} VO_{r|o} \cup \cup_{ro \in O} RVO_{r|Ro} \cup \cup_{H \in P} NLVO_{r|h}$$

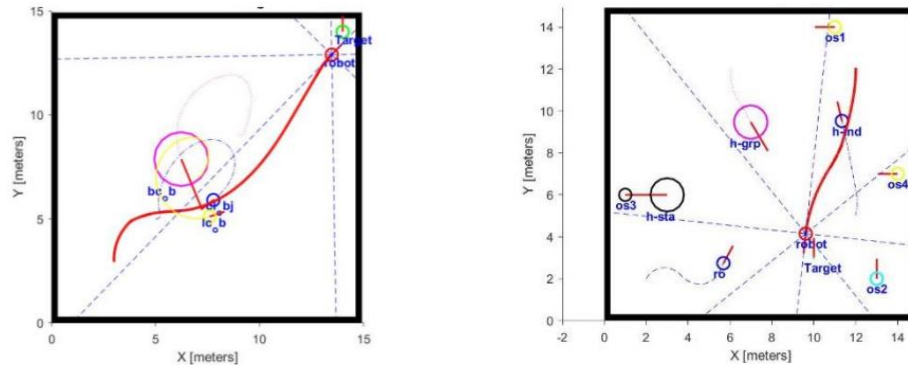
Kecepatan untuk mobile robot harus dipilih dari ruang kecepatan V dengan batasan dinamika robot untuk rintangan tunggal dan untuk banyak rintangan sebagai berikut, dan diagram alir HVO dengan penghindaran rintangan diilustrasikan pada gambar.



Gambar 2.13 Hybrid Velocity Obstacle

Diameter body mobile robot adalah 0.6 m. radius roda mobile robot adalah 0.15m. kecepatan linier robot yang diinginkan adalah 1.0 m/s. Orang

pertama dengan diameter 1.8 m, dengan kecepatan 0.3 m/s. Mobile robot agen kedua berdiameter 0.9 m, dengan kecepatan 0.15m/s.



Gambar 2.14 hasil Simulasi

Tabel 1. Perbandingan hasil simulasi menggunakan 5 metode pengidaran

Simulation	Number of Obstacles	Modality of Moving Objects	Proximity Index (PI)				
			APF	VFH	VO	HRVO	HVO
Scenario 1	3	<ul style="list-style-type: none"> 1st Moving object with cloverleaf path 2nd Moving object with little circle path 3rd Moving object with big circle path 	1.14	0.63	0.37	0.44	0.14
Scenario 2	3	<ul style="list-style-type: none"> 1st Moving object represents single walking human 2nd Moving object represents group of walking human 3rd Moving object represents another mobile robot 	0.51	0.33	0.4	0.33	0.2
Average of PI			0.83	0.48	0.39	0.39	0.17

Gambar menjelaskan tentang skenario pertama dengan tujuan untuk mengkaji kemampuan mobile robot dalam menghindari objek bergerak multimodal dengan gerakan loop. Skenario kedua diimplementasikan untuk mengevaluasi kinerja mobile robot untuk menghindari objek bergerak multimodal dengan lintasan yang tidak diketahui.

Kelebihan dari penelitian ini adalah penelitian ini berhasil mengaplikasikan metode VO dan HVO dengan dua skenario yang berbeda dan model objek rintangan yang berbeda, di mana lintasan objek rintangan

diketahui tanpa memberikan informasi ke robot. Penelitian ini digunakan pada lingkungan padat. Namun dari penelitian ini masih bisa ditambahkan akselerasi dan deselerasi dan motion berhenti untuk menghindari rintangan agar robot dapat mengikuti reference path optimal yang telah di buat.

2.1.3 *Safe Interval Path Planning with Kinodynamic Constraints [5]*

Penelitian ini membahas tentang penyelesaian masalah untuk path planning ketika terdapat hambatan dinamis yang mengisi lingkungan. Metode yang diusulkan *Safe Interval Path Planning* (SIPP) yang mempertimbangkan batasan fisik, dinamik, dan kemampuan gerakan dari robot atau disebut juga dengan kendala kino dynamic. Kendala Kino Dynamic dalam penelitian ini menyangkut batasan percepatan dan deceleration yang dapat diterapkan oleh robot. Hal ini dipertimbangkan karena SIPP yang sebelumnya mengasumsikan bahwa robot dapat berhenti secara instan, padahal pada kenyataannya robot memerlukan waktu sebelum pada akhirnya berhenti total untuk mencegah tabrakan dengan obstacle bergerak.

SIPP adalah metode perencanaan lintasan pada mobile robot untuk menghindari tabrakan dengan cara menghitung interval aman, di mana interval aman adalah periode waktu untuk konfigurasi tanpa tabrakan dan jika diperpanjang satu langkah waktu maka akan terjadi tabrakan, robot dapat berada pada konfigurasi tersebut tanpa bertabrakan dengan hambatan yang ada di lingkungan disekitarnya. Urutan terbatas dari *Safe Interval* yang tidak tumpang tindih $SI(v)$ diberikan, yang merupakan urutan interval aman di mana agen dapat dikonfigurasi pada v tanpa bertabrakan dengan hambatan bergerak. Demikian pula, interval aman ditentukan untuk setiap sisi, $SI(e)$. Jika agen mengeksekusi langkah e setiap saat melangkah di luar $SI(e)$, tabrakan dengan hambatan bergerak akan terjadi.

Jalur (waktu) untuk agen, atau lintasan adalah urutan $\pi = (e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots, (e_L, t_L)$ di mana $t_i \in T$ adalah momen gerak yang ditentukan oleh tepi e_i di mulai. Minimum *cost* lintasan adalah langkah waktu ketika agen

mencapai simpul akhir, $cost(\pi) = e_L + w(e_L)$, di mana e_L adalah panjang atau ukuran jarak yang efektif dari lintasan π dan $w(e_L)$ adalah faktor pembobot dari panjang efektif e_L .

Lintasan yang layak (feasible) jika simpul target dari e_i cocok dengan simpul sumber dari $e_1 + 1$ dan $t_i + 1 \geq t_i + w(e_i)$ dengan $t_0 = 0$, dan jika $t_i + 1 > t_i + w(e_i)$, maka kecepatan dari sumber $e_i + 1$ harus 0. Lintasan yang layak juga dapat dilihat sebagai rencana yang terdiri dari gerakan dan menunggu. Di mana tindakan bergerak ditentukan oleh tepi grafik dan tindakan menunggu terjadi pada simpul di mana kecepatan agen adalah nol. Durasi aksi menunggu yang terjadi setelah aksi perpindahan ke- i dihitung sebagai $\delta = t_{i+1} - (t_i + w(e_i))$, δ adalah perbedaan interval waktu ke- $(i + 1)$ dan interval waktu ke- i .

Metode SIPP-IP

Tupel $n = (v, t)$ di mana v adalah simpul graf dan t langkah waktu. Saat memperluas sebuah node, penerus dihasilkan sebagai berikut, pertama, untuk setiap $e = (v, u)$, jika e layak, node $n_{move}(u, t + w(e))$ ditambahkan ke penerus. Jika penerus gerakan e pada waktu t menghasilkan tumbukan, node yang dihasilkan akan dibuang. Kedua, jika v **memperbolehkan menunggu**, maka node yang berkorespondensi dengan aksi menunggu seminimal mungkin durasi satu kali langkah $n_{wait} = (v, t + 1)$ jika ditambahkan ke penerus. Jika interval aman dari v tidak mencakup langkah waktu $t + 1$, simpul itu dibuang. Model perencanaan SIPP diidentifikasi sebagai $(v, [lb_j, ub_j])$, di mana $[lb_j, ub_j]$ adalah **interval aman ke- j** dari v . Untuk setiap node menyimpan waktu kedatangan paling awal, $t \in [lb_j, ub_j]$.

Karena tindakan berhenti secara instan tidak memenuhi kendala kinodynamic dan ketika tindakan menunggu tidak tersedia dalam konfigurasi manapun maka percepatan dan perlambatan harus diperkenalkan, dan variabel kecepatan harus ditambahkan ke konfigurasi agen.

- . Gerakan primitif didefinisikan sebagai berikut:

- (gerakan percepatan) Agen mulai bergerak dari sel dengan $vel = 0$ dan diakhiri dengan $vel = 1$ di sel tetangga. Biaya (durasi) adalah 2 langkah waktu.
- (gerakan seragam) Agen mulai bergerak dari sel dengan $vel = 1$ dan diakhiri dengan $vel = 1$ di sel tetangga. Biaya (durasi) adalah 1 kali langkah.
- (gerakan perlambatan) Agen mulai bergerak dari sel dengan $vel = 1$ dan diakhiri dengan $vel = 0$ di sel tetangga. Biaya (durasi) adalah 2 langkah waktu.

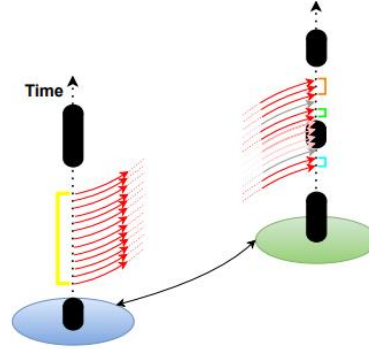
Modifikasi SIPP yang lengkap dan optimal dengan asumsi-asumsi yang telah dipertimbangkan. Peneliti mengganti interval aman sebagai **pengidentifikasi** node pencarian dengan interval waktu lain yang kami sebut sebagai “*Waiting Interval*”. Untuk setiap node pencarian, interval ini milik interval aman dari simpul grafik. *Waiting Interval* dari node pencarian menggabungkan informasi tentang semua kemungkinan tindakan menunggu dan bergerak yang dapat dilakukan pada pendahulunya.

Ketika sebuah node diperluas, interval menunggu diproyeksikan ke depan ke semua penerusnya. Sehingga informasi tentang kemungkinan tindakan menunggu dan bergerak disebarkan dari akar pohon pencarian (node awal) di sepanjang semua cabangnya. Peneliti menyebut modifikasi SIPP yang menerapkan prinsip ini sebagai *Safe Interval Path Planning with (Wait) Interval Projection* (SIPP-IP).

Proyeksi Interval

Peran operasi proyeksi adalah menyebarkan informasi pada semua tindakan tunggu dan pindah yang tersedia dari pendahulu ke penerusnya. Input untuk prosedur proyeksi adalah node pencarian SIPP-IP, $n = (v, [t_l, t_u])$, di mana $[t_l, t_u]$ berada di dalam salah satu interval aman v , dan tepi grafik $e = (v, v')$ di mana interval harus disebarkan. Outputnya adalah himpunan interval waktu $TI =$

$\{t_i = [t', t'']\}$, s.t.: setiap interval resultan milik salah satu interval aman dari simpul target: $\forall ti_k \in TI \exists si \in SI(v'): ti_k \subseteq si$.



Gambar 2.15 Proyeksi dari time Inteval di SIPP-IP

Berdasarkan gambar 2.1 Simpul grafik sumber dilambangkan dengan oval biru, simpul target ditampilkan dalam warna hijau. Silinder hitam sesuai dengan interval simpul yang diblokir. Interval waktu yang akan diproyeksikan ditandai dengan warna kuning. Interval waktu yang dihasilkan ditampilkan dalam cyan (tosca), hijau dan orange. Amati, bahwa karena adanya interval tidak aman menengah di simpul target, interval waktu yang diproyeksikan adalah: Pertama, dibagi menjadi dua (transisi merah muda yang mendarat di interval tidak aman dikesampingkan). Kedua, transisi yang mendarat di interval aman dari simpul tujuan tetapi menyebabkan tabrakan selama transisi (panah abu-abu) juga dipangkas. Dengan demikian Interval waktu yang lebih rendah dipangkas, sedangkan yang atas dibagi menjadi dua.

Algoritma berhenti ketika pada deskripsi SIPP-IP

Sebuah simpul yang sesuai dengan simpul tujuan diekstraksi dari OPEN. Pada tahap ini jalur dapat direkonstruksi. Untuk melakukannya, pada setiap iterasi lakukan hal berikut:

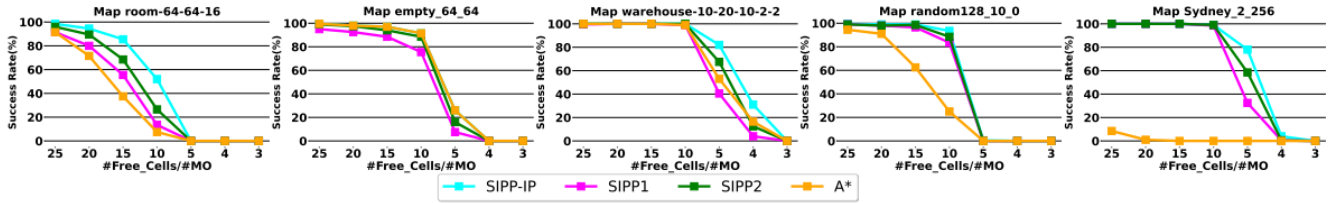
- Biarkan n menjadi simpul saat ini (awalnya ditetapkan ke simpul tujuan, n_{goal}), t – variabel waktu (awalnya sama dengan $n_{goal}.t_l$), n_{parent} – induk dari n , dan e transisi di antara mereka.

- Jika agen dapat menunggu di n , maka tambahkan tuple $(e, n, t_l - cost(e))$ ke π dan ubah $n = n_{parent}$ dan $t = n.t_l - cost(e)$.
- Jika agen tidak dapat menunggu di n , tambahkan $(e, t - cost(e))$ ke π dan ubah $n = n_{parent}$ dan $t = t - cost(e)$.
- Ini diulang sampai mencapai simpul awal. Jika nilai akhir t tidak sesuai dengan t_{start} , maka agen harus menunggu saat start (untuk $t - t_{start}$ time step).
- Lemma 1. Keadaan $A^* - TS$ (Algoritma perancangan lintasan) dengan f -value minimum dalam keadaan SIPP-IP $n_{SIPP-IP}(v, [t_l, t_u])$ adalah keadaan $n_A * -TS(v, t_l)$.
- f -value dari keadaan $A^* - TS$ sama dengan $n.t + h(n.v)$. Karena v dari semua status A^*-TS dalam satu status SIPP-IP identik, oleh karena itu nilai h keduanya sama. Akibatnya, keadaan dengan waktu minimal yaitu t_l adalah keadaan dengan f -value minimal.

Pengujian dilakukan dengan lima peta yang berbeda yaitu kosong, ruangan, gedung, acak, dan Sydney. Setiap peta diisi dengan obstacle bergerak. Lintasan dihasilkan dengan menetapkan lokasi awal dan tujuan secara acak pada mobile robot. robot atau agen dimodelkan sebagai disk dengan diameter sama dengan panjang sel grid dengan konfigurasi (x, y, θ, vel) di mana x, y adalah koordinat sel, $\theta \in \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$ adalah orientasi dan $vel \in \{0, 2\}$ adalah kecepatan agen.

Percepatan (perlambatan) primitif: bergerak dengan percepatan tetap $0,5 \frac{sel}{s^2} \left(-0,5 \frac{sel}{s^2} \right)$ dari konfigurasi dengan kecepatan nol (maksimum 2 sel/s) hingga mencapai kecepatan maksimum (nol) ke arah orientasi awal. Agen melintasi 4 sel dengan cara ini tanpa mengubah orientasinya. Gerakan seragam primitif: pergi dengan kecepatan maksimum satu sel ke depan yaitu, kecepatan awal dan akhir sama dengan 2 sel/s dan orientasinya akan sama tetapi sel akan berubah satu sesuai dengan orientasinya. Selain itu, kami mempertimbangkan rotasi di tempat dan tindakan menunggu. Jika kecepataannya nol, agen dapat berputar 90° dalam 2 detik atau menunggu satu langkah waktu. Langkah waktu dipilih menjadi 0,1 detik.

Hasil analisis runtime algoritma disajikan pada Gambar.2.19. Memang semua versi SIPP, termasuk yang lengkap – SIPP-IP, secara signifikan lebih cepat daripada A*, dan mengurangi waktu komputasi dengan dua kali lipat.

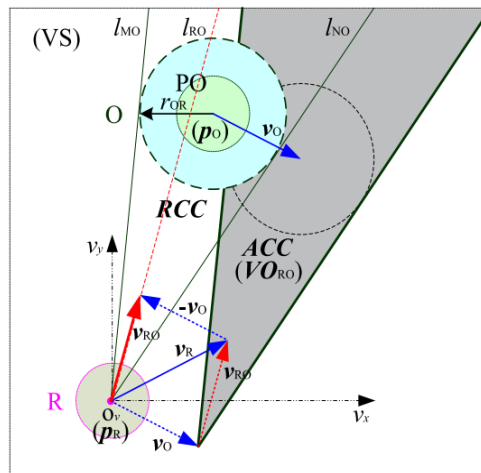


Gambar 2.16 Runtime SIPP-IP, SIPP 1 dan SIPP 2 dibandingkan dengan A*

Variasi SIPP-IP terbukti lengkap dan optimal dari algoritma SIPP terkemuka yang mampu menangani kendala kino dynamic. Penelitian ini menarik karena telah berhasil secara optimal mempertimbangkan kendala kino dynamic yang berkaitan dengan percepatan dan perlambatan yang dapat dilakukan mobile robot pada saat bergerak dengan menghitung safe interval antara robot dan obstacle bergerak penelitian ini juga menjamin lintasan dan waktu optimal untuk sampai ke goal.

2.2 Teori Dasar

Hybrid Velocity Obstacle



Gambar 2.17 Konstruksi Velocity Obstacle

kecepatan mobile robot v_r dalam ruang V yang dapat menyebabkan tabrakan antara mobile robot MR dan rintangan O dalam setiap titik waktu t antara t_0 dan Time Horizon (TH).

$$VO = \bigcup_{t=t_0}^{TH} \{v_r \in V | \exists t \in [t_0, TH], MR(t) \cap O(t) \neq \emptyset\}$$

dalam kasus penghindaran rintangan O memiliki karakteristik penghindaran yang sama dengan mobile robot Mr. RVO diformulasikan sebagai berikut:

$$RVO_o^r(v_o, v_r, a_o^r) = \bigcup_{t=t_0}^{TH} \left\{ v'_r | \frac{1}{a_o^r} v'_r + \left(1 - \frac{1}{a_o^r}\right) v_r \in VO_o^r(v_o) \right\}$$

Pergerakan manusia merupakan rintangan yang kompleks dengan arah dan kecepatan yang tidak pasti. Penelitian ini menggunakan HVRO dan NLVO yang dapat digunakan untuk non-linier objek bergerak, NLVR adalah persamaan umum dari VO dalam tujuan dan magnitude kecepatan rintangan v_o

$$NLVO = VO \Leftrightarrow \exists (t_1, t_2) \in [t_0, TH]^2 | t_1 \neq t_2 \text{ dan } v_o(t_1) \neq v_o(t_2)$$

$$HVO = \bigcup_{O \in \mathcal{O}} VO_{r|O} \cup \bigcup_{ro \in \mathcal{O}} RVO_{r|Ro} \cup \bigcup_{H \in P} NLVO_{r|h}$$

Safe Interval Path Planning

Algoritma berhenti ketika pada deskripsi SIPP-IP

Sebuah simpul yang sesuai dengan simpul tujuan diekstraksi dari OPEN. Pada tahap ini jalur dapat direkonstruksi. Untuk melakukannya, pada setiap iterasi lakukan hal berikut,

- Biarkan n menjadi simpul saat ini (awalnya ditetapkan ke simpul tujuan, n_{goal}), t – variabel waktu (awalnya sama dengan $n_{goal}.t_l$), n_{parent} – induk dari n , dan e transisi di antara mereka.
- Jika agen dapat menunggu di n , maka kita tambahkan tuple $(e, n.t_l - cost(e))$ ke π dan ubah $n = n_{parent}$ dan $t = n.t_l - cost(e)$.
- Jika agen tidak dapat menunggu di n , kita tambahkan $(e, t - cost(e))$ ke π dan ubah $n = n_{parent}$ dan $t = t - cost(e)$.

- Ini diulang sampai kita mencapai simpul awal. Jika nilai akhir t tidak sesuai dengan t_{start} , maka agen harus menunggu saat start (untuk $t - t_{start}$ time step).
- Lemma 1. Keadaan $A^* - TS$ (Algoritma perancangan lintasan) dengan f -value minimum dalam keadaan SIPP-IP $n_{SIPP-IP}(v, [t_l, t_u])$ adalah keadaan $n_A * -TS(v, t_l)$.
- f -value dari keadaan $A^* - TS$ sama dengan $n.t + h(n.v)$. Karena v dari semua status A^* -TS dalam satu status SIPP-IP identik, oleh karena itu nilai h keduanya sama. Akibatnya, keadaan dengan waktu minimal yaitu t_l adalah keadaan dengan f -value minimal.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini membahas tentang hal-hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini. dimulai dari desain *nonholonomic mobile robot*, dilanjutkan dengan penghindar rintangan menggunakan Hybrid Velocity Obstacles yang dikombinasi dengan SIPP IP, pembahasan sistem secara keseluruhan, serta membahas pengujian yang akan dilakukan.

3.1 Model Nonholonomic Mobile robot

Model dinamika dan kinematika dari nonholonomic mobile robot yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) &= B(q)\tau - A^T(q)\lambda \\
 [m \ 0 \ ma \ \sin \theta \ 0 \ m \ -ma \ \cos \theta \ ma \ \sin \theta \ -ma \ \cos \theta \ l_c \\
 + 2ma^2] \ddot{q} &+ [ma \ \dot{\theta}^2 \ \cos \theta \ ma \ \dot{\theta}^2 \ \sin \theta \ 0] \\
 &= \frac{1}{r_a} [\cos \theta \ \cos \theta \ \sin \theta \ \sin \theta \ L - L] [\tau_R \ \tau_L] \\
 &- [-\sin \theta \ \cos \theta \ -a] [-m(\dot{x}_c \dot{\theta} + \dot{y}_c \sin \theta) \dot{\theta}]
 \end{aligned}$$

Model diatas disederhanakan dengan transformasi menggunakan matriks transformasi S sehingga menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \dot{q} &= Sv \\
 S^T M S \dot{v} + S^T (M \dot{S} + V_m S) v + F + \tau_d &= S^T B \tau \\
 \underline{M} \dot{v} + \underline{V}_m v &= \underline{B} \tau
 \end{aligned}$$

dengan,

$$\begin{aligned}
 S &= [\cos \theta \ -a \sin \theta \ \sin \theta \ -a \cos \theta \ 0 \ 1], \\
 q &= [x_c \ y_c \ \theta] \\
 v &= [v \ \omega] = [v_1 \ v_2]
 \end{aligned}$$

sehingga hasil penyederhanaan kinematika sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 [\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{\theta}] &= [\cos \theta \ -a \sin \theta \ \sin \theta \ -a \cos \theta \ 0 \ 1] [v \ \omega] \\
 &+ [\delta_x \ \delta_y \ 0]
 \end{aligned}$$

Tabel 3.1 Parameter Sistem

Parameter	Simbol	Nilai
Massa	m	62
Jarak poros roda ke poros putar robot	a	0,00001
Inersia total	l	1,24
Jari-jari roda	R_a	0.1
Setengah dari Lebar robot	L	0.2

3.2 Model Objek Rintangan Dinamis

Penelitian ini menggunakan beberapa tipe rintangan. Rintangan tipe pertama berupa objek statis berupa dinding, pintu, meja dan semua objek yang tidak bergerak dalam ruangan kantor. Tipe kedua dapat dijumpai dalam situasi saat manusia berinteraksi dengan objek statis, seperti seorang manusia sedang membawa barang atau sedang membaca pengumuman di papan pengumuman. Tipe ketiga berupa mobile robot lain yang beroperasi di lingkungan kerja yang sama dengan robot MR. tipe rintangan yang terakhir adalah berupa individu manusia atau kelompok manusia yang bergerak dengan kecepatan berubah-ubah dan dengan lintasan nonlinier.

Individu manusia dapat dinyatakan menggunakan informasi pose dalam koordinat $X - Y[x_{hi}, y_{hi}, \psi_{hi}]^T$, kecepatan v_{hi} , percepatan a_{hi} dan radius tubuh dari individu manusia ke- i^{th} dinotasikan dengan r_{hi} yang dapat dipengaruhi oleh jangkauan tangan atau alat bantu jalan dapat diformulasikan sebagai berikut,

$$S_{hi} = (x_{hi}, y_{hi}, \psi_{hi}, v_{hi}, a_{hi}, r_{hi})^T$$

Objek bergerak multi modalitas merupakan rintangan yang bergerak dengan lintasan nonlinier. Rintangan dalam lingkungan perkantoran, rumah sakit atau kampus dapat terdiri dari manusia yang bergerak dengan beberapa modalitas seperti berjalan, berlari atau dengan bantuan alat seperti tongkat atau kursi roda. Interaksi ini membentuk state sebagai berikut,

$$S_{h-som} = [x_{h-som}, y_{h-som}, r_{h-som}]^T$$

dengan (x_{h-som}, y_{h-som}) merepresentasikan titik pusat ke- m dari area HOI. Sedangkan radius dari area ini dinotasikan sebagai r_{h-som} . Titik pusat dan radius dari area HOI dapat dihitung sebagai berikut,

$$(x_{h-so_m}, y_{h-so_m}) = x_{so}, y_{so}$$

$$r_{h-so_m} = \sqrt{(x_{so} - x_h)^2 + (y_{so} - y_h)^2}$$

Interaksi sosial antara manusia dalam kondisi tidak bergerak membentuk formasi tetap maka (*face-to-face formation*) yang dikenal dengan F-Formation diilustrasikan pada gambar Geometri dari pergerakan manusia didekati dengan model nonholonomic sebagaimana dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$[\dot{x}_h \dot{y}_h \psi_h] = [\cos \cos \psi_h \ 0 \ \sin \sin \psi_h \ 0 \ 0 \ 1][v_h \ \omega_h]$$

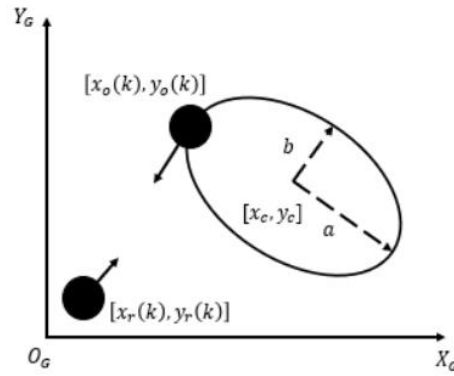
dengan kecepatan gerak manusia dinyatakan sebagai $v_h = [v_h \ \omega_h]^T$. posisi dan orientasi (pose) dari titik tengah bahu manusia dilambangkan dengan $[x_h, y_h, \psi_h]^T$ sebagai representasi dari manusia dalam koordinat global. Persamaan ini dapat menyusun transisi konfigurasi manusia dari koordinat tubuh ke global.

Gerakan kelompok manusia dapat dimodelkan dengan diasumsikan kelompok manusia model lintasan nonlinier objek rintangan bergerak multimodalitas. Gerakan dengan pengulangan terdiri dari gerakan objek dengan lintasan oval (ellipse), daun semanggi (cloverleaf) dan Lissajous. Lintasan oval diekspresikan sebagai berikut.

$$x_o(k) = x_c + a \cos(k\omega_0 T) \cos(k\omega_0 T) - b \sin \sin(k\omega_0 T) \sin \sin(k\omega_0 T)$$

$$y_o(k) = y_c + a \cos(k\omega_0 T) \sin(k\omega_0 T) + b \sin \sin(k\omega_0 T) \cos \cos(k\omega_0 T)$$

Titik pusat dari lintasan oval dinyatakan dengan x_c dan y_c dari titik pusat oval, $k = 0, 1, 2, \dots$, sedangkan ω_0 adalah kecepatan angular dari objek., dan T waktu sampling. Gambar 3.2 representasi dari sebuah objek dengan lintasan oval.



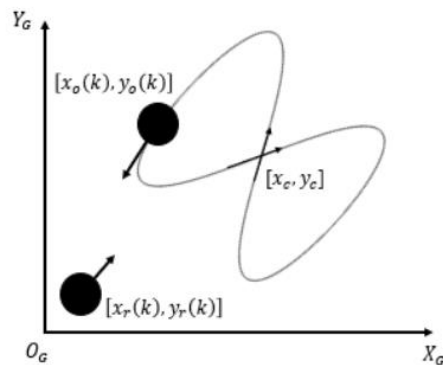
Gambar 3.1 Objek bergerak dengan lintasan oval

Objek yang bergerak dengan pola lintasan berulang terdapat pada objek dengan lintasan *Lissajous* sebagaimana dapat dilihat pada gambar 3.4 Lintasan *Lissajous* dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$x_o(k) = x_c + a \sin \sin(k\omega_0 T)$$

$$y_o(k) = y_c + a(k\omega_0 T)$$

Titik pusat dari lintasan oval dinyatakan dengan x_c dan y_c dengan amplitudo a , $k = 0, 1, 2, \dots$ sedangkan ω_0 adalah kecepatan angular dari objek, dan T waktu sampling. Gerakan tanpa perulangan terdiri dari beberapa lintasan nonlinier.



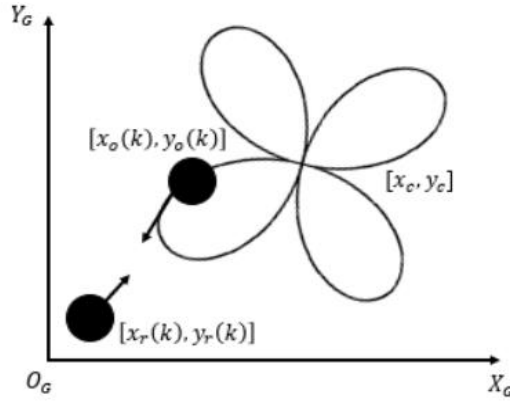
Gambar 3.2 Objek bergerak dengan lintasan Lissajous

Lintasan terakhir adalah lintasan *cloverleaf* sama seperti *Lissajous* menghasilkan lintasan berulang pada objek bergerak yang diilustrasikan pada gambar 3.5 sehingga dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$x_o(k) = x_c + a \sin(k\omega_0 T) \cos \cos(2k\omega_0 T)$$

$$y_o(k) = y_c + a \cos(k\omega_0 T) \cos \cos(2k\omega_0 T)$$

Titik pusat dari lintasan oval dinyatakan dengan x_c dan y_c dengan amplitudo a , $k = 0, 1, 2, \dots$ sedangkan ω_0 adalah kecepatan angular dari objek, dan T waktu sampling.



Gambar 3.3 Objek bergerak dengan lintasan Cloverleaf

Ketiga bentuk lintasan ini dihasilkan dengan merencanakan perencanaan jalur Probabilis Road Maps (PRM). Bentuk rintangan sosial manusia berbentuk lingkaran, sedangkan agen robot lain memiliki dimensi lain agar robot dapat memprediksi dengan berbagai bentuk rintangan.

3.3 Algoritma Safe Interval Path Planning Interval Projection (SIPP-IP)

Algoritma berhenti ketika pada deskripsi SIPP-IP

Sebuah simpul yang sesuai dengan simpul tujuan diekstraksi dari OPEN. Pada tahap ini jalur dapat direkonstruksi. Untuk melakukannya, pada setiap iterasi lakukan hal berikut,

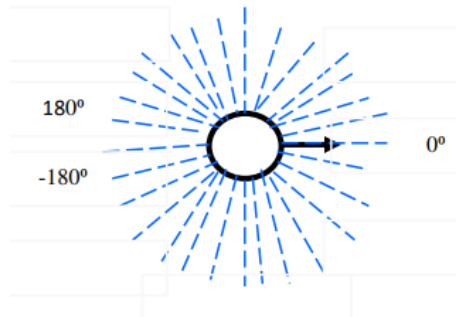
- Biarkan n menjadi simpul saat ini (awalnya ditetapkan ke simpul tujuan, n_{goal}), t – variabel waktu (awalnya sama dengan $n_{goal}.t_l$), n_{parent} – induk dari n , dan e transisi di antara mereka.
- Jika agen dapat menunggu di n , maka kita tambahkan tuple $(e, n, t_l - cost(e))$ ke π dan ubah $n = n_{parent}$ dan $t = n.t_l - cost(e)$.
- Jika agen tidak dapat menunggu di n , kita tambahkan $(e, t - cost(e))$ ke π dan ubah $n = n_{parent}$ dan $t = t - cost(e)$.

- Ini diulang sampai kita mencapai simpul awal. Jika nilai akhir t tidak sesuai dengan t_{start} , maka agen harus menunggu saat start (untuk $t - t_{start}$ time step).
- Lemma 1. Keadaan $A^* - TS$ (Algoritma perancangan lintasan) dengan f -value minimum dalam keadaan SIPP-IP $n_{SIPP-IP}(v, [t_l, t_u])$ adalah keadaan $n_A * -TS(v, t_l)$.
- f -value dari keadaan $A^* - TS$ sama dengan $n.t + h(n.v)$. Karena v dari semua status A^*-TS dalam satu status SIPP-IP identik, oleh karena itu nilai h keduanya sama. Akibatnya, keadaan dengan waktu minimal yaitu t_l adalah keadaan dengan f -value minimal.

3.4 Sensor LIDAR

Mobile robot dalam penelitian disertasi ini dilengkapi dengan simulasi LIDAR (light detection and ranging) scan. Sensor ini memiliki jangkauan penginderaan maksimal 20 m. Penginderaan Bidang pandang horizontal adalah 360° dengan resolusi 12° sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.14. Hasil penginderaan berupa pembacaan jarak d_s yang diukur dari sensor hingga ke objek yang ada di sekitar robot.

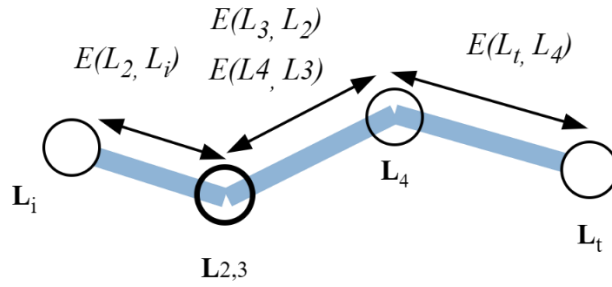
Penentu perintah kecepatan memilih untuk mengaktifkan salah satu dari dua metode antara lintasan dan penghindaran benturan untuk menghasilkan kecepatan yang tepat menggunakan metode yang diusulkan. Proses penentuan perintah kecepatan didasarkan pada hasil pembacaan lidar d_s pada objek yang berada di sekeliling robot. Penghindaran benturan akan diaktifkan saat jarak hasil pembacaan LIDAR d_s kurang dari jarak waspada d_a .



Gambar 3.4 Gambar Konfigurasi sudut Pemindaian LIDAR

3.5 Objective Fuction untuk Jalur Terpendek (Shortest Path)

Secara global jalur dihasilkan menggunakan Probability Road Map (PRM). Setelah jalur dibuat menggunakan PRM, robot akan men-*track* jalur tersebut hingga sampai ke target. PRM akan menghasilkan jalur terpendek dengan menghubungkan beberapa node acak dari awal ke target yang tidak terhubung dengan halangan statis berdasarkan peta lingkungan. Jalur dibangun menggunakan fungsi tujuan sebagai berikut:



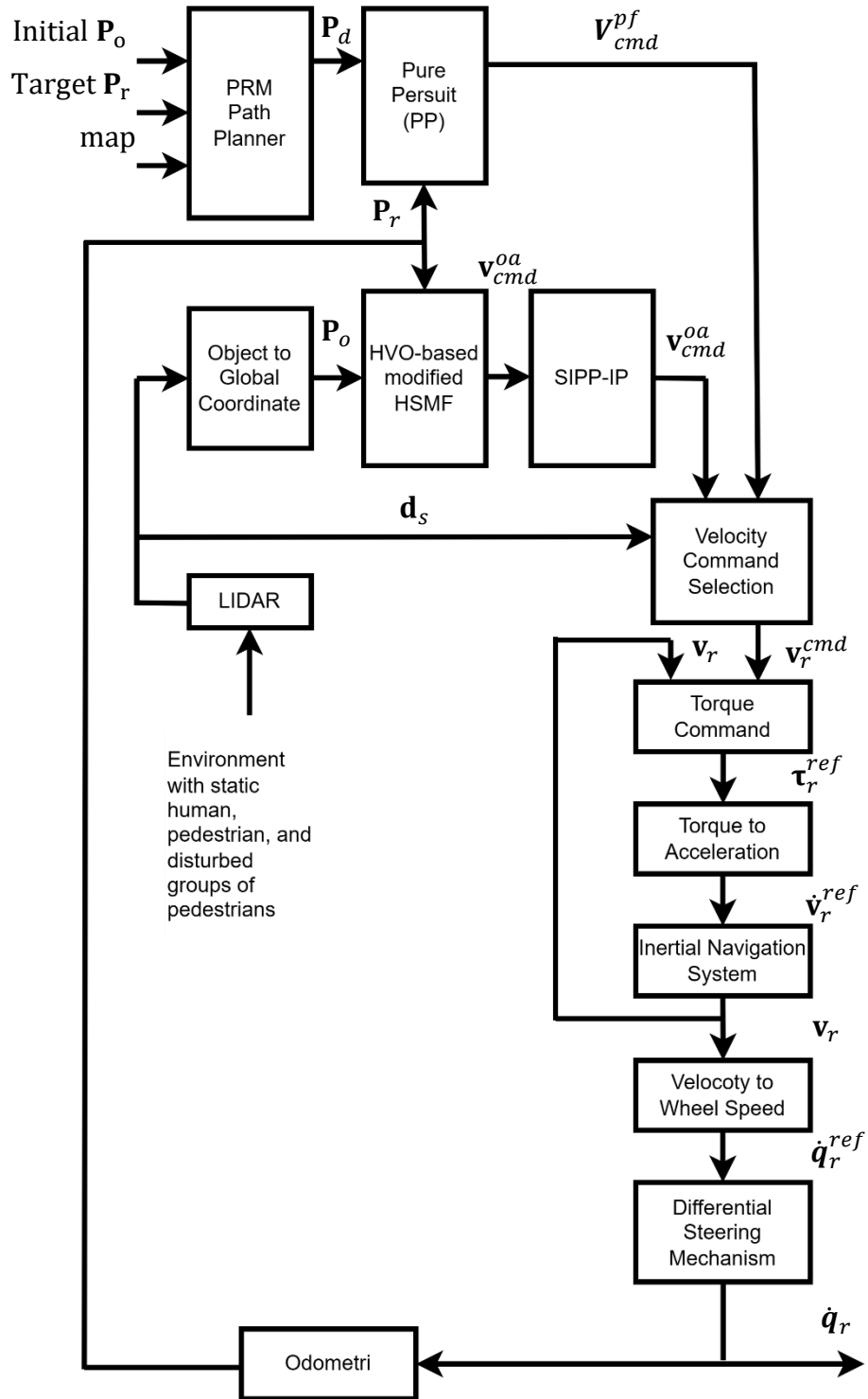
Gambar 3.5 Implementasi fungsi tujuan pada Jalur

$$J(L) = \sum_{j=1}^{n-1} E_j \quad (3.12)$$

di mana E adalah Jarak Euclidean yang mengukur total panjang jalur dari setiap pasangan lokasi berturut-turut dari awal L_i ke target L_t dari node acak seperti yang ilustrasikan pada gambar 3.6.

Jarak antar L akan diukur sesuai dengan skenario yang direncanakan. Ketika tidak ada hambatan dinamis yang bergerak melewati jalur yang dibangun maka robot bergerak dengan kecepatan maksimum hingga sampai ke target, namun jika terdapat hambatan dinamis yang bergerak melewati jalur yang dilalui oleh robot maka robot mengurangi kecepatan pada dua langkah waktu hingga akhirnya berhenti sesaat. Pada saat robot berhenti, jarak antara dua L akan berhimpit pada interval waktu tertentu, seperti $E(L_3, L_2)$ yang berhimpit seperti yang terlihat pada gambar 3.6 sehingga selisih jarak antara keduanya sama dengan nol.

3.6 Skema Keseluruhan Sistem



Gambar 3.6 Skema Keseluruhan

3.7 Hipotesis Penelitian

1. Metode HVO dengan strategi SIPP-IP dapat digunakan sebagai metode penghindaran tantangan bagi mobile robot dengan cara mengurangi kecepatan dan berhenti sesaat.
2. Metode HVO dengan strategi SIPP-IP dapat digunakan untuk menghindari rintangan multi modalitas yang beroperasi di lingkungan kerja dengan tetap menjaga keamanan dan kenyamanan manusia disekitar.

3.8 Rancangan Pengujian

Pengujian dilakukan untuk membuktikan hipotesis yang telah dibuat

1. Pengujian dengan skenario penghindaran rintangan bergerak berupa mobile robo lain
2. Pengujian dengan skenario penghindaran rintangan bergerak berupa manusia dengan bentuk lintasan yang berbeda-beda
3. Pengujian dengan skenario penghindaran rintangan berupa interaksi manusia dengan objek statis, kelompok manusia berjalan, individu manusia berjalan dan mobile robot tunggal dengan kecepatan dua kali lebih cepat dari mobile robot MR.

3.9 Kriteria Pengujian

1. Memastikan dari hasil simulasi bahwa mobile robot dapat menghindari rintangan dengan berhenti sesaat dengan bertahan tetap di path optimal yang telah dirancang
2. Memastikan bahwa mobile robot dapat menjaga keamanan dan kenyamanan manusia disekitar sambil berhenti sesaat saat potensi tabrakan dengan obstacle lain terdeteksi.

BAB 4

RENCANA DAN JADWAL KEGIATAN

4.1 Jadwal Kegiatan

Rencana jadwal kegiatan penelitian selama kurang lebih satu semester ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perancangan Jadwal Kegiatan

No.	Kegiatan	Bulan					Target yang ingin dicapai
		Agu	Sep	Okt	Nov	Des	
1	Studi literatur						Mempelajari penelitian sebelumnya dan memahami landasan teori yang berkaitan dengan penelitian
2	Perancangan awal sistem						Validasi model Mobile Robot, pembuatan lingkungan, dan perancangan algoritma
3	Perancangan sistem akhir dan pengujian						Penerapan dan melakukan pengujian terhadap algoritma
4	Analisa dan tinjauan ulang						Melakukan analisa terhadap hasil.
5	Penyusunan laporan akhir						Mendeskripsikan hasil penelitian secara sistematis dan jelas untuk penguji
6	Konsultasi dengan dosen pembimbing						Melakukan diskusi kemajuan, memperoleh masukan, koreksi, dan pemecahan masalah

Tabel 4.1

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Loganathan and N. S. Ahmad, “A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 40. Elsevier B.V., Apr. 01, 2023. doi: 10.1016/j.jestch.2023.101343.
- [2] A. Muhammad, M. A. H. Ali, and I. H. Shanono, “A review: On intelligent mobile robot path planning techniques,” in *ISCAIE 2021 - IEEE 11th Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2021, pp. 53–58. doi: 10.1109/ISCAIE51753.2021.9431819.
- [3] M. A. Alimi *et al.*, “OBSTACLE AVOIDANCE SYSTEM FOR AUTONOMOUS MOBILE: A REVIEW ARTICLE INFO ABSTRACT,” 2023.
- [4] M. Fuad, T. Agustinah, and D. Purwanto, “Modified Headed Social Force Model Based on Hybrid Velocity Obstacles for Mobile Robot to Avoid Disturbed Groups of Pedestrians,” *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 222–241, Jun. 2021, doi: 10.22266/ijies2021.0630.20.
- [5] Z. A. Ali and K. Yakovlev, “Safe Interval Path Planning With Kinodynamic Constraints.”
- [6] K. S. Yakovlev, A. A. Andreychuk, J. S. Belinskaya, and D. A. Makarov, “Safe Interval Path Planning and Flatness-Based Control for Navigation of a Mobile Robot among Static and Dynamic Obstacles,” *Automation and Remote Control*, vol. 83, no. 6, pp. 903–918, Jun. 2022, doi: 10.1134/S000511792206008X.
- [7] K. Kasaura, M. Nishimura, and R. Yonetani, “Prioritized Safe Interval Path Planning for Multi-Agent Pathfinding With Continuous Time on 2D Roadmaps,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 10494–10501, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3187265.
- [8] Z. Ren, S. Rathinam, M. Likhachev, and H. Choset, “Multi-Objective Safe-Interval Path Planning With Dynamic Obstacles,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 3, pp. 8154–8161, Jul. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3187270.
- [9] M. Fuad, T. Agustinah, and D. Purwanto, “Collision avoidance of multi modal moving objects for mobile robot using hybrid velocity obstacles,” *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 407–421, 2020, doi: 10.22266/IJIES2020.0630.37.