



DISERTASI - EE186602

**KONTROL STRATEGIS
PADA KOOPERATIF MULTI-AGEN
PENCARIAN SUMBER BERGERAK
DENGAN PENGHINDARAN RINTANGAN**

MOCHAMMAD SAHAL
NRP 07111660010001

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
Prof. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

PROGRAM DOKTOR
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2023

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Doktor (Dr)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MOCHAMMAD SAHAL
NRP: 07111660010001

Tanggal Ujian: 29 Juli 2023
Periode Wisuda: September 2023

Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
NIP: 1959 0219 1986 1010 01



2. Prof. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.
NIP: 1968 0812 1994 0320 01



Penguji:

1. Prof. Dr. Ir. Mohammad Nuh, DEA
NIP: 1959 0617 1984 0310 02



2. Dr. Ir. Ari Santoso, DEA
NIP: 1966 0218 1991 0210 01



3. Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 1974 1203 2000 1210 01



Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

04/08/23

Dedet Candura Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 1973 1119 2000 0310 01

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Disertasi saya dengan judul “KONTROL STRATEGIS PADA KOPERATIF MULTI AGEN PENCARIAN SUMBER BERGERAK DENGAN PENGHINDARAN RINTANGAN” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2023



MOCHAMMAD SAHAL
NRP. 07111660010001

KONTROL STRATEGIS PADA KOOPERATIF MULTI-AGEN PENCARIAN SUMBER BERGERAK DENGAN PENGHINDARAN RINTANGAN

Nama mahasiswa : Mochammad Sahal
NRP : 07111660010001
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
2. Prof. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

ABSTRAK

Permasalahan eksplorasi dan penanggulangan bencana khususnya pencarian sumber bencana telah dilakukan oleh para peneliti, khususnya terkait permasalahan konsensus pada model multi-agen integrator tunggal. Permasalahan konsensus pada umumnya dikembangkan dengan (tanpa) perubahan topologi dengan beberapa kasus yang mungkin, seperti graf berarah dengan topologi tetap, graf berarah dengan perubahan topologi, dan graf tidak berarah dengan topologi tetap dan waktu tunda komunikasi. Pencarian sumber diam menggunakan konsensus gradien pada kooperatif multi-agen model integrator tunggal juga telah banyak dikembangkan dengan menggunakan kontrol formasi untuk menjaga perhitungan konsensus gradien tetap akurat. Selain itu, telah dikembangkan juga metode *virtual artificial potential field (VAPF)* yang digunakan untuk penghindaran rintangan diam dalam proses pencarian sumber bencana dimana posisi target diketahui.

Disertasi ini mengusulkan solusi pencarian sumber bergerak berbasis kooperatif multi-agen dengan kontrol strategis, yaitu kombinasi kontrol kecepatan terdistribusi dan penghindaran rintangan. Dalam skema kontrol ini, suatu agen berkomunikasi dengan agen yang lain menggunakan topologi komunikasi untuk berkoordinasi dalam menemukan sumber. Sumber atau target pencarian dinyatakan dalam medan skalar. Dalam disertasi ini digunakan sumber bergerak secara linier atau sinusoidal dari titik awal ke titik akhir, dan sumber bergerak ini juga bisa mengembang dan menyempit. Keberadaan rintangan direpresentasikan dalam medan potensial buatan. Rintangan yang perlu dihindari oleh kooperatif multi-agen adalah rintangan diam dan bergerak. Agen dimodelkan dengan integrator ganda yang memiliki dinamika lebih kaya dibandingkan dengan model integrator tunggal. Kooperatif multi-agen integrator ganda dimodelkan dalam model state terintegrasi. Representasi ini menghasilkan informasi state semua agen secara simultan. Sinyal kontrol kooperatif multi-agen terdiri dari kontrol formasi, kontrol kecepatan terdistribusi, dan penghindaran rintangan. Kontrol formasi digunakan untuk memastikan bahwa agen tetap dalam formasi yang diinginkan selama manuver, agar perhitungan estimasi gradien dan konsensus gradien tetap akurat. Kontrol kecepatan terdistribusi merupakan kecepatan konsensus gradien yang dihasilkan

dari estimasi gradien. Sedangkan metode penghindaran rintangan yang diusulkan dengan *Modified Artificial Potential Field*. Aturan kontrol strategis diusulkan untuk menjaga formasi, menentukan kecepatan masing-masing agen serta melacak sumber bergerak sambil menghindari rintangan bergerak. Perancangan kontrol strategis merupakan kombinasi kontrol kecepatan terdistribusi dan penghindaran rintangan, sedangkan kontrol formasi terintegrasi dalam kontrol kecepatan terdistribusi.

Simulasi eksperimen pada disertasi ini menggunakan *Object-Oriented Programming – MATLAB*, yang meliputi perhitungan estimasi gradien, konsensus gradien, dan *view* manuver kooperatif multi-agen yang berinteraksi dengan sumber dan rintangan bergerak. Perhitungan estimasi gradien dan konsensus gradien merupakan perhitungan dari berbagi informasi posisi dan pengukuran intensitas sumber secara simultan antar satu agen dengan agen yang lain. Eksperimen yang dilakukan dalam disertasi ini merupakan kontrol strategis pencarian sumber bergerak linier dengan: a) penghindaran tiga rintangan diam, b) tiga rintangan diam dengan penyusutan formasi, dan c) dua rintangan diam-satu rintangan bergerak dengan penyusutan formasi. Dalam ketiga eksperimen tersebut, dibandingkan penghindaran rintangan menggunakan *Modified Artificial Potential Field* dan *Virtual Artificial Potential Field*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kooperatif multi-agen dapat mencari sumber bergerak dengan rintangan diam dan bergerak. Metode *MAPF*, kooperatif multi-agen dapat menemukan sumber dengan waktu pencarian yang lebih cepat dari *VAPF*, yakni 62,8 detik untuk eksperimen tiga rintangan diam dengan penyusutan formasi, dan 90 detik untuk eksperimen dua rintangan diam-satu rintangan bergerak dengan penyusutan formasi. Sebaliknya metode *VAPF*, kooperatif multi-agen dapat menemukan sumber dengan waktu pencarian lebih cepat dari *MAPF*, yakni 61,7 detik untuk eksperimen penghindaran tiga rintangan diam. Metode *MAPF* yang diusulkan lebih baik dibandingkan dengan metode *VAPF*, untuk eksperimen tiga rintangan diam dengan penyusutan formasi, dan eksperimen dua rintangan diam-satu rintangan bergerak dengan penyusutan formasi.

Kata kunci: kontrol strategis, kooperatif multi-agen, pencarian sumber bergerak, kontrol formasi, estimasi gradien, konsensus gradien, penghindaran rintangan.

STRATEGIC CONTROL IN COOPERATIVE MULTI-AGENT MOVING SOURCE SEEKING WITH OBSTACLE AVOIDANCE

Nama mahasiswa : Mochammad Sahal
NRP : 07111660010001
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
2. Prof. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.

ABSTRACT

The problem of exploration and disaster mitigation, especially the disaster sources seeking, has been carried out by researchers, especially regarding consensus issues in a single integrator multi-agent model. Consensus problems are generally developed with (without) a topology change with several possible cases, such as directed graphs with a fixed topology, directed graphs with switching topology, and undirected graphs with a fixed topology and communication delay. Stationary source seeking using gradient consensus in a cooperative multi-agent single integrator model has also been extensively developed using formation controls to keep gradient consensus calculations accurate. In addition, a virtual artificial potential field (VAPF) method has also been developed which is used to avoid stationary obstacles in the process of finding the source of a disaster where the position of the target is known.

This dissertation proposes a cooperative multi-agent-based moving source seeking solution with strategic control, namely a combination of distributed speed control and obstacle avoidance. In this control scheme, an agent communicates with other agents using a communication topology to coordinate source seeking. The source seeking or target is expressed in a scalar field. In this dissertation a moving source is used linearly or sinusoidally from the starting point to the ending point, and this moving source can also expand and contract. The presence of obstacles is represented in an artificial potential field. The obstacles that multi-agent cooperatives need to avoid are stationary and moving obstacles. The agent is modeled with double integrator which have richer dynamics compared to the single integrator model. Double integrator cooperative multi-agent is modeled in integrated state model. This representation generates state information for all agents simultaneously. The cooperative multi-agent control signal consists of formation control, distributed speed control and obstacle avoidance. Formation control is used to ensure that agents remain in the desired formation during maneuvers, so that gradient estimation and gradient consensus calculations remain accurate. Distributed speed control is a consensus gradient speed resulting from gradient estimation. While the obstacle avoidance method proposed is the Modified Artificial Potential Field. Strategic control rules are proposed to maintain formations, determine each agent's speed as well as track moving resources while avoiding moving obstacles. Strategic control design is a combination of distributed

speed control and obstacle avoidance, while formation control is integrated in distributed speed control.

The experimental simulation in this dissertation uses Object-Oriented Programming – MATLAB, which includes calculations of gradient estimation, gradient consensus, and view of multi-agent cooperative maneuvers that interact with moving sources and obstacles. Calculation of gradient estimation and gradient consensus is a calculation of sharing position information and measuring source intensity simultaneously between one agent and another. Experiments carried out in this dissertation are strategic control of linear search for moving resources by: a) avoiding three stationary obstacles, b) three stationary obstacles with formation shrinkage, and c) two stationary obstacles-one moving obstacle with formation shrinkage. In these three experiments, obstacle avoidance was compared using the Modified Artificial Potential Field (MAPF) and the Virtual Artificial Potential Field (VAPF). The simulation results show that cooperative multi-agent can search for moving sources with stationary and moving obstacles. The MAPF method, multi-agent cooperatives can find resources with a faster search time than VAPF, namely 62.8 seconds for the three stationary obstacles experiment with formation shrinkage, and 90 seconds for the two stationary obstacles-one moving obstacle experiment with formation shrinkage. In contrast, the VAPF method, cooperative multi-agent can find sources with a search time that is faster than MAPF, which is 61.7 seconds for the three stationary obstacle avoidance experiment. The proposed MAPF method is better than the VAPF method, for the experiment of three stationary barriers with formation shrinkage, and the experiment of two stationary obstacles-one moving obstacle with formation shrinkage.

Keywords: Strategic control, cooperative multi-agent, moving source seeking, formation control, gradient estimation, gradient consensus, obstacle avoidance.

KATA PENGANTAR

Dengan Nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puja dan puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan, sehingga penulisan disertasi dengan judul “KONTROL STRATEGIS PADA KOPERATIF MULTI AGEN PENCARIAN SUMBER BERGERAK DENGAN PENGHINDARAN RINTANGAN” dapat diselesaikan dengan baik. Buku disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Doktor (Dr.) pada Program Doktor Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis sampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

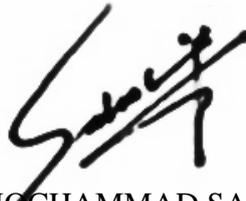
1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng., selaku Promotor yang telah memberikan bimbingan, perhatian, ide, arahan, kesabaran, dan pendorong semangat dalam menyelesaikan studi ini.
2. Prof. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T., selaku Co-Promotor yang telah banyak meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, perhatian, ide, arahan, kesabaran, & pendorong semangat dalam menyelesaikan studi ini.
3. Prof. Dr. Ir. Mohammad Nuh, DEA, Dr. Ir. Ari Santoso, DEA, dan Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D., selaku tim Penguji atas saran dan masukannya.
4. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro, dan Ronny Mardiyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Program Pascasarjana Departemen Teknik Elektro.
5. Kedua Orangtua saya (Almh) Hj. Ulfah Sahal Mansyur dan (Alm) K.H. Abdus Syakur Thawil, serta ibu mertua saya ibu Choiriyah yang telah memberi dukungan moral dan spritual demi keberhasilan penulis.
6. Istriku tercinta Ulifah Fuadah yang dengan setia dan sabar dalam memberikan perhatian, dukungan, dan pengorbanan waktunya. Begitu juga kepada keempat anak-anakku tersayang yaitu Zuyyina Luthfah Sahal, Muhammad Usama Sahal, Najwa Adiva Sahal, dan Annisabella Fahima Sahal yang memberi motivasi dan semangat kepada penulis.

7. Segenap kolega di AJ204 laboratorium Sistem dan Sibernetika dan di AJ104 laboratorium Kontrol dan Otomasi ITS, khususnya Mochamad Nur Qomarudin, S.T., M.T., dan Yurid Eka Nugraha, S.T., M.Eng., Ph.D.
8. Teman mahasiswa S3, Dr. Muhammad Fuad, S.Kom., M.T. yang telah banyak berbagi pengalaman bagi penulis pada saat menyelesaikan S3.
9. Dewi Kartika, Yishar Kriswandono, S.Si. selaku Administrasi Akademik Pascasarjana Departemen Teknik Elektro, FTEIC-ITS. Dan semua pihak yang telah membantu selama penulis menempuh studi pada Program Doktor ITS.

Semoga Allah SWT membalas seluruh amal dan kebaikan Bapak dan Ibu semua, serta selalu melimpahkan karunia dan kasih sayangNya kepada kita semua, Aamiin Ya Rabbal'alaamiin.

Surabaya, Juli 2023

Penulis,



MOCHAMMAD SAHAL
NRP. 07111660010001

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvii
DAFTAR SIMBOL DAN DESKRIPSI.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Posisi dan Peta Jalan Penelitian	4
1.6 Kontribusi Penelitian	9
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	11
2.1 Kontrol Kooperatif Multi-Agen.....	11
2.2 Perubahan Topologi dan Waktu-Tunda	15
2.3 Konsensus Jaringan Sensor.....	17
2.4 Perbandingan Estimasi Gradien.....	19
2.5 Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber	21
2.6 Medan Potensial Buatan	25
BAB 3 KONTROL STRATEGIS PENCARIAN SUMBER BERGERAK.....	35
3.1 Perubahan Topologi dan Formasi Pencarian Sumber.....	35
3.1.1 Deskripsi Masalah.....	35
3.1.2 Teori Graf.....	36
3.1.3 Sumber Diam	36

3.1.4	Perubahan Formasi dan Topologi.....	37
3.1.5	Formasi Berbasis Konsensus dan Kontrol Formasi.....	38
3.2	Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak.....	40
3.2.1	Deskripsi Masalah.....	41
3.2.2	Sumber Bergerak.....	43
3.2.3	Kooperatif Multi-Agen.....	46
3.2.4	Estimasi Gradien dan Konsensus Gradien.....	46
3.2.5	Kontrol Kecepatan Terdistribusi untuk Mencari Sumber Bergerak...	47
3.3	Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Dengan Penghindaran Rintangan.....	49
3.3.1	Sumber Bergerak Linier.....	49
3.3.2	Estimasi Gradien dan Konsensus Gradien.....	51
3.3.3	Medan Potensi Buatan dari Rintangan.....	52
3.3.4	Kontrol Kecepatan Terdistribusi.....	54
3.3.5	Kontrol Strategis untuk Pencarian Sumber Bergerak.....	55
3.3.6	Pengujian Kontrol Strategis.....	57
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		63
4.1	Perubahan Topologi Formasi Pencarian Sumber.....	63
4.2	Kontrol Kecepatan Terdistribusi Pencarian Sumber Bergerak.....	71
4.2.1	Simulasi Pencarian Sumber Bergerak Linier.....	71
4.2.2	Simulasi Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal.....	77
4.3	Kontrol Strategis Pencarian Sumber Bergerak dengan Rintangan.....	81
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		91
5.1	Kesimpulan.....	91
5.2	Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA.....		93
BIOGRAFI PENULIS.....		99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta Jalan Penelitian Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak.....	8
Gambar 1.2 Target Kontribusi Penelitian Disertasi.....	10
Gambar 3.1 Fungsi Skalar Sumber Diam.....	37
Gambar 3.2 Perubahan Formasi dan Topologi G1, G2, G3, G4.....	38
Gambar 3.3 Diagram Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak.....	40
Gambar 3.4 Fungsi Skalar Sumber Bergerak ψ	42
Gambar 3.5 Fungsi Skalar Sumber Bergerak Linier dan Sinusoidal.....	44
Gambar 3.6 Diagram Kooperatif Multi-Agen.....	46
Gambar 3.7 Diagram Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak dengan Penghindaran Rintangan.....	50
Gambar 3.8 Diagram kontrol terdistribusi.....	54
Gambar 3.9 Formasi yang Digunakan dalam Eksperimen.....	56
Gambar 3.10 Fungsi Skalar Sumber Bergerak Linier.....	59
Gambar 3.11 Skenario Penghindaran Tiga Rintangan Tetap.....	60
Gambar 3.12 Skenario Penghindaran Tiga Rintangan Tetap dan Penyusutan Formasi.....	61
Gambar 3.13 Skenario Penghindaran Dua Rintangan Tetap, Satu Rintangan Bergerak, dan Penyusutan Formasi.....	62
Gambar 4.1 Formasi yang Digunakan dalam Simulasi.....	63
Gambar 4.2 Gradien g_x dalam Pergantian 2 Formasi.....	65
Gambar 4.3 Gradien g_y dalam Pergantian 2 Formasi.....	66
Gambar 4.4 Trayektori pada Pergantian 2 Formasi.....	66
Gambar 4.5 Trayektori Awal dan Akhir dalam Pergantian 2 Formasi.....	67
Gambar 4.6 Gradien g_x dalam Pergantian 3 Formasi.....	68
Gambar 4.7 Gradien g_y dalam Pergantian 3 Formasi.....	68
Gambar 4.8 Trayektori pada Pergantian 3 Formasi.....	69
Gambar 4.9 Gradien g_x dalam Pergantian 4 Formasi.....	69
Gambar 4.10 Gradien g_y dalam Pergantian 4 Formasi.....	70
Gambar 4.11 Trayektori pada Pergantian 4 Formasi.....	70
Gambar 4.12 Formasi yang digunakan dalam simulasi.....	73
Gambar 4.13 Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Pencarian Sumber Bergerak Linier dengan v_d bervariasi.....	73
Gambar 4.14 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan Gradien.....	74
Gambar 4.15 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan $v_d = 1.6$ m/s.....	74
Gambar 4.16 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan $v_d = 1.85$ m/s.....	75

Gambar 4.17	Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan $v_d = 2 \text{ m/s}$	75
Gambar 4.18	Jarak Agen #1 dan Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan.....	76
Gambar 4.19	Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan kecepatan v_d bervariasi	78
Gambar 4.20	Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan Gradien.....	78
Gambar 4.21	Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan $v_d = 1.8 \text{ m/s}$	79
Gambar 4.22	Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan $v_d = 1.9 \text{ m/s}$	79
Gambar 4.23	Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan $v_d = 2.2 \text{ m/s}$	80
Gambar 4.24	Jarak Agen #1 dan Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan.....	80
Gambar 4.25	Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan <i>APF</i> dimodifikasi (<i>MAPF</i>).....	82
Gambar 4.26	Jarak antara Agen #1 dan Rintangan dengan <i>APF</i> yang dimodifikasi (<i>MAPF</i>).....	82
Gambar 4.27	Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan Formasi Menyusut dan <i>MAPF</i>	83
Gambar 4.28	Jarak antara Agen #1 dan Rintangan untuk Penyusutan Formasi dan <i>MAPF</i>	83
Gambar 4.29	Trayektori Penghindaran Rintangan Bergerak dan <i>MAPF</i>	85
Gambar 4.30	Jarak antara Agen #1 dan Rintangan untuk Rintangan Bergerak dan <i>MAPF</i>	85
Gambar 4.31	Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan <i>Virtual APF</i> (<i>VAPF</i>)	86
Gambar 4.32	Jarak antara Agen #1 dan Rintangan dengan <i>Virtual APF</i> (<i>VAPF</i>) ..	86
Gambar 4.33	Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan Formasi Menyusut dan <i>Virtual APF</i>	87
Gambar 4.34	Jarak antara Agen #1 dan Rintangan dengan Formasi Menyusut dan <i>Virtual APF</i>	87
Gambar 4.35	Trayektori Penghindaran Rintangan Bergerak dengan <i>Virtual APF</i> ..	88
Gambar 4.36	Jarak antara Agen #1 dan Rintangan untuk Rintangan Bergerak dengan <i>Virtual APF</i>	88

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rangkuman Kajian Pustaka.....	33
Tabel 3.1 Parameter Fungsi Skalar Sumber Bergerak.....	44
Tabel 3.2 Parameter Pergerakan Linier dan Sinusoidal.....	45
Tabel 3.3 Parameter Penyekalaan Fungsi Skalar.....	45
Tabel 4.1 Koordinat Formasi.....	64
Tabel 4.2 Penyimpangan Maksimum gx dan gy	71
Tabel 4.3 Parameter Fungsi Skalar Sumber Bergerak.....	73
Tabel 4.4 Perbandingan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Sumber Bergerak Linier	76
Tabel 4.5 Perbandingan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal	81
Tabel 4.6 Jarak Minimum antara Agen #1 dan Tiga Rintangan dengan APF yang Dimodifikasi dan Virtual	89

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SINGKATAN

APF	<i>Artificial Potential Field</i>
FIRAS	<i>Force Inducing an Artificial Repulsion from the Surface</i>
LPV	<i>Linear Parameter-Varying</i>
LTI	<i>Linear Time-Invariant</i>
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
MAPF	<i>Modified Artificial Potential Field</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VAPF	<i>Virtual Artificial Potential Field</i>
WGN	<i>White Gaussian Noise</i>
LG	<i>Linear source seeking with Gradient velocity</i>
LD	<i>Linear source seeking with Desired velocity</i>
SG	<i>Sinusoidal source seeking with Gradient velocity</i>
SD	<i>Sinusoidal source seeking with Desired velocity</i>

DAFTAR SIMBOL DAN DESKRIPSI

$\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$	<i>Graph</i>
$\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$	<i>Vertex</i>
$E \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$	<i>Edge</i>
$\mathcal{L} \in \mathbb{R}^{N \times N}$	Matriks Laplace
$\Delta \in \mathbb{R}^{N \times N}$	Matriks <i>Degree</i>
$\mathcal{A} \in \mathbb{R}^{N \times N}$	Matriks <i>Adjacency</i>
$\mathcal{N}_i = \{i \in \mathcal{V} : a_{ij} \neq 0\}$	Tetangga agen <i>i</i>
$\mathbf{1} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathbb{R}^N$	Vektor kolom dengan nilai elemen 1
\otimes	Produk Kronecker
$I_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$	Matriks identitas
λ	<i>Eigen value</i>
ψ	Fungsi sumber skalar
\mathbf{x}	<i>State</i> agen
\mathbf{u}	<i>State</i> kontrol
\mathbf{y}	<i>State</i> pengukuran internal
\mathbf{z}	<i>State</i> pengukuran eksternal
\mathbf{v}	<i>State</i> internal
r	Posisi agen [m]
x	Posisi agen pada sumbu- x [m]
y	Posisi agen pada sumbu- y [m]
v	Kecepatan [m/s]
u	Akselerator, sinyal kontrol [m/s ²]
\mathbf{A}_m	Matriks <i>state</i> model terintegrasi
\mathbf{B}_m	Matriks kontrol model terintegrasi
\mathbf{A}_{m_i}	Matriks <i>state</i> model agen ke- i
\mathbf{B}_{m_i}	Matriks kontrol model agen ke- i
\mathbf{P}_A	Matriks <i>state</i> permutasi
\mathbf{P}_B	Matriks kontrol permutasi

P_{C1}, P_{C2}	Matriks <i>output</i> permutasi
K_A	Matriks <i>state decentralized control law K</i>
K_{B1}, K_{B2}	Matriks kontrol <i>decentralized control law K</i>
K_C	Matriks <i>output decentralized control law K</i>
K_{D1}, K_{D2}	Matriks <i>output kontrol decentralized control law K</i>
$A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$	Matriks blok pada matriks <i>A</i>
A	Matriks posisi relatif kooperatif multi-agen
b	Vektor intensitas relatif kooperatif multi-agen
\hat{g}	Estimasi gradien [m/s]
\bar{g}	Konsensus gradien [m/s]
A_1, A_2	Amplitudo eksponensial
A_s	Amplitudo sinusoidal [m]
$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$	Koordinat puncak fungsi skalar sumber [m,m]
$\sigma = [\sigma_{x_1} \sigma_{y_1} \sigma_{x_2} \sigma_{y_2}]^T$	Parameter fungsi skalar sumber
ω	Kecepatan sudut sinusoidal
α	Koefisien ekspansi dan kontraksi
β	Parameter konsensus
γ	Koefisien agen kecepatan
η	Koefisien gaya tolak
ρ	Jarak terpendek antara formasi dan rintangan [m]
ρ_0	Jarak batas pengaruh medan potensial rintangan [m]
U_{att}	Medan atraktif [N/m ²]
U_{rep}	Medan tolak yang dihasilkan rintangan [N/m ²]
F_{att}	Gaya tarik [N]
F_{rep}	Gaya tolak [N]
k_{att}	Koefisien tarik-menarik
k_{rep}	Koefisien tolak-menolak
k_{vir}	Koefisien virtual

k_f	Koefisien formasi
k_v	Koefisien kecepatan
k_p	Koefisien gaya tarik
k_r	Koefisien kontrol penolakan
D	Koefisien rintangan udara UAV
L	Koefisien gaya angkat UAV
m	Massa UAV [kg]
g	Percepatan gravitasi [m/s ²]
T	Gaya dorong mesin [N]
ψ	Sudut heading UAV [rad]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, kemajuan teknologi eksplorasi dan penyelamatan menjadi lebih menarik untuk dilakukan penelitian. Selain menjadi bidang penelitian yang sangat penting, robot otomatis, wahana tak berawak, dan segala jenis perangkat yang beroperasi secara otonom yang disebut dengan agen, merupakan isu penting untuk meningkatkan teknologi eksplorasi dan penyelamatan [1]. Salah satu implementasi agen adalah robot beroda dengan sensor pendeteksi dan alat komunikasi.

Dilengkapi dengan sensor, unit pengolahan dan aktuator, maka agen mampu beroperasi secara otonom untuk mengukur, memproses, berkomunikasi dan melaksanakan tugas. Diharapkan agen dapat sepenuhnya menggantikan manusia di lingkungan yang berbahaya dengan sumber daya yang tersedia [1]–[4]. Agen dapat digunakan untuk melokalisasi dan memantau zona bencana seperti spot api, tumpahan zat kimia, ledakan nuklir, dan lain-lain. Agen juga dapat menjalankan tugas-tugas yang lain, sehingga kesempatan luas bagi peneliti untuk melakukan studi dan penelitian pada lingkungan yang terkena bencana. Untuk menjalankan tugas-tugas ini, agen dioperasikan secara otonom dan disiapkan untuk pengukuran informasi yang dibutuhkan.

Sistem Multi-Agen adalah sistem agen otonom yang berinteraksi satu sama lain pada suatu lingkungan untuk melakukan tugas bersama [5]. Agen yang beroperasi dalam kelompok disusun sebagai sistem multi-agen. Untuk mencapai tujuan bersama, agen perlu berkumpul dan bertukar informasi melalui saluran komunikasi yang biasa disebut dengan topologi [6].

Kooperatif multi-agen adalah sejumlah agen dengan interkoneksi antar agen yang mampu mengukur informasi lokal, berkomunikasi antar agen, memroses informasi, dan mengambil keputusan untuk mencapai tujuan bersama [7]. Tantangan utama sistem kooperatif multi-agen adalah untuk mencapai perilaku kolektif yang diinginkan, salah satunya adalah kontrol formasi dan konsensus gradien [8], [9]. Kontrol formasi berfungsi untuk menjaga formasi selama manuver.

Konsensus gradien merupakan hasil dari konsensus estimasi gradien, sehingga gradien disetiap agen mempunyai nilai mendekati sama. Untuk mencapai konsensus, dirancang algoritma kontrol terdistribusi untuk kooperatif multi-agen.

Dalam disertasi ini, tiga isu penting kelanjutan dari penelitian sistem kontrol kooperatif multi-agen, yang telah diteliti oleh Rosero, E. dan H. Werner [10], [11]. Pertama, permasalahan kooperatif multi-agen dengan perubahan formasi dan topologi pada pencarian sumber. Pada penelitian ini, dilakukan eksperimen dengan melakukan perubahan empat macam formasi dan topologi. Pengaruh perubahan tersebut, terhadap kooperatif multi-agen diteliti terkait trayektori untuk mendapatkan sumber yang dicari.

Kedua, permasalahan kooperatif multi-agen mencari sumber bergerak, yakni mencari sumber bergerak pada medan skalar menggunakan beberapa agen yang bekerja sama secara kooperatif. Medan skalar mewakili intensitas yang berubah dari sumber bergerak. Diasumsikan setiap agen dibekali sensor untuk mengukur intensitas sumber pada setiap posisi dimanapun agen berada. Saat terjadi kebakaran di suatu tempat, medan skalar mewakili nilai temperatur terdistribusi pada area tersebut. Pergerakan kebakaran tersebut dapat ditimbulkan oleh pengaruh angin atau faktor alam yang lain. Untuk memecahkan masalah kooperatif multi-agen mencari sumber bergerak, digunakan algoritma estimasi gradien dan konsensus gradien terdistribusi [8], [12]. Pada disertasi ini, diusulkan algoritma kontrol kecepatan terdistribusi didasarkan pada kontrol formasi, kontrol kecepatan gradien, dan kontrol kecepatan yang diinginkan. Kontrol formasi mempertahankan agen dalam formasi geometri tertentu, dan kontrol kecepatan gradien dan kontrol kecepatan yang diinginkan mendorong agen ke sumber bencana dengan kecepatan gradien atau kecepatan yang diinginkan.

Ketiga, penelitian permasalahan kooperatif multi-agen mencari sumber bergerak dengan penghindaran rintangan yang telah dilaksanakan pada [13]–[15], yang terjadi pada zona pencarian yang terdapat rintangan berupa gedung, pohon, burung, dan lain sebagainya. Namun karena orientasi formasi telah diatur dengan kontrol terdistribusi, maka diperlukan kontrol strategis terhadap penggunaan kontrol kecepatan gradien terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan. Pada disertasi ini, diusulkan metode kontrol strategis yang merupakan kombinasi dari

kontrol kecepatan konsensus gradien terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan menggunakan *modified artificial potential field (MAPF)*. Sedangkan untuk memecahkan masalah pencarian sumber dengan penghindaran rintangan, dibuat perubahan formasi yang memenuhi situasi dari rintangan, yaitu jika ruang antar dua rintangan yang berdekatan, maka kooperatif multi-agen dapat melakukan formasi menyusut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada kebutuhan terhadap kontrol strategis pada kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan, maka pada disertasi ini merumuskan permasalahan sebagai berikut

1. Rancang bangun metode perubahan formasi dan topologi kooperatif multi-agen untuk pencarian sumber.
2. Rancang bangun metode kontrol kecepatan terdistribusi pada kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak.
3. Rancang bangun metode kontrol strategis pada kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Disertasi ini bertujuan untuk menghasilkan metode kontrol strategis yang merupakan kombinasi kontrol kecepatan gradien terdistribusi dan penghindaran rintangan untuk mencari sumber bencana yang dinamik dengan penghindaran rintangan yang bergerak.

Manfaat dari disertasi ini adalah metode kontrol strategis dapat digunakan untuk menemukan sumber bencana seperti sumber kebakaran, sumber racun, sumber nuklir, dan yang lainnya; serta dapat melacak sumber bencana yang bergerak sambil menghindari rintangan bergerak.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diusulkan pada penelitian disertasi ini adalah sebagai berikut:

1. pada perubahan formasi dan topologi secara campuran dari reguler dan acak pada kooperatif multi-agen model integrator tunggal pencarian sumber,

- dibatasi dengan perubahan 4 macam formasi dan 4 macam topologi,
2. pada sistem kontrol kooperatif mencari intensitas tertinggi dari sumber bergerak, dibatasi dengan pergerakan pada bidang-xy, model agen integrator tunggal, formasi dan topologi tetap, dan *connected graph*,
 3. pada sistem kontrol kooperatif mencari intensitas tertinggi dari sumber bergerak dan penghindaran rintangan, dibatasi dengan pergerakan pada bidang-xy, model agen integrator ganda, formasi dan topologi tetap, *connected graph*, formasi berubah menyusut khususnya terkait dengan ruang 2 rintangan yang berdekatan, 3 rintangan tersusun segitiga,
 4. tidak diberikan gangguan sensor pengukuran intensitas sebagai representasi ketidakpastian pengukuran,
 5. metode yang diusulkan diuji dengan melakukan simulasi.

1.5 Posisi dan Peta Jalan Penelitian

Dalam dekade terakhir, beberapa algoritma pencarian sumber telah dikembangkan untuk memandu satu atau lebih agen menuju sumber. Ada beberapa pendekatan berbeda untuk menangani masalah pencarian sumber. Pendekatan tersebut dapat diklasifikasikan tergantung pada jumlah agen yang digunakan, yakni pendekatan hanya untuk satu agen atau pendekatan untuk formasi multi-agen.

Pertama, dalam eksperimen konsep pencarian sumber hanya untuk satu agen, beberapa peneliti telah fokus pada pengembangan misi eksplorasi dimana pengukuran dilakukan ketika agen mengubah posisinya dalam urutan reguler dari waktu ke waktu. Selanjutnya, untuk agen *nonholonomic*, kontrol kecepatan sudut telah diusulkan untuk menemukan maksimum bidang skalar [16]. Dalam penelitian [17], digunakan gerakan maju-mundur secara periodik dari *unicycle* dan kecepatan maju dapat diubah untuk memindahkan agen ke arah sumber tanpa pengukuran posisi. Pengembangan dari konsep pencarian sumber tanpa pengukuran posisi pada [17] telah diusulkan menjadi pencarian sumber 3-D pada *underactuated vehicle* tanpa pengukuran posisi oleh [18]. Dalam penelitian [19], *sliding mode navigation strategy* telah diusulkan untuk menggerakkan agen ke maksimum medan skalar. Permasalahan *stochastic source seeking* untuk agen *mobile nonholonomic* disajikan dalam [20]. Kelemahan utama dari pendekatan ini adalah bahwa agen harus

melakukan perjalanan jarak jauh untuk menghitung gradien, kadang-kadang menggunakan manuver khusus seperti input sinusoidal. Dalam penelitian [21], diteliti masalah pencarian sumber terdistribusi dari satu agen dengan beberapa sensor lokalisasi sumber dengan proses difusi. Solusinya didasarkan pada perhitungan gradien dan derivasi orde tinggi seperti matriks Hessian.

Kedua, dalam eksperimen multi-agen, dikembangkan sejumlah algoritma untuk meningkatkan kinerja suatu tugas [21-24]. Sebagian besar dari multi-agen bergantung pada komunikasi semua-ke-semua antara agen dan pusat massa formasi untuk mengestimasi gradien terpadu, konsensus gradien, dan merancang aturan kontrol konvergensi. Dalam penelitian [22], masalah pencarian sumber diselesaikan dengan strategi kontrol terdistribusi untuk kelompok agen bergerak dan mengkonfigurasi ulang secara kooperatif dalam menanggapi keadaan lingkungan. Setiap agen dalam kelompok berfungsi sebagai *mobile sensor*, dengan rangkaian sensor yang dapat dikonfigurasi ulang. Kerangka koordinasi menggunakan agen *virtual* dan fungsi potensi buatan. Medan gradien yang diukur didekati pada posisi agen *virtual* menggunakan komputasi terpusat. Kalman *filter* kooperatif dirancang dalam [4] untuk memperkirakan gradien di pusat formasi. Dalam penelitian [23] melakukan pencarian sumber dengan metode *gradient climbing* untuk formasi agen yang akan diarahkan menuju bidang maksimum skalar. *Leader* mengestimasi gradien untuk dibagi ke *followers*. Penelitian yang disajikan dalam [24] memecahkan masalah mencari sumber untuk sekelompok agen melalui pendistribusian secara seragam dalam *ring-formation* tetap. Untuk dapat memperkirakan gradien di pusat massa, agen berputar di sekitar pusat dari sumber, informasi di agen pusat dan diketahui oleh semua agen. Pada penelitian [21], lokalisasi sumber terdistribusi tanpa informasi posisi disajikan. Para peneliti menganggap bahwa komunikasi jaringan dijelaskan oleh topologi-ring time-invariant dan estimasi gradien sebagai metode pencarian sumber.

Pada penelitian [25], kerjasama beberapa *UAV* dilakukan dengan mengadopsi strategi pembentukan leader-follower. Perhitungan gradien bidang skalar yang diestimasi oleh *UAV leader* berdasarkan pada semua pengukuran yang dilakukan oleh *UAV*. Dalam penelitian [26], yang merupakan perluasan [25] yakni

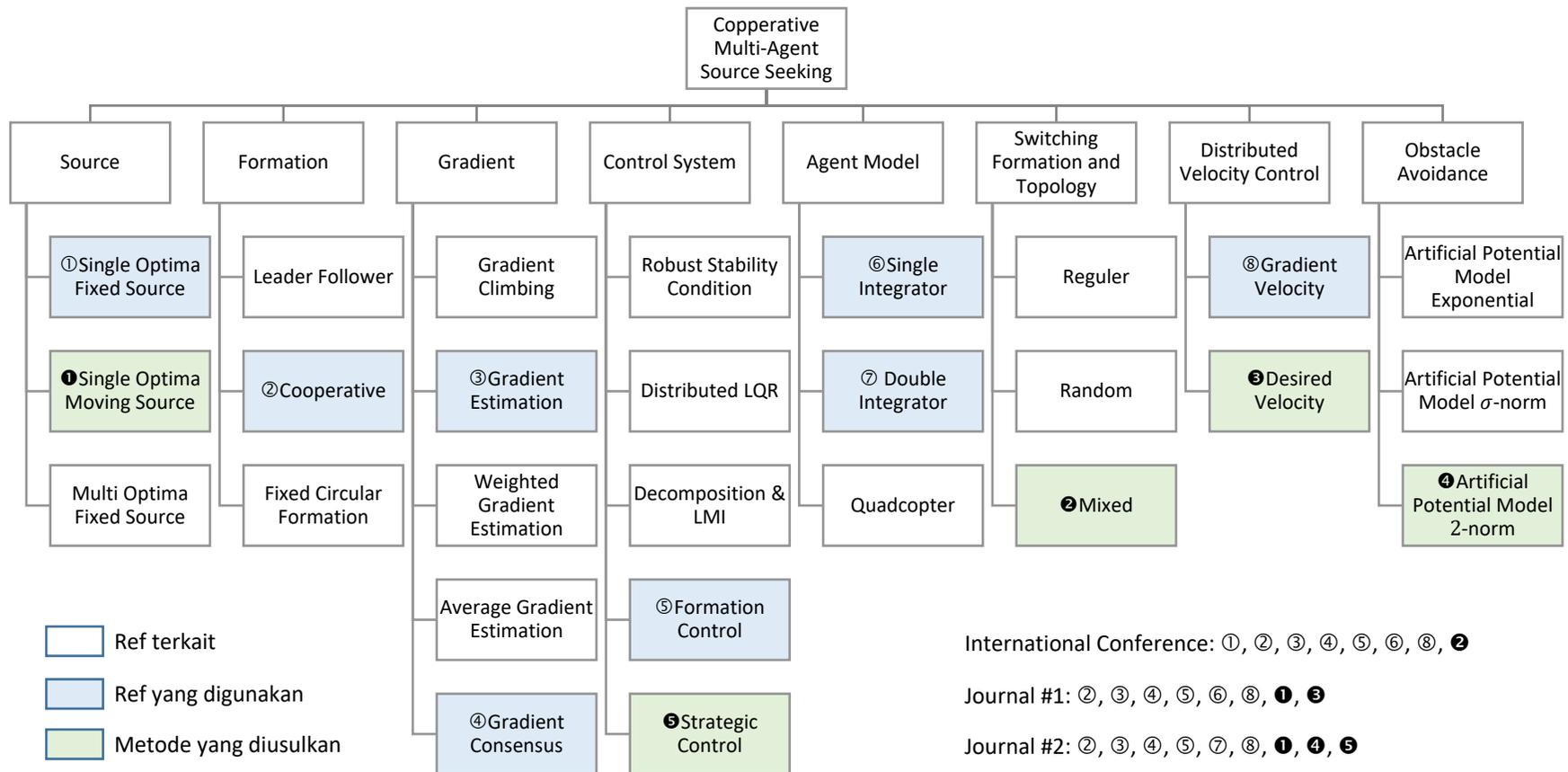
untuk menemukan bidang skalar bergerak yang tidak diketahui dengan menggunakan strategi pembentukan *leader-follower*.

Kontrol formasi dibahas dalam [27-31]. Pada penelitian [27], diteliti permasalahan kontrol formasi agen N yang identik dengan topologi yang tidak diketahui. Kondisi stabilitas pada formasi diturunkan, serupa dengan kondisi pada penurunan agen tunggal. Menggunakan kerangka kerja yang disajikan dalam [27], desain *Linear Quadratic Regulator (LQR)* terdistribusi untuk formasi dipertimbangkan dalam [28]. Strategi umpan balik berdasarkan metode dekomposisi dan *Linear Matrix Inequality* diusulkan pada [29]. Dalam penelitian [30], peneliti mengubah masalah kestabilan formasi menjadi masalah kontrol dari agen tunggal. Dengan cara ini, manajemen persyaratan kinerja menjadi lebih mudah, dan stabilitas untuk topologi tetap dan bervariasi dengan penundaan komunikasi telah dijamin [31].

Selanjutnya dari penelitian [32-34], mendiskusikan topik kontrol formasi untuk agen *nonholonomic*. Dalam penelitian [32], agen *nonholonomic* direpresentasikan sebagai model *linear parameter-varying (LPV)*. Merancang strategi kontrol untuk model LPV yang berbeda pada *leader-follower*, memungkinkan kelompok agen untuk melacak dari jalur *leader*, mempertahankan formasi dan mengikuti lintasan referensi. Dalam [33], diteliti kontrol terdistribusi untuk sekelompok agen dengan dinamika *nonholonomic* menggunakan perubahan topologi komunikasi terarah dan informasi lokal. Desain kontrol dikembangkan dalam kerangka *linear parameter-varying* dan *linear fractional transform (LPV-LFT)*. Pada [34], diusulkan kontrol terdistribusi untuk agen *non-holonomic* mempertahankan formasi yang diinginkan dan penghindaran tabrakan antara agen dan rintangan.

Peta jalan penelitian pencarian sumber dan kontrol terdistribusi kooperatif multi-agen, dapat dilihat pada Gambar 1.1. Dari semua referensi tersebut, beberapa referensi yang telah dilakukan pengujian dan metode-metode yang digunakan dalam disertasi ini (yang berlatar belakang biru), dan metode yang diusulkan (yang berlatar belakang hijau). Dari pengujian tersebut, terlihat peluang untuk dilakukan penelitian. Peluang penelitian tersebut, meliputi penelitian dengan mengusulkan metode-metode yakni

- pembangunan empat macam perubahan formasi dan topologi secara campuran dari reguler dan acak,
- pembangunan sumber bergerak dengan kombinasi gerakan linier, sinusoidal, mengembang dan menyempit,
- membangun metode kontrol kecepatan terdistribusi dengan menggunakan kecepatan konsensus gradien dan kecepatan yang diinginkan,
- pembangunan metode kontrol strategis yang merupakan kombinasi dari kontrol terdistribusi dan penghindaran rintangan,
- modifikasi algoritma penghindaran rintangan dengan *modified artificial potential field*,
- pembangunan prosedur perubahan formasi menyusut, khususnya untuk ruang antar dua rintangan yang berdekatan.



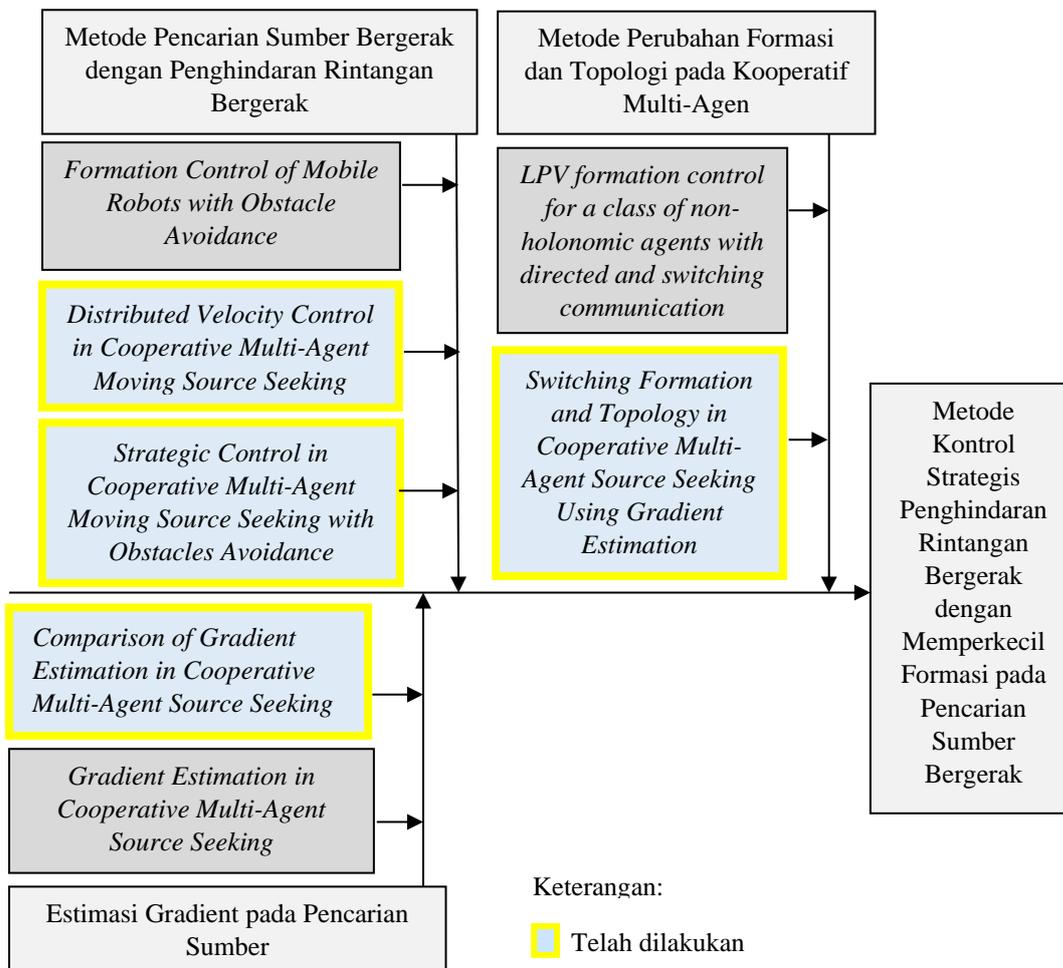
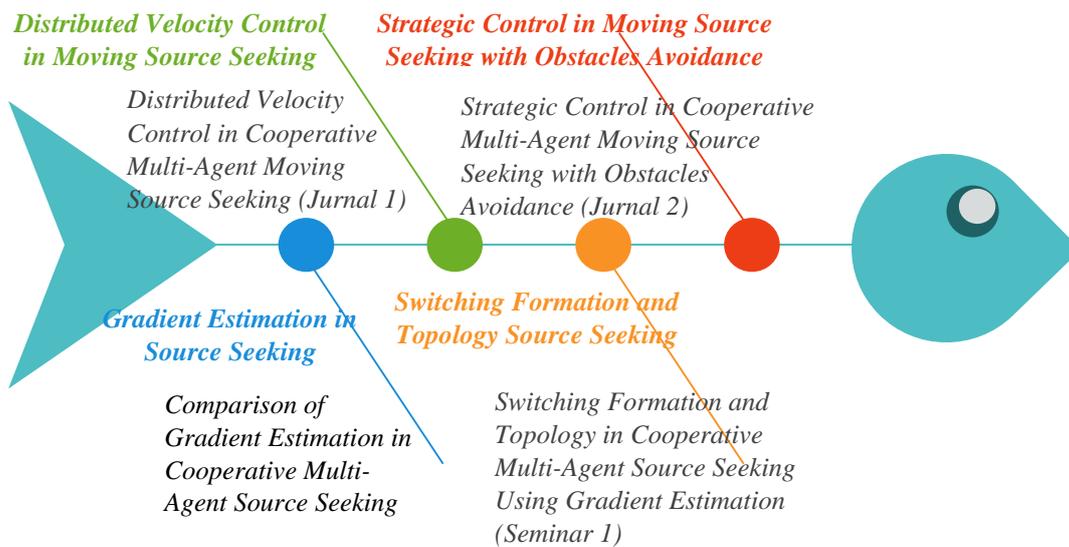
Gambar 1.1 Peta Jalan Penelitian Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak

1.6 Kontribusi Penelitian

Kontribusi disertasi ini adalah metode kontrol strategis pada kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan bergerak ditampilkan pada Gambar 1.2. Kontribusi pertama adalah membangun empat macam perubahan formasi dan topologi pada kooperatif multi-agen secara campuran dari reguler dan acak untuk mencari sumber. Dari eksperimen perubahan formasi dan topologi ini kooperatif multi-agen berhasil menemukan sumber dengan simpangan maksimum resultan gradien terkecil pada eksperimen perubahan dua formasi dan topologi.

Kontribusi kedua, memodifikasi metode kontrol kecepatan terdistribusi pada kooperatif multi-agen dengan menggunakan kecepatan konsensus gradien terdistribusi dan kecepatan terdistribusi yang diinginkan, sehingga sumber bergerak dapat dicapai. Penelitian ini membangun sumber bergerak secara: a) linier, b) sinusoidal, c) mengembang, d) menyempit, e) kombinasi linier dengan mengembang-menyempit, dan f) kombinasi sinusoidal dengan mengembang-menyempit.

Kontribusi ketiga, membangun metode kontrol strategis kooperatif multi-agen yang merupakan kombinasi kontrol kecepatan terdistribusi dan penghindaran rintangan. Kontrol kecepatan terdistribusi diperoleh dengan menggunakan kecepatan konsensus gradien, sedangkan penghindaran rintangan menggunakan metode *modified artificial potential field* yang mampu menyusutkan formasi.



Gambar 1.2 Target Kontribusi Penelitian Disertasi

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Penelitian ini, berawal dari eksplorasi terhadap penelitian [10] dan [11] yang membahas pencarian sumber bencana dengan kooperatif multi-agen menggunakan estimasi gradien. Sumber bencana ini bisa disebabkan oleh sumber kebakaran, sumber racun, sumber nuklir, dan sumber-sumber bencana lainnya. Sumber bencana tersebut dapat direpresentasikan dalam fungsi skalar, dengan variabel permukaan tanah/bumi yakni x , dan y , serta nilai fungsi intensitas dari sumber bencana, bisa berupa temperatur panas, intensitas racun, intensitas nuklir dan lain-lain. Semua agen dibekali sensor untuk mengukur intensitas sumber bencana tersebut.

Kooperatif multi-agen adalah beberapa agen yang saling bekerjasama, saling memberikan informasi posisi, intensitas sumber, dan informasi lain yang dibutuhkan. Komunikasi berbagi informasi ini disebut dengan topologi multi-agen. Topologi dan formasi multi-agen didefinisikan, sehingga dapat mengestimasi gradien berdasarkan posisi dan pengukuran intensitas sumber pada masing-masing agen. Karena hasil estimasi gradien pada masing-masing agen adalah berbeda, maka digunakan konsensus gradien sehingga nilai gradien mendekati sama, seperti pada [8], [12]. Konsensus gradien ini berfungsi untuk kecepatan gradien dan *heading* formasi kooperatif multi-agen agar dapat mencapai sumber.

Rincian bab ini, berisi sub bab-sub bab kajian berbagai referensi terkait dengan 3 usulan topik yakni perubahan formasi dan topologi kooperatif multi-agen pencarian sumber, kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak, dan kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan bergerak.

2.1 Kontrol Kooperatif Multi-Agen

Fax, J. dan R. Murray [27] melakukan pembuktian kestabilan formasi dalam topologi komunikasi menggunakan *eigenvalue* matrik Laplacian dengan kriteria Nyquist. Metode desentralisasi perubahan informasi antar agen diusulkan dan prinsip pemisahan dekomposisi kestabilan formasi dibuktikan dalam 2 hal

yakni kestabilan alir informasi yang tercapai untuk suatu graf dan kestabilan agen individu untuk kontroler yang diketahui.

Dinamika linear N agen identik sebagai berikut

$$\dot{\mathbf{x}}_i = P_A \mathbf{x}_i + P_B \mathbf{u}_i \quad (2.1)$$

dimana $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^m$ adalah *state* agen dan *state* kontrol, dan $i \in [1, N]$ adalah agen i . Setiap agen menerima pengukuran berikut

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_i &= P_{C1} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{z}_{ij} &= P_{C2} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j), \quad j \in \mathcal{N}_i \end{aligned} \quad (2.2)$$

dimana himpunan $\mathcal{N}_i \subset [1, N] \setminus \{i\}$ merepresentasikan himpunan agen yang dideteksi oleh agen i . Kemudian, $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}^k$ sebagai *state* pengukuran internal, dan $\mathbf{z}_{ij} \in \mathbb{R}^l$ sebagai *state* pengukuran eksternal relatif terhadap agen yang lain.

Diasumsikan semua *state* pengukuran relatif adalah sama dengan bobot yang membentuk eror pengukuran

$$\mathbf{z}_i = \frac{1}{|\mathcal{J}_i|} \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \mathbf{z}_{ij}. \quad (2.3)$$

Didefinisikan desentralisasi kontrol K , dimana memetakan $\mathbf{y}_i, \mathbf{z}_i$ menjadi \mathbf{u}_i dan *internal state* $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^s$ yang direpresentasikan dalam ruang *state*

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}_i &= K_A \mathbf{v}_i + K_{B1} \mathbf{y}_i + K_{B2} \mathbf{z}_i \\ \mathbf{u}_i &= K_C \mathbf{v}_i + K_{D1} \mathbf{y}_i + K_{D2} \mathbf{z}_i. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dengan mempertimbangkan keseluruhan N agen dalam sistem, dinamika sistem direpresentasikan sebagai berikut

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

dimana

$$A_{11} = I_N \otimes (P_A + P_B K_{D1} P_{C1}) + (I_N \otimes P_B K_{D2} P_{C2}) (\mathcal{L} \otimes I_n)$$

$$A_{12} = I_N \otimes P_B K_C$$

$$A_{21} = I_N \otimes K_{B1} P_{C1} + (I_N \otimes K_{B2} P_{C2}) (\mathcal{L} \otimes I_n)$$

$$A_{22} = I_N \otimes P_B K_C$$

dan matrik \mathcal{L} didefinisikan sebagai berikut

$$\mathcal{L}_{ii} = 1 \quad (2.6)$$

$$\mathcal{L}_{ij} = \begin{cases} -\frac{1}{|\mathcal{N}_i|} & , j \in \mathcal{N}_i. \\ 0 & , j \notin \mathcal{N}_i \end{cases}$$

Aturan alir informasi yang diusulkan dalam penelitian ini menunjukkan utilitas teorema stabilitas dalam menganalisis perilaku formasi agen dan dalam mensintesis solusi kontrol. Kerangka secara umum ini diharapkan berguna dalam analisis masalah stabilitas formasi dan akan menjadi titik awal yang berguna untuk penelitian kedepan. Secara khusus, wawasan kualitatif ke dalam sifat jaringan yang diinginkan dari perspektif stabilitas diharapkan dapat dikuantifikasi. Sebuah prinsip yang memungkinkan setiap agen dalam jaringan untuk menentukan dampaknya pada stabilitas formasi hanya menggunakan informasi lokal akan sangat berguna, karena dapat membentuk dasar dari protokol untuk pembobotan informasi.

Pendekatan ini bergantung pada dua ide. Pertama adalah penggunaan sistem dinamis sebagai paradigma untuk memahami pertukaran informasi antara agen, dan desain sistem dinamis yang memungkinkan agen untuk mencapai konsensus di pusat formasi. Kedua adalah penggunaan kompensasi *feedforward* untuk membuat informasi yang dideteksi dan dikirimkan tepat waktu. Meskipun penelitian ini dibatasi dengan fokus pada sistem linier dengan penundaan waktu tetap, pendekatan ini diharapkan dapat diperluas ke sistem agen *nonlinear* dengan penundaan waktu variabel. Agen *nonlinear* biasanya memiliki *manifold* pusat yang sesuai dengan pergerakan agen; jika alir informasi terbatas pada permukaan, dimungkinkan untuk memperluas prinsip aliran informasi ke kelas masalah tersebut. Pendekatan ini dapat diperluas ke sistem dengan penundaan waktu variabel melalui ekstensi yang sesuai, dengan istilah *feedforward* yang digunakan untuk mencapai pemisahan stabilitas. Saat ini, batasan utama dari metode ini adalah kendala dalam aturan alir informasi. Kebutuhan konsensus di antara agen memaksa aturan alir informasi menjadi stabil secara netral, yang berarti bahwa informasi tidak pernah hilang. Ini menjadikan sistem sensitif terhadap kesalahan sensor dan ketidakcocokan dalam kondisi awal. Satu kemungkinan untuk perbaikan adalah protokol untuk mengatur ulang informasi ke nol secara berkala atau sebagai tanggapan atas suatu peristiwa sebagai sarana pembatasan. Protokol semacam itu dapat terletak pada lapisan yang lebih tinggi dalam arsitektur kontrol, dan mungkin

membutuhkan analisis stabilitas. Pendekatan alternatif untuk meniadakan akumulasi kesalahan telah dieksplorasi.

Ren, W. dan E. Atkins [6] mengusulkan skema koordinasi terdistribusi dengan perubahan informasi lokal menggunakan protokol konsensus orde satu dan orde dua. Konsensus kontrol gain dan analisis kestabilan sistem terkoordinasi. Model sistem berikut

$$\dot{r}_i = u_i \quad (2.7)$$

dimana $r_i \in \mathbb{R}^2$ dan $u_i \in \mathbb{R}^2$, protokol konsensus orde pertama

$$u_i = - \sum_{j=1}^n g_{ij} k_{ij} (r_i - r_j), \quad i \in \mathcal{N} \quad (2.8)$$

dimana $k_{ij} > 0$ *uniform* terbatas, $g_{ii} \triangleq 0$ dan $g_{ij} = 1$ bila ada informasi dari agen j ke agen i , dan 0 untuk yang lain. Matrik *adjacency* \mathcal{A} didefinisikan sebagai $a_{ii} = 0$ dan $a_{ij} = g_{ij} k_{ij}, \forall i \neq j$. Perlu dicatat bahwa k_{ij} menyatakan bobot pada komunikasi agen (v_j, v_i) .

Dalam bentuk sistem terpadu orde satu

$$\dot{r} = -\mathcal{L}r \quad (2.9)$$

Model dinamik agen orde kedua

$$\begin{aligned} \dot{r}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= u_i \end{aligned} \quad (2.10)$$

dimana $r_i \in \mathbb{R}^2$, $v_i \in \mathbb{R}^2$, dan $u_i \in \mathbb{R}^2$, protokol konsensus orde kedua

$$u_i = - \sum_{j=1}^n g_{ij} k_{ij} (r_i - r_j) + \gamma (v_i - v_j), \quad i \in \mathcal{N} \quad (2.11)$$

dimana $k_{ij} > 0$ *uniform* terbatas, $g_{ii} \triangleq 0$ dan $g_{ij} = 1$ bila ada informasi dari agen j ke agen i , dan 0 untuk yang lain. Perlu dicatat bahwa k_{ij} menyatakan bobot pada komunikasi agen (v_j, v_i) dan γ adalah faktor skala.

Dalam bentuk sistem terpadu orde kedua

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dimana

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_n \\ -L & -\gamma L \end{bmatrix}$$

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa eksperimen, yakni

- *Digraph* dengan *subgroup* terpisah
- *Digraph* dengan *multiple leaders*
- *Graph* tak berarah terhubung
- *Digraph* dengan topologi *leader-follower*
- *Digraph* dengan *spanning tree* berarah

Dengan skema koordinasi terdistribusi dengan perubahan informasi lokal menggunakan protokol konsensus orde satu dan orde dua, menghasilkan error mendekati nol. Protokol orde kedua diusulkan untuk konsensus informasi diantara banyak agen. Syarat perlu dan syarat cukup konsensus ditunjukkan dengan dapat mencapai syarat tersebut dalam konteks topologi pertukaran informasi searah. Protokol konsensus orde kedua telah diterapkan untuk mengoordinasikan pergerakan beberapa robot bergerak.

Perlu disampaikan bahwa meskipun dinamika integrator ganda diasumsikan dalam penelitian ini, protokol yang dibahas dalam penelitian ini dapat diperluas ke dinamika agen *nonlinear* yang lebih rumit. Selain itu, penentuan praktis batas bawah pada waktu tinggal akan menjadi topik penelitian kedepan.

2.2 Perubahan Topologi dan Waktu-Tunda

Olfati-Saber, R. dan R. Murray [9] mengusulkan protokol konsensus jaringan dengan dan tanpa waktu tunda. Protokol konsensus jaringan dianalisis dalam 3 eksperimen jaringan berarah dengan topologi tetap, jaringan berarah dengan topologi berubah, dan jaringan tak berarah dengan komunikasi waktu tunda dan topologi tetap. Model agen integrator tunggal dengan dinamika

$$\dot{r}_i(t) = u_i(t). \quad (2.13)$$

Protokol konsensus linier pada topologi tetap, berubah, dan waktu tunda dengan komunikasi *zero*

$$u_i = \sum_{v_j \in N_i} a_{ij} (r_j - r_i). \quad (2.14)$$

Sedangkan protokol konsensus linier dengan waktu tunda

$$u_i = \sum_{v_j \in N_i} a_{ij} [r_j(t - \tau_{ij}) - r_i(t - \tau_{ij})]. \quad (2.15)$$

Metode Lyapunov untuk analisis konvergensi dari protokol konsensus *nonlinear* untuk jaringan tak berarah adalah sebagai berikut

$$u_i = \sum_{v_j \in N_i} k_f (r_j - r_i) \quad (2.16)$$

dimana k_f adalah koefisien formasi agen. Analisis konvergensi dilakukan pada protokol konsensus untuk jaringan integrator dengan aliran informasi yang berarah dan topologi tetap atau berubah. Analisis ini bergantung pada beberapa metode dari teori jaringan aljabar, teori matriks, dan teori kontrol. Hubungan antara kinerja protokol konsensus linier dan nilai *eigenvalue* dibangun dari jaringan digraf seimbang. Ini memberikan perluasan gagasan konektivitas aljabar jaringan ke konektivitas aljabar dari digraf seimbang. Sebuah fungsi pertentangan yang sederhana diperkenalkan sebagai fungsi Lyapunov untuk dinamika pertentangan kelompok. Ini kemudian digunakan untuk menyediakan fungsi Lyapunov umum yang memungkinkan analisis konvergensi dari protokol perjanjian untuk jaringan dengan topologi berubah. Sebuah diagram komutatif diberikan yang menunjukkan operasi mengambil bagian Laplacian dan simetris dari perjalanan matriks untuk matriks *adjacency* dari jaringan seimbang. Jaringan yang seimbang berubah menjadi bagian dalam memecahkan masalah konsensus rata-rata.

Untuk jaringan yang tidak terarah dengan topologi tetap, penelitian ini memberikan kondisi yang cukup dan perlu untuk mencapai konsensus rata-rata pada penundaan waktu komunikasi. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat *tradeoff* antara ketahanan waktu-penundaan dan kinerja protokol konsensus linier. Selain itu, *tradeoff* kedua adalah antara mempertahankan biaya komunikasi yang rendah dan mencapai kinerja yang tinggi dalam mencapai konsensus. Hasil simulasi ekstensif disajikan dengan menunjukkan efektivitas hasil teoritis dan metode analisisnya.

2.3 Konsensus Jaringan Sensor

Olfati-Saber, R. dan J. S. Shamma [8] mengusulkan *filter* konsensus yang mengijinkan *node* dari sensor jaringan untuk melacak rata-rata pengukuran n sensor dengan konsensus rerata. Analisis konvergensi, reduksi *noise* propagasi dilakukan dan berkemampuan melacak sinyal dengan cepat.

Sensor jaringan berukuran n dengan alir informasi \mathcal{G} digunakan dalam penelitian ini. Diasumsikan setiap sensor mengukur sinyal $m(t)$ yang terkorupsi oleh *noise* η_i yang merupakan *zero-mean White Gaussian Noise* (WGN). Model sensing dari jaringan adalah

$$u_i(t) = m_i(t) + \eta_i(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (2.17)$$

atau dalam bentuk terintegrasi

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{m}(t) + \boldsymbol{\eta}(t). \quad (2.18)$$

Diusulkan algoritma konsensus dinamika seperti berikut

$$\dot{r}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_j(t) - r_i(t)) + \sum_{j \in \mathcal{J}_i} a_{ij} (u_j(t) - r_i(t)). \quad (2.19)$$

Algoritma terdistribusi memberikan *filter* konsensus dinamika kolektif yakni

$$\begin{aligned} \dot{r} &= -(I_n + \Delta + \mathcal{L})r + (I_n + \mathcal{A})u \\ \dot{r} &= -(I_n + \Delta + \mathcal{L})r + (I_n + \Delta - \mathcal{L})u \end{aligned} \quad (2.20)$$

Transfer function dari *filter* konsensus diberikan oleh

$$H(s) = [sI_n + (I_n + \Delta + \mathcal{L})]^{-1} (I_n + \mathcal{A}) \quad (2.21)$$

Filter konsensus *low-pass* bekerja dengan baik, *noise* terredam sehingga hasil lebih akurat. *Filter* konsensus diperkenalkan sebagai metode untuk mendistribusikan sensor fusi di jaringan sensor. *Filter* konsensus adalah versi dinamis dari algoritma konsensus rata-rata yang telah banyak digunakan untuk fusi sensor serta aplikasi lain yang melibatkan sistem dinamis jaringan dan pengambilan keputusan kolaboratif. Berdasarkan skema Kalman *filter* yang baru, bagian penting dari solusinya adalah memperkirakan rata-rata sinyal n dengan cara *filter* konsensus terdistribusi. Itu menunjukkan bahwa *filter* konsensus secara efektif menyelesaikan masalah konsensus rata-rata dinamis ini.

Filter konsensus ini bertindak sebagai *filter low-pass* yang diinduksi oleh arus informasi dalam jaringan sensor. Selain itu, sifat *e-tracking* dari *filter*

konsensus untuk sensor fusion dianalisis secara rinci. Hasil sampingan dari analisis ini adalah fenomena kritis tipe baru dalam jaringan kompleks yang menghubungkan ukuran jaringan sensor dengan kemampuannya untuk melacak sinyal yang relatif cepat. Keterbatasan ini ditandai sebagai prinsip ketidakpastian pelacakan. Hasil simulasi disajikan untuk jaringan sensor reguler dan acak.

Rosero, E. dan H. Werner [12] mengusulkan algoritma yang meningkatkan akurasi pelacakan sinyal *time-varying* secara signifikan, dan melemahkan *noise* frekuensi tinggi. Algoritma konsensus dinamika pada [8] seperti berikut

$$\begin{aligned} \dot{r}_i(t) = & - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (u_j(t) - u_i(t)) \\ & - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_j(t) - r_i(t)) + (1 + d_i) (u_j(t) - r_i(t)) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Diusulkan algoritma konsensus dinamika seperti berikut

$$\begin{aligned} \dot{r}_i(t) = & \beta \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (u_j(t) - u_i(t)) \\ & - \beta \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_j(t) - r_i(t)) \\ & + \beta(1 + d_i) (u_j(t) - r_i(t)) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Algoritma terdistribusi memberikan *filter* konsensus dinamika kolektif yakni

$$\begin{aligned} \dot{r} &= -\beta(I_n|\Delta|L)(r - u) \\ \dot{r} &= -\beta\Lambda(r - u) \end{aligned} \quad (2.24)$$

dimana $\Lambda = (I_n|\Delta|L)$ adalah matrik simetri positif definit ($\Lambda > 0$)

Dengan skema koordinasi terdistribusi dengan perubahan informasi lokal menggunakan protokol konsensus *low-pass*, menghasilkan eror mendekati nol. Dalam penelitian ini, modifikasi dari *filter* konsensus terdistribusi sebelumnya diusulkan untuk jaringan sensor dengan pelacakan sinyal *time-varying*. *Filter* dapat berjalan secara lokal pada setiap sensor. Ini membutuhkan informasi hanya dari agen tetangga. Analisis teoritis menunjukkan bahwa algoritma yang diusulkan stabil dan menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada algoritma asli pada [8]. Simulasi mengkonfirmasi keefektifan dari algoritma konsensus ini.

2.4 Perbandingan Estimasi Gradien

M Sahal, Zulkifli H, A Alkaff [35] membahas perbandingan 3 estimasi gradien, yakni estimasi gradien tanpa bobot, dengan bobot, dan rerata pada kooperatif multi-agen dalam pencarian sumber. Analisis perbandingan 3 estimasi gradien tersebut dilakukan secara statistik dengan membandingkan masing-masing estimasi dengan gradien originalnya. Hasil perbandingan ini menghasilkan eror, dengan analisis statistik *mean square error (MSE)* dan *root mean square error (RMSE)*.

Pada kooperatif multi-agen pencarian sumber, terdapat multi-agen yang saling bekerjasama antar agen satu dengan agen yang lain melalui komunikasi topologi multi-agen. Dengan metode kontrol formasi multi-agen dan pencarian sumber dengan menggunakan metode estimasi gradien. Sumber ini dinyatakan dalam *scalar field* yang merepresentasikan *level temperature, poison, zat-zat yang berbahaya, atau yang lainnya (disaster area)*, yang menjadi target pencarian kooperatif multi-agen. Setiap agen mempunyai kemampuan untuk mengetahui koordinat posisinya dan nilai intensitas sumber saat posisi agen berada. Pada penelitian ini, diusulkan menggunakan model agen yang identik berupa model integrator tunggal dan integrator ganda. Metode konsensus *filter* digunakan untuk kontrol formasi. Tiga macam estimasi gradien juga digunakan untuk mencari target sumber. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa skema yang diusulkan bisa digunakan sangat baik dan menarik untuk penyelesaian permasalahan kooperatif pencarian sumber.

A. Estimasi Gradien tanpa bobot

Setiap agen i mengukur sinyal ψ pada posisinya $\psi_i = \psi(r_i)$, dimana $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Fungsi dapat diestimasi dengan deret Taylor. Bila posisi dari agen j , r_j dekat dengan posisi agen i , r_i ; estimasi fungsi ini pada titik r_i diberikan oleh

$$\psi(r_j) \approx \psi(r_i) + (r_j - r_i)^T \hat{\mathbf{g}}(r_i) \quad (2.25)$$

Agen j adalah agen tetangga yang mengirim informasi ke agen i , $\hat{\mathbf{g}}(r_i)$ adalah estimasi gradien yang dihitung oleh agen i . Contoh $p = 3$, $\hat{\mathbf{g}}(r_i) =$

$[\hat{\mathbf{g}}_x(r_i)\hat{\mathbf{g}}_y(r_i)\hat{\mathbf{g}}_z(r_i)]^T$. Jika agen i mempunyai $|N_i|$ tetangga, persamaan (2.25)

akan berubah menjadi

$$\begin{bmatrix} \psi(r_1) - \psi(r_i) \\ \psi(r_2) - \psi(r_i) \\ \vdots \\ \psi(r_{|N_i|}) - \psi(r_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1 - r_i)^T \\ (r_2 - r_i)^T \\ \vdots \\ (r_{|N_i|} - r_i)^T \end{bmatrix} \hat{\mathbf{g}}(r_i) \quad (2.26)$$

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{g}}_i$$

dimana $\mathbf{b}_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times 1}$, $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times p}$, dan $\hat{\mathbf{g}}(r_i) = \hat{\mathbf{g}}_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. Permasalahan ini bisa diselesaikan dengan menggunakan *linear least square*

$$\hat{\mathbf{g}}_i = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{b}_i \quad (2.27)$$

B. Estimasi Gradien dengan bobot

Persamaan (2.25) dinormalisasi dengan jarak relatif antar agen dan dikalikan dengan unit vektor berarah antara agen i dan agen j , sehingga

$$\frac{\psi(r_j) - \psi(r_i)}{\|r_j - r_i\|} \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} = \frac{(r_j - r_i)^T \hat{\mathbf{g}}(r_i)}{\|r_j - r_i\|} \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} \quad (2.28)$$

persamaan (2.28) dapat ditransformasi menjadi

$$\frac{\psi(r_j) - \psi(r_i)}{\|r_j - r_i\|^2} (r_j - r_i) = \frac{(r_j - r_i)^T \otimes (r_j - r_i)}{\|r_j - r_i\|^2} \hat{\mathbf{g}}_i \quad (2.29)$$

dimana w_{ji} adalah faktor pembobot antara agen i dan agen j , yang didefinisikan sebagai $1/\|r_j - r_i\|^2$. Persamaan (2.29) dapat dimodifikasi untuk menambahkan pembobot pada setiap agen. $\mathbf{W}_i = \text{diag}\{w_{ji}\}$ adalah $|N_i| \times |N_i|$ matrik diagonal yang mengandung pembobot pada semua $|N_i|$ agen yang mengirim informasi ke agen i . Berikut nilai dari pembobot

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{\|r_1 - r_i\|^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\|r_{|N_i|} - r_i\|^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} (\psi(r_1) - \psi(r_i))(r_1 - r_i) \\ (\psi(r_2) - \psi(r_i))(r_2 - r_i) \\ \vdots \\ (\psi(r_{|N_i|}) - \psi(r_i))(r_{|N_i|} - r_i) \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} (r_1 - r_i)^T \otimes (r_1 - r_i) \\ (r_2 - r_i)^T \otimes (r_2 - r_i) \\ \vdots \\ (r_{|N_i|} - r_i)^T \otimes (r_{|N_i|} - r_i) \end{bmatrix}$$

dapat ditulis dalam bentuk kompak sebagai

$$W_i A_i \hat{g}_i = W_i b_i \quad (2.30)$$

dengan menggunakan *least square*

$$\hat{g}_i = (A_i^T W_i^2 A_i)^{-1} A_i^T W_i^2 b_i \quad (2.31)$$

C. Estimasi Gradien Rerata

Estimasi gradien ini dapat dihitung sebagai rata-rata dari *slope* pada arah vektor normalisasi

$$\hat{g}_i = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \frac{\psi(r_j) - \psi(r_i)}{\|r_j - r_i\|^2} (r_j - r_i) \quad (2.32)$$

Eksperimen yang dilakukan menggunakan *scalar field* ψ seperti berikut

$$\psi(x, y) = 50e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} + 50e^{-\frac{(x-65)^2}{16200} - \frac{(y-70)^2}{1250}} \quad (2.33)$$

dan gradien original didapatkan dari gradien $\psi(x, y)$ secara analitik, yakni

$$\nabla \psi(x, y) = \frac{\partial \psi}{\partial x} i + \frac{\partial \psi}{\partial y} j \quad (2.34)$$

dimana

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial x} &= -\frac{x-65}{900} e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} - \frac{x-65}{8100} e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} \\ \frac{\partial \psi}{\partial y} &= -\frac{y-70}{5625} e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} - \frac{y-70}{625} e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} \end{aligned}$$

Setiap agen adalah agen identik dengan model integrator tunggal. Kemudian dihitung *MSE* dan *RMSE* pada error r_x , r_y dan r_T terhadap original gradien pada masing-masing estimasi.

2.5 Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber

Rosero, E. dan H. Werner [10] melakukan estimasi gradien terdistribusi pada model integrator tunggal dan integrator ganda. Filter konsensus terdistribusi dengan sinyal pengukuran dan *noise* digunakan untuk mendapatkan konsensus

gradien. Kontrol formasi dan kestabilan sistem berfungsi untuk menjaga formasi selama kooperatif multi-agen bermanuver.

Setiap agen akan menghitung gradien-nya sendiri dan setiap agen akan menerima berbagi nilai gradien dari tetangganya yang akan digunakan untuk estimasi gradien terdistribusi. Setiap agen i mengukur sinyal ψ pada posisinya $\psi_i = \psi(r_i)$, dimana $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Fungsi dapat diestimasi dengan deret Taylor. Bila posisi dari agen j, r_j dekat dengan posisi agen i, r_i ; estimasi fungsi skalar sumber pada titik r_j diberikan dengan

$$\psi(r_j) \approx \psi(r_i) + (r_j - r_i)^T \hat{g}(r_i) + H.O.T. \quad (2.35)$$

Agen j adalah agen tetangga yang mengirim informasi ke agen i , $\hat{g}(r_i)$, adalah estimasi gradien yang dihitung oleh agen i . Contoh $p = 3$, $\hat{g}(r_i) = [\hat{g}_x(r_i) \ \hat{g}_y(r_i) \ \hat{g}_z(r_i)]^T$. Jika agen i mempunyai $|N_i|$ tetangga, persamaan akan berubah menjadi persamaan (2.26), dimana $b_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times 1}$, $A_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times p}$, dan $\hat{g}_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. Permasalahan ini bisa diselesaikan dengan menggunakan *linear least square* seperti pada persamaan (2.27).

Diusulkan algoritma konsensus yang merupakan modifikasi dari algoritma estimasi gradien seperti pada

$$\bar{g}_i = \beta \sum_{j \in N_i} a_{ij} e_{g_{ij}}(t) + \beta(1 + d_i)(\hat{g}_i(t) - g_i(t)) \quad (2.36)$$

dimana

$$e_{g_{ij}}(t) = (\hat{g}_i(t) - g_i(t)) - (\hat{g}_j(t) - g_j(t))$$

dan $\beta \geq 1$ adalah parameter kontrol untuk meningkatkan tracking dari gradien saat agen bergerak. Dengan menggunakan definisi Laplacian graf, maka

$$\bar{g} = -\beta(I_N \otimes I_p + \Delta \otimes I_p + L \otimes I_p)g + \beta(I_N \otimes I_p + \Delta \otimes I_p + L \otimes I_p)\hat{g} \quad (2.37)$$

sehingga persamaan sebelumnya menjadi

$$\bar{g} = \beta(-Ag + A\hat{g}) \quad (2.38)$$

dimana

$$A = I_N \otimes I_p + \Delta \otimes I_p + L \otimes I_p$$

Model agen integrator ganda

$$\dot{r}_i(t) = v_i(t), \quad (2.39)$$

$$\dot{v}_i(t) = u_i(t),$$

dimana

$$u_i(t) = k_F \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left[(r_{Fi}(t) - r_{Fj}(t)) - (r_i(t) - r_j(t)) - \theta (v_i(t) - v_j(t)) \right] + k_T (\hat{g}_i(t) - \gamma v_i(t)) \quad (2.40)$$

$k_F > 0, k_T > 0, k_H > 0, \theta > 0, \gamma > 0, \beta > 0$ adalah parameter kontrol skalar, dari persamaan tersebut dapat disusun dalam ruang state, *closed loop dynamics*

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \Sigma \begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_F \mathcal{L} & k_T I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_F \\ \hat{g}(r) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

dimana

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0 & I_N \\ -k_F \mathcal{L} & -k_F \theta \mathcal{L} - k_T \gamma I_N \end{bmatrix}$$

Kontrol formasi, estimasi gradien terdistribusi, dan filter konsensus gradien pada formasi integrator ganda bekerja dengan baik sehingga pencarian sumber maksimum tercapai. Dalam penelitian ini, disajikan algoritma kooperatif multi-agen yang bertujuan untuk mencari sumber yang tidak diketahui dari bidang skalar dibawah komunikasi yang terbatas. Strategi navigasi terdistribusi berdasarkan pada kedua arah gradien sumbu-x sumbu-y yang diestimasi dan diusulkan kontrol formasi untuk model integrator tunggal dan ganda. Analisis teoritis menunjukkan bahwa agen dapat berkumpul menuju sumber medan skalar sementara formasi dipertahankan. Pada bagian kedua dari penelitian ini [11], pendekatan diperluas ke sistem waktu-invarian linier.

A. Turgeman dan H. Werner [2] membahas kontrol strategis misi multi-agen melokasikan ke sumber maksimum, dan melacak level kurva tertentu. Diusulkan skema kontrol berbasis formasi berhirarki dan reduksi topologi, ada dua yang diusulkan. Satu, proses iterasi terbatas untuk mencapai konsensus diskrit antar agen untuk perubahan satu tugas ke tugas yang lain. Dua, algoritma 4 tugas diusulkan untuk penjelajahan sumber waktu varian dan medan *noise*.

Estimasi gradien terdistribusi diusulkan seperti pada [10]. Hirarki formasi, diketahui n graf, yakni $\mathcal{G} = \mathcal{G}_1 \times \dots \times \mathcal{G}_n$, produk hirarki graf, jika vertikal dari \mathcal{G}_{i+1}

diganti dengan \mathcal{G}_i sehingga hanya *leader* dari \mathcal{G}_i mengganti setiap vertikal dari \mathcal{G}_{i+1} untuk semua $1 \leq i \leq n - 1$.

Diasumsikan $\mathcal{G}_1 = (\mathcal{V}_1, \mathcal{E}_1), |\mathcal{V}_1| = N_1$ dan $\mathcal{G}_2 = (\mathcal{V}_2, \mathcal{E}_2), |\mathcal{V}_2| = N_2$, maka produk hirarki graf didefinisikan sebagai $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}), |\mathcal{V}| = N = N_1 \cdot N_2$, $|\mathcal{E}| = |\mathcal{E}_1| \cdot |\mathcal{V}_1| + |\mathcal{E}_2|$, dan matrik Laplacian sebagai berikut

$$\mathcal{L} = I_{N_2} \otimes \mathcal{L}_{\mathcal{G}_1} + \mathcal{L}_{\mathcal{G}_2} \otimes O_{N_1} \quad (2.42)$$

dimana $\mathcal{L}_{\mathcal{G}_i}$ adalah Laplacian dari \mathcal{G}_i , $I_{N_2} \in \mathbb{R}^{N_2 \times N_2}$ adalah matrik identitas, dan $O_{N_1} \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_1}$ adalah matrik $N_1 \times N_1$ dengan hanya entri (1,1) sama dengan 1 dan sisanya bernilai nol.

Deskripsi algoritma

1. Melokasikan pada sumber, dengan estimasi gradien untuk menavigasi menuju lokasi sumber.
2. Mencari level kurva, saat multi-agen mencapai sumber maksimum, dan *agreement* diskrit tercapai, multi-agen berpindah ke tugas kedua, yakni melokalisasi level kurva yang diinginkan, dengan mencari pada arah yang berbeda.
3. Pemerataan, sekali *agreement* tercapai, group mulai memproses pemerataan sepanjang level kurva, dengan pengukuran jarak tetangganya.
4. Jangkar dan patroli, pada akhir tugas, 2 peran ditugaskan, group dipisah menjadi ganjil untuk jangkar, dan genap untuk patroli. Jangkar bertanggung jawab melacak *level* kurva dan memelihara formasi, sedangkan patroli bertanggung jawab menjelajah *level* kurva antar jangkar.

Dalam penelitian ini, diusulkan kontrol strategis untuk menjelajahi bidang skalar dengan waktu bervariasi dengan pengukuran gangguan. Metode gradien estimasi terdistribusi dengan skema kontrol pembentukan hirarki digunakan untuk menavigasi agen. Selain itu, proses kesepakatan diskrit diusulkan untuk mencapai konsensus antara kelompok-kelompok agen yang berbeda yakni status perubahan multi-agen. Strategi diuji dalam skenario yang berbeda untuk agen integrator

tunggal di bidang skalar yang berubah waktu dengan pengukuran dan *noise*, dengan menunjukkan efisiensi dari algoritma ini.

2.6 Medan Potensial Buatan

Tatsuya Miyazaki dan Kiyotsugu Takaba [13] membahas aturan kontrol formasi untuk mencapai formasi yang diinginkan dan penghindaran tabrakan antar agen dan rintangan pada *mobile robots*. Agen diasumsikan seperti sebuah titik yang berada pada suatu medan potensial buatan (*artificial potential field*) [13]. Medan buatan terdiri dari medan atraktif dan medan tolak. Berikut model medan buatan

$$U(r) = U_{att}(r) + \sum_{i=1}^n U_{rep}(r) \quad (2.43)$$

$$F(r) = \nabla U(r)$$

$$F(r) = F_{att}(r) + \sum_{i=1}^n F_{rep}(r) \quad (2.44)$$

Fungsi potensial antar agen yang berkomunikasi

$$U_i = \sum_{j \in N_i} U_{ij}(\|d_{ij}\|) \quad (2.45)$$

$$U_{ij} = \frac{d}{\|r_{ij}\|} + \log \|d_{ij}\|$$

Fungsi potensial yang dihasilkan rintangan dengan eksponensial

$$U_i^o = \sum_{i \in N_i^o} k_o \exp\left(\frac{-\|d_i^R - d_{il}^o\|}{\sigma}\right) \quad (2.46)$$

$$\dot{v}_{ri} = \begin{cases} u_i^{co} + u_i^{ca} & , N_i^o = \emptyset \\ \hat{u}_i^{co} + u_i^{ca} + u_i^{oa} & , \text{lainnya} \end{cases}$$

$$u_i = B^{-1}v_{ri}$$

Fungsi potensial yang dihasilkan rintangan dengan σ -norm

$$U_i^o = \sum_{i \in N_i^o} \left(\frac{1}{2}\right) k_o \left(\frac{1}{\|d_i^R - d_{il}^o\|_\sigma} - \frac{1}{l_o}\right)^2 \quad (2.47)$$

$$\|d_i^R - d_{il}^o\|_\sigma = \frac{1}{\epsilon} \left(\sqrt{1 + \epsilon \|d_i^R - d_{il}^o\|} - 1 \right) \quad (2.48)$$

dimana $\epsilon > 0$.

Sun J, Tang J, Lao S [14] membahas kooperatif UAV menghindari rintangan dengan menggunakan *Optimized Artificial Potential Field Algorithm*. Algoritma medan potensial buatan banyak digunakan dalam perencanaan lintasan robot dan penghindaran tabrakan karena prinsipnya yang sederhana, struktur yang tidak rumit, dan lintasan yang dihasilkan halus. Algoritma tidak perlu mencari lintasan global, dan memiliki waktu perencanaan yang singkat dan efisiensi tinggi, sangat cocok untuk tugas perencanaan yang memiliki persyaratan ketat untuk pembuatan dan keamanan lintasan waktu nyata. *APF* tidak menghasilkan lintasan terpendek, tetapi paling halus dan aman. Namun, karena algoritma *APF* mengubah semua informasi menjadi satu kekuatan dan mengontrol pergerakan robot ke arah yang dihasilkan, informasi penting seperti distribusi rintangan dihilangkan dan dengan demikian, kemampuan perencanaan lintasannya tidak mencukupi di beberapa tempat lingkungan yang kompleks.

Pada tahun 1986, Khatib [36] pertama kali memperkenalkan algoritma medan potensial buatan untuk robot yang menghindari rintangan dan perencanaan lintasan. Filosofi pendekatan medan potensial buatan dapat digambarkan secara skematis sebagai berikut. Manipulator bergerak dalam medan gaya. Posisi yang akan dicapai adalah tiang penarik untuk end-effector dan rintangan adalah permukaan tolak-menolak untuk bagian manipulator [36]. Untuk mempermudah pembahasan, Khatib memperlakukan UAV dan titik target sebagai partikel dan memperlakukan area rintangan atau ancaman sebagai lingkaran, kemudian menganalisis model *APF* dalam ruang dua dimensi. Arah pergerakan *UAV* pada sembarang posisi di ruang yang direncanakan ditentukan oleh resultan medan gaya yang dibentuk oleh medan gravitasi yang dihasilkan oleh target dan medan tolakan yang dihasilkan oleh rintangan.

Khatib pertama-tama mempertimbangkan masalah penghindaran tabrakan dengan rintangan tunggal O . Fungsi medan potensial tarik dan fungsi potensial tolak dapat direpresentasikan sebagai [36]

$$\begin{aligned}
U(r) &= U_{att} + U_{rep}(r) \\
U_{att}(r) &= \frac{1}{2}k_{att}(r - r_d)^2
\end{aligned} \tag{2.49}$$

$$U_{rep}(r) = \begin{cases} 0.5k_{rep} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho < \rho_0 \\ 0, & \rho \geq \rho_0 \end{cases} \tag{2.50}$$

dimana r dan r_d masing-masing mewakili posisi spasial *UAV* dan tujuannya; k_{att} dan k_{rep} adalah masing-masing koefisien gain gaya tarik dan koefisien gain gaya tolak; ρ_0 merepresentasikan jarak batas pengaruh medan potensial dan ρ merupakan jarak terpendek ke rintangan O .

Setelah menghitung gradien negatif dari fungsi medan potensial gravitasi, fungsi gaya tarik dan fungsi gaya tolak yang sesuai adalah

$$F_{att}(r) = -grad[U_{att}(r)] = -k_p(r - r_d) \tag{2.51}$$

$$\begin{aligned}
F_{rep}(r) &= -grad[U_{rep}(r)] \\
&= \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x}, & \rho < \rho_0 \\ 0, & \rho \geq \rho_0 \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.52}$$

Gaya resultan dengan mempertimbangkan semua rintangan adalah

$$F(r) = F_{att}(r) + \sum_{obs=1}^n F_{rep}(r) \tag{2.53}$$

Ketika membangun fungsi tolak di sekitar rintangan, Khatib memilih fungsi *Force Inducing an Artificial Repulsion from the Surface (FIRAS*, dari Perancis). Fungsi lain dapat dipilih, seperti fungsi Gaussian terdeformasi, tetapi perlu dipastikan bahwa fungsi dan turunannya kontinu. Algoritma medan potensial artifisial tradisional dapat dengan mudah menyatu pada titik minimum lokal, dan ada masalah ketidakterjangkauan target, *jitter* lintasan di wilayah sempit, dan fenomena lainnya. Menanggapi masalah ini, para peneliti telah meningkatkan algoritma tradisional dan menawarkan banyak solusi yang efektif.

Ketidaktercapaian target adalah masalah utama model *APF* tradisional. Ini mengacu pada situasi dimana *UAV* jatuh ke titik minimum potensi lokal sebelum

mencapai target. Tiga eksperimen berikut dari masalah ini akan dibahas. Titik target yang dekat dengan rintangan. Model *APF* tradisional tidak mempertimbangkan potensi perubahan kekuatan *UAV* saat titik target dekat dengan rintangan. Ketika titik target berada di dekat rintangan, *UAV* bergerak menuju titik target dibawah gaya tarik medan potensial gravitasi dan mengalami gaya tolak yang lebih besar karena kedekatannya dengan rintangan. Jika dalam proses mendekati titik target, gaya tolak *UAV* lebih besar dari gaya gravitasi, maka tidak dapat mencapai titik target [37].

Rintangan antara *collinear* dengan titik target dan *UAV*. Jika rintangan antara robot dan target dan mereka adalah *collinear*, menurut definisi model *APF* tradisional, harus ada titik dimana resultan gaya *UAV* menjadi nol saat *UAV* bergerak ke titik target. Jika tidak ada gaya eksternal lain, *UAV* akan berhenti di titik tersebut dan tidak akan mencapai titik target.

Ketika *UAV* menghadapi area dengan rintangan intensif yang tidak dapat dilewati saat bergerak ke titik target, *UAV* harus memilih beberapa jalur sempit sebagai lintasan yang layak. Pada titik ini, gaya tolak rintangan di sekitar saluran mungkin jauh lebih besar daripada gaya gravitasi titik target, dan jika *UAV* hanya bergantung pada gaya yang dihasilkan dalam model *APF* tradisional untuk menentukan langkah selanjutnya. *UAV* mungkin gagal menemukan jalur dengan rintangan yang sempit, dan gaya tolak di kedua sisi dapat menjebak *UAV* ke titik minimum lokal.

Fenomena *jitter* terutama terjadi pada dua eksperimen berikut. Pertama, *jitter* terjadi di sekitar beberapa titik minimum lokal. Ketika *UAV* berada di sekitar beberapa titik minimum lokal, $\rho(r(n, m), r(n)) \leq \varepsilon$ menunjukkan bahwa *UAV* tidak memiliki perpindahan substansial antar m -posisi dari langkah n ke langkah $n + m + 1$, dan lintasan yang direncanakan mengandung *jitter* periodik, di antaranya $m = 2, 3, \dots$; dan ε adalah sangat kecil.

Kedua, *jitter* yang disebabkan oleh perubahan gaya resultan secara tiba-tiba. Ketika arah resultan gaya yang bekerja pada *UAV* di sekitar rintangan berubah, arah pergerakan *UAV* selanjutnya akan mengalami perubahan sudut yang besar, dan fenomena *jitter* akan terjadi. Saat *UAV* bergerak, jika nilai absolut dari perbedaan

arah antara dua langkah yang berdekatan dalam $N(N > 2)$ langkah yang berkelanjutan memenuhi $90^\circ < |\theta| < 180^\circ$, itu menunjukkan bahwa *UAV jitter*.

Ketika fenomena *jitter UAV* terjadi dalam proses pergerakan, meskipun *UAV* pada akhirnya dapat mencapai titik target, kualitas perencanaan lintasan sangat terpengaruh, yang berarti kelayakannya sangat buruk. *UAV* bergerak menuju titik target dalam ruang 3D. Pertama, mempertimbangkan satu gerakan *UAV* dalam sumbu horisontal ruang dan posisi 2D adalah $X = (x, y)^T$. Kemudian, definisi dari fungsi potensial atraktif adalah

$$U_{att}(r) = \frac{1}{2}k_{att}(r - r_{targ})^2 \quad (2.54)$$

dimana k_{att} adalah faktor perolehan proporsional dari medan potensial tarik; r adalah vektor posisi *UAV* di medan potensial. Kemudian, gaya tarik $F_{att}(r)$ adalah gradien negatif dari fungsi potensial tarik

$$\begin{aligned} F_{att}(r) &= -grad(U_{att}) \\ &= -k_{att}(r - r_{targ}) = k_{att}(r_{targ} - r) \end{aligned} \quad (2.55)$$

Masalah titik minimum lokal dari *APF* telah membatasi penerapan algoritma ini secara luas. Akar penyebab masalahnya adalah bahwa titik target bukanlah titik minimum global dari seluruh medan potensial, dan untuk mengatasi masalah ini, fungsi medan tolak ditingkatkan [38].

Dengan memperkenalkan jarak relatif antara target dan *UAV*, fungsi medan potensial tolak menolak asli dikalikan dengan faktor jarak, $(r - r_{rep})^n$ untuk membuat resultan gaya yang bekerja pada *UAV* di titik target menjadi nol, sehingga titik target akan tetap sama dengan titik minimum global dari seluruh bidang potensial. Untuk alasan ini, fungsi medan tarik target tetap tidak berubah, dan fungsi medan tolak diubah menjadi

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (r - r_{targ})^n, & \rho(X) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(X) > \rho_0 \end{cases} \quad (2.56)$$

dimana k_{rep} adalah faktor penguatan proporsional dari medan potensial tolak; $\rho(r)$ adalah jarak terpendek antara *UAV* dan halangan di luar angkasa; ρ_0 adalah jarak tumbukan maksimum dari satu rintangan, yang tergantung pada kecepatan gerakan

dan perlambatan *UAV*, dan ketika jarak antara *UAV* dan rintangan lebih besar dari medan potensial tolak ρ_0 , maka tidak mempengaruhi pergerakan *UAV*.

Formula $(r - r_{targ})^n = |(x - x_{targ})^n| + |(y - y_{targ})^n|$ adalah jarak relatif antara *UAV* dan titik target. Dibandingkan dengan fungsi tolak *APF* tradisional, diperkenalkan jarak relatif antara *UAV* dan target, yang memastikan bahwa titik target adalah satu-satunya bidang potensial minimum. Kemudian, gaya tolak adalah gradien negatif dari fungsi potensial tolak

$$\begin{aligned}
 F_{rep}(r) &= -grad(U_{rep}) \\
 &= \begin{cases} F_{rep1}(r) + F_{rep2}(r), & \rho(X) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(X) > \rho_0 \end{cases} \\
 F_{rep}(r) &= -grad(U_{rep}) \\
 &= \begin{cases} F_{rep1}(r) + F_{rep2}(r), & \rho(X) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(X) > \rho_0 \end{cases} \tag{2.57}
 \end{aligned}$$

dimana

$$\begin{aligned}
 F_{rep1}(r) &= k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(r)} \cdot (r - r_{targ})^n \cdot \frac{\partial \rho(r)}{\partial(r)} \\
 F_{rep2}(r) &= -\frac{n}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \cdot (r - r_{targ})^{n-1} \cdot \frac{\partial(r - r_{targ})}{\partial(r)} \tag{2.58}
 \end{aligned}$$

$F_{rep1}(r)$ dan $F_{rep2}(r)$ adalah dua kekuatan komponen dari $F_{rep}(r)$. Sebelum *UAV* mencapai titik target, tidak mungkin untuk menghasilkan situasi dimana resultan gaya adalah nol, yang menyelesaikan ketidakterjangkauan target yang disebabkan oleh jarak antara target dan rintangan yang terlalu pendek.

Selain kendala, juga mempertimbangkan pengaruh *UAV* lain terhadap *UAV* tertentu. Algoritma *APF* menganggap ruang tempat rintangan berada sebagai medan gaya tolak, sedangkan *UAV* lain di ruang dapat dianggap sebagai rintangan bergerak dengan posisi dan kecepatan tertentu, sehingga juga menghasilkan tolakan. Dalam prakteknya, jarak aman *UAV* biasanya jauh lebih besar dari volumenya. Algoritma *APF* dapat memberikan *UAV* dengan kemampuan sensitif untuk menghindari tabrakan, dan kecepatan dalam situasi ini dapat diabaikan ketika gaya tolak antara dua *UAV*. Demikian pula dengan adanya masalah minimum lokal setelah mempertimbangkan pengaruh *UAV* lain, maka faktor jarak $(r_i - r_{targ})^n$

dikalikan sebagai solusi dari fungsi potensial tolak menolak. Maka, fungsi potensial tolak menolak yang dihasilkan oleh UAV lainnya adalah

$$U_{rep}(i) = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r_{ij})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (r_i - r_{targ})^n, & \rho(r_{ij}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(r_{ij}) > \rho_0 \end{cases}$$

$$U_{rep}(i) = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r_{ij})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (r_i - r_{targ})^n, & \rho(r_{ij}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(r_{ij}) > \rho_0 \end{cases} \quad (2.59)$$

Demikian pula, gaya tolak yang dihasilkan oleh UAV adalah jumlah gradien negatif dari fungsi potensial. Setelah menangani perencanaan lintasan kolaboratif dan penghindaran tabrakan, diteliti potensi masalah jebakan medan dan fenomena *jittering*. Potensi medan perangkap mengacu pada situasi ketika UAV bergerak ke posisi tertentu dimana sudut antara arah resultan gaya dan arah gerakan UAV adalah 180 derajat. UAV akan terus merencanakan lintasan, tetapi gerakan sebenarnya telah berhenti. Masalah *jitter* terjadi ketika resultan gaya arah UAV terus menerus berubah tiba-tiba di dekat rintangan, menyebabkan UAV goyah. Dari definisi tersebut, jebakan medan potensial adalah tipe khusus dari fenomena *jitter*. Metode penyesuaian langkah dinamis digunakan untuk memecahkan masalah ini.

Metode penyesuaian langkah dinamis tidak hanya mengubah arah gerakan UAV dengan tepat tetapi juga mengurangi langkah ketika arah gaya yang dihasilkan dari dua langkah yang berdekatan berubah secara signifikan, sehingga UAV dapat dengan lembut keluar dari area *jitter*. Pada titik ini, langkah selanjutnya dari UAV adalah

$$x_{n+1} = x_n + f_j * l * \cos \left(\theta_{n-1} + \frac{1}{2} \Delta \theta_n \right)$$

$$y_{n+1} = y_n + f_j * l * \sin \left(\theta_{n-1} + \frac{1}{2} \Delta \theta_n \right) \quad (2.60)$$

$$\theta_0 < |\Delta \theta_n| < 180^\circ$$

dimana $\Delta \theta_n$ adalah sudut arah dari dua anak tangga yang berdekatan, dan θ_0 adalah ambang yang diatur sesuai dengan situasi aktual. $\Delta \theta_n > \theta_0$ menunjukkan bahwa

UAV mulai bergetar, f_j adalah faktor *jitter*, yang diatur untuk menyesuaikan panjang langkah.

Tabel 2.1 Rangkuman Kajian Pustaka

Tahun	Metode	Model Agen dan Formasi	Kontrol	Jenis Sumber	Jenis Rintangan
2004	IFCC [27]	Linier dinamik; kooperatif	<i>Information Flow and Cooperative Control</i>	-	-
2004	CSTTD [9]	Linier Integrator; kooperatif, perubahan topologi	<i>Consensus in network of agents with Switching Topology and Time-Delays</i>	-	-
2005	CSNSF [8]	Linier; kooperatif	<i>Consensus filter for Sensor Network and Sensor Fusion</i>	-	-
2007	DMVCC [6]	Integrator, Integrator ganda; kooperatif, leader-follower	<i>Distributed Multi-Vehicle Coordinated Control</i>	-	-
2014	MDCSN [12]	<i>Sensing with noise</i> ; kooperatif	<i>Modified Distributed Consensus for Sensor Networks</i>	-	-
2014	GEFC [10], [11]	Integrator, Integrator ganda; kooperatif	<i>Gradient Estimation and Formation Control</i>	Single Optima, diam	-
2015	APF [13]	<i>Two-wheeled mobile robot</i> ; kooperatif, Komplit graf	<i>Formation Control and APF</i>	-	Satu rintangan, diam
2017	OAPF [14]	UAV; kooperatif	<i>Optimized Artificial Potential Field</i>	-	Banyak rintangan diam 3D

Tahun	Metode	Model Agen dan Formasi	Kontrol	Jenis Sumber	Jenis Rintangan
2018	IAPF [15]	<i>Fixed-Wing</i> ; kooperatif	<i>Improved Artificial Potential Field</i>	-	Satu rintangan, diam
2019	VAPF [39]	<i>UAV</i> ; satu <i>UAV</i>	<i>Virtual Artificial Potential Field</i>	-	Dua rintangan diam
2020	DSES [40]	Integrator; kooperatif	<i>Distributed Stochastic Extremum Seeking</i>	<i>Single Optima</i> , diam	-
2021	VAPF [41]	<i>UAV</i> ; satu <i>UAV</i>	<i>Virtual Artificial Potential Field</i>	-	Satu rintangan diam, satu rintangan gerak
2022	DAPS [42]	Integrator; kooperatif	<i>Distributed Active Perception Strategy</i>	<i>Single Optima</i> , diam	-
2022	RCC [43]	<i>Hybrid dynamical systems</i> ; kooperatif	<i>Robust Coordinated Control</i>	<i>Single Optima</i> , diam	Satu rintangan
2023	SC-MAPF	Integrator, Integrator ganda; kooperatif	<i>Strategic Control and Modified Artificial Potential Field</i>	<i>Single Optima</i> , bergerak	Dua rintangan diam, satu rintangan gerak

BAB 3

KONTROL STRATEGIS

PENCARIAN SUMBER BERGERAK

Bab ini menjelaskan rancangan kontrol strategis pencarian sumber bergerak terdiri dari 3 usulan topik yang berkelanjutan yakni perubahan formasi dan topologi pencarian sumber, kontrol kecepatan terdistribusi pada kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak, dan kontrol strategis pada kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan.

3.1 Perubahan Topologi dan Formasi Pencarian Sumber

Dalam menguji kehandalan kooperatif multi-agen untuk mencari sumber dengan diberikan perubahan formasi dan topologi, diusulkan 4 macam perubahan formasi dan topologi. Pada setiap perubahan formasi, dengan kontrol formasi maka akan berubah formasi saat ini menjadi formasi berikutnya secara acak. Sedangkan setiap perubahan topologi yang terjadi serentak dengan perubahan formasi, akan berubah dari topologi saat ini menjadi topologi berikutnya secara acak. Perubahan topologi akan mempengaruhi hasil perhitungan estimasi gradien. Bila formasi senantiasa bisa dicapai sesuai dengan urutan perubahan formasi, maka hasil estimasi gradien masih akurat untuk digunakan dalam pencarian sumber, sehingga sumber bisa dicapai.

3.1.1 Deskripsi Masalah

Diberikan bidang skalar $\psi = \psi(r)$ yang merupakan pemetaan $\psi: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^+$, dimana $p = 1, 2$, atau 3 dan $r \in \mathbb{R}^p$ yang menentukan koordinat posisi agen dalam ruang, misal $p = 3, r = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^p$. Sumber tercapai dengan ditunjukkan oleh nilai maksimum ψ . Masalah pencarian sumber adalah mencari nilai r sehingga medan skalar ψ maksimum. Hal ini dapat dirumuskan dengan persamaan optimasi berikut

$$r^* = \arg \max \psi(r) \tag{3.1}$$

Dalam penelitian ini, dinyatakan asumsi sebagai berikut

- Asumsi 1, bidang skalar sumber $\psi(r)$ hanya memiliki maksimum tunggal.

- Asumsi 2, koperasi multi-agen memiliki 7 agen dan perubahan formasi hanya memiliki bentuk formasi seperti pada Gambar 3.2 (a)-(d).
- Asumsi 3, perubahan topologi kooperatif multi-agen hanya memiliki topologi tertentu seperti pada Gambar 3.2 (a)-(d). Ini bukan *disconnected* multi-agen.

3.1.2 Teori Graf

$\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ adalah graf tidak berarah untuk memodelkan kooperatif multi-agen, dimana himpunan *vertices* $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ dan himpunan *edges* $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$. Setiap *vertex* mewakili agen dan setiap *edge* adalah komunikasi antara dua agen yang berdekatan. *Edge* $(i, j) \in \mathcal{E}$ menunjukkan bahwa agen i mengirimkan informasi ke agen j , dan $N_i = \{i \in \mathcal{V}: a_{ij} \neq 0\}$ adalah himpunan tetangga agen i .

Matriks *adjacency* $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ untuk $a_{ij} = 1$, jika agen i dan agen $j \in \mathcal{V}$ saling berkomunikasi dan $a_{ij} = 0$ untuk sebaliknya. Perhatikan bahwa \mathcal{A} simetris. Matriks Laplacian $\mathcal{L} = \Delta - \mathcal{A}$, dimana $\Delta = \text{diag}(\mathcal{A} \cdot \mathbf{1})$ adalah matriks diagonal dengan derajat agen adalah elemen diagonal, yaitu $\Delta_{ii} = d_i = \sum_j a_{ij}$ dan $\mathbf{1} = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathbb{R}^N$ adalah vektor dengan nilai 1 pada setiap elemennya. *Right eigenvector* matriks \mathcal{L} adalah eigenvektor dari nilai eigenvalue $\lambda_1 = 0$ dan $\mathcal{L} \cdot \mathbf{1} = 0$. Nilai eigenvalue terkecil kedua λ_2 menentukan tingkat konvergensi dari algoritma. $|N_i|$ adalah jumlah tetangga dalam himpunan tetangga N_i , dan \otimes adalah hasil kali Kronecker.

3.1.3 Sumber Diam

Untuk kebutuhan simulasi dan analisis kooperatif multi-agen pencarian sumber diam, digunakan fungsi skalar sumber diam. Dalam membuat fungsi skalar sumber diam, digunakan fungsi skalar sumber diam seperti berikut

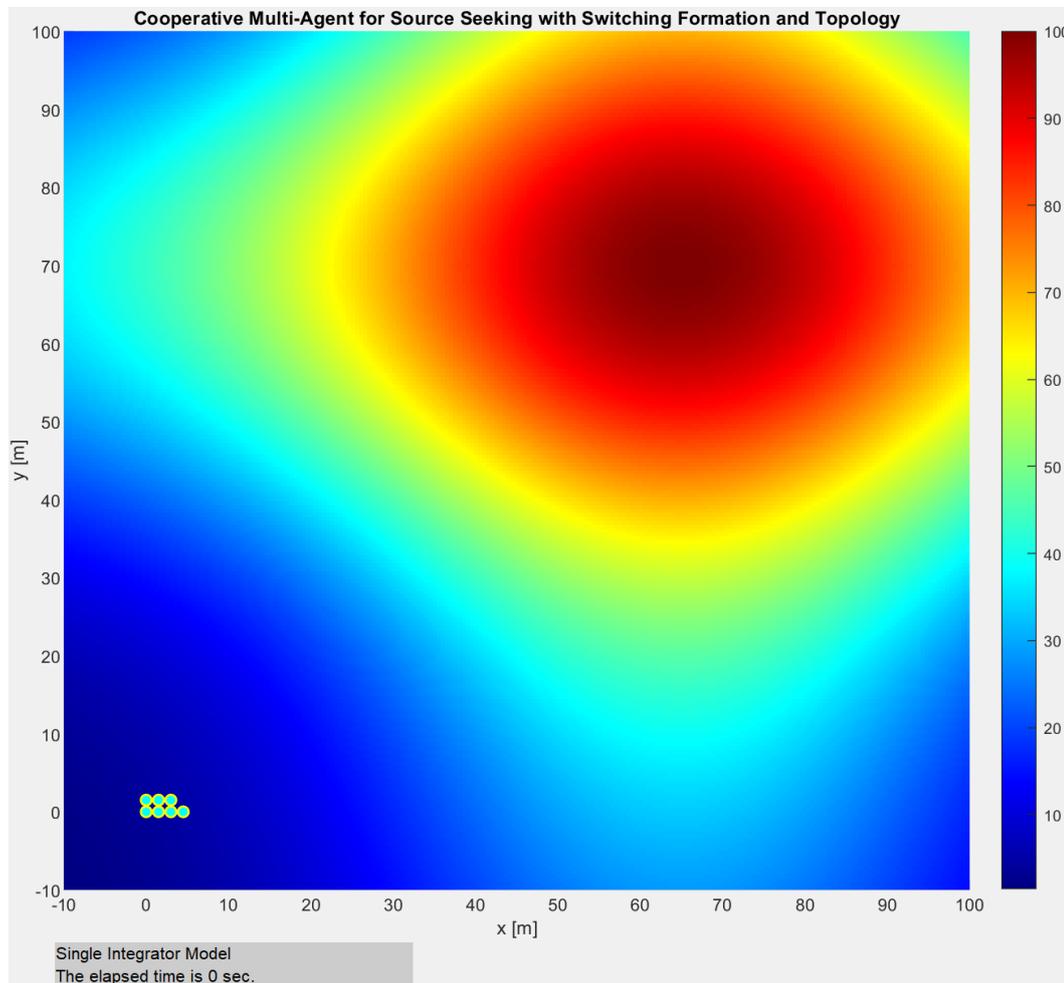
$$\psi(x, y) = A_1 e^{-\frac{(x-x_1)^2}{\sigma_{x_1}^2} - \frac{(y-y_1)^2}{\sigma_{y_1}^2}} + A_2 e^{-\frac{(x-x_2)^2}{\sigma_{x_2}^2} - \frac{(y-y_2)^2}{\sigma_{y_2}^2}} \quad (3.2)$$

Representasi fungsi skalar sumber diam seperti pada Gambar 3.1, dimana nilai intensitas sumber dinyatakan dalam gradasi warna mulai warna biru hingga merah. Nilai intensitas ini diskala dengan mulai nilai 0 hingga 100. Dimulai dari

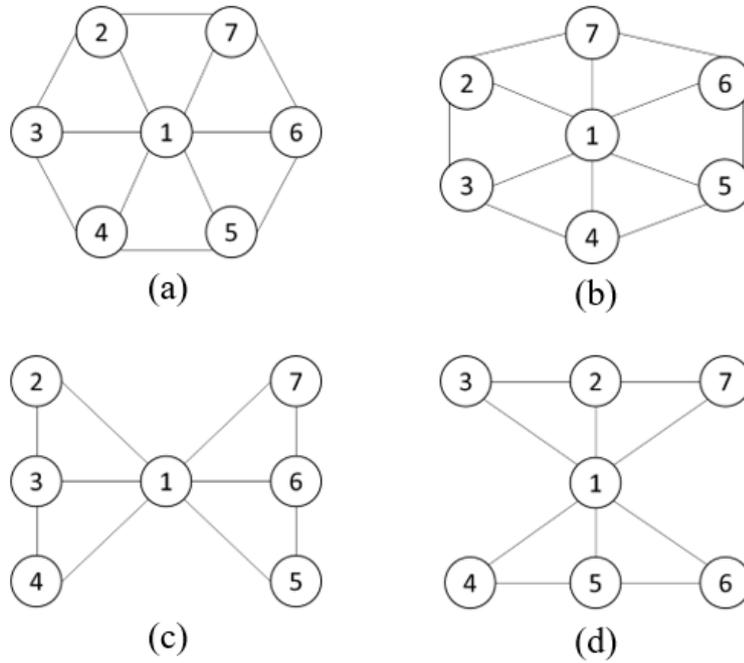
warna biru yang menyatakan nilai intensitas terendah yakni dengan nilai skala 0, dan diakhiri warna merah yang menyatakan nilai intensitas tertinggi dengan nilai skala 100.

3.1.4 Perubahan Formasi dan Topologi

Diasumsikan, kooperatif multi-agen mengalami perubahan 4 formasi dan 4 topologi [9], [44], yakni $\{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \mathcal{G}_3, \mathcal{G}_4\}$, seperti pada Gambar 3.2, dimana $\mathcal{G}_1 = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_1)$, $\mathcal{G}_2 = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_2)$, $\mathcal{G}_3 = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_3)$, $\mathcal{G}_4 = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_4)$. Perubahan formasi dan topologi ini bisa disebabkan karena cuaca atau yang lainnya.



Gambar 3.1 Fungsi Skalar Sumber Diam



Gambar 3.2 Perubahan Formasi dan Topologi $\{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \mathcal{G}_3, \mathcal{G}_4\}$

3.1.5 Formasi Berbasis Konsensus dan Kontrol Formasi

Pada bagian ini, membahas estimasi gradien dari masing-masing agen, konsensus gradien, dan kontrol formasi yang melibatkan gradien medan skalar dari pembentukan kooperatif multi-agen dalam pencarian sumber.

3.1.5.1 Estimasi Gradien

Dalam estimasi gradien berbasis kooperatif multi-agen, setiap agen memperkirakan gradiennya sendiri dan agen yang terhubung menerima estimasi dari tetangganya untuk menghitung konsensus gradien. Diusulkan metode untuk menghitung estimasi gradien yang didasarkan pada kuadrat terkecil [10], [35].

Setiap agen i mengukur intensitas ψ dari posisinya, yang disimbolkan dengan $\psi_i = \psi(r_i)$, dimana $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Mengingat posisi agen j, r_j , yang dekat dengan agen i, r_i , estimasi dapat dihitung dengan menggunakan deret Taylor. Estimasi di ψ_j diberikan r_i dengan

$$\psi(r_j) \approx \psi(r_i) + (r_j - r_i)^T \hat{g}(r_i) \quad (3.3)$$

Agen j adalah agen tetangga yang mengirimkan informasi ke agen i , $\hat{\mathbf{g}}(r_i)$ diperkirakan gradien dihitung oleh agen i , misal $p = 3$, $\hat{\mathbf{g}}(r_i) = [\hat{\mathbf{g}}_x(r_i)\hat{\mathbf{g}}_y(r_i)\hat{\mathbf{g}}_z(r_i)]^T$. Jika agen i memiliki $|N_i|$ tetangga, (3.3) menjadi

$$\begin{bmatrix} \psi(r_1) - \psi(r_i) \\ \psi(r_2) - \psi(r_i) \\ \vdots \\ \psi(r_{|N_i|}) - \psi(r_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1 - r_i)^T \\ (r_2 - r_i)^T \\ \vdots \\ (r_{|N_i|} - r_i)^T \end{bmatrix} \hat{\mathbf{g}}(r_i) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{g}}_i$$

dimana $\mathbf{b}_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times 1}$, $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times p}$, dan $\hat{\mathbf{g}}(r_i) = \hat{\mathbf{g}}_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. Masalah ini dapat diselesaikan dengan menggunakan metode *linear least square*

$$\hat{\mathbf{g}}_i = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{b}_i \quad (3.5)$$

3.1.5.2 Konsensus Gradien

Algoritma konsensus telah diusulkan oleh Olfati-Shamma [8]. Mereka mengusulkan algoritma filter konsensus rata-rata untuk jaringan sensor yang terdistribusi secara spasial. Dalam algoritma, setiap sensor menerima input dari tetangganya dan memperkirakan rata-ratanya. Rosero dan Werner [12], memodifikasi konsensus pada [8] dengan *tuning* parameter β , dan menerapkan konsensus gradien pada [10], sebagai berikut

$$\bar{\mathbf{g}}_i = \beta \sum_{j \in N_i} a_{ij} e_{g_{ij}}(t) + \beta(1 + d_i)(\hat{\mathbf{g}}_i(t) - g_i(t)) \quad (3.6)$$

dimana

$$e_{g_{ij}}(t) = (\hat{\mathbf{g}}_i(t) - g_i(t)) - (\hat{\mathbf{g}}_j(t) - g_j(t))$$

dan $\beta \geq 1$ merupakan parameter kontrol untuk melacak kinerja gradien saat agen bergerak. Dengan menggunakan definisi matriks Laplacian \mathcal{L} , diperoleh persamaan terintegrasi sebagai berikut

$$\bar{\mathbf{g}} = -\beta(I_N \otimes I_p + \Delta \otimes I_p + \mathcal{L} \otimes I_p) \mathbf{g} + \beta(I_N \otimes I_p + \Delta \otimes I_p + \mathcal{L} \otimes I_p) \hat{\mathbf{g}} \quad (3.7)$$

sehingga persamaan tersebut menjadi

$$\bar{\mathbf{g}} = \beta(-\mathbf{A} \mathbf{g} + \mathbf{A} \hat{\mathbf{g}}) \quad (3.8)$$

3.1.5.3 Kontrol Formasi yang Dimodifikasi Melibatkan Gradien Medan Skalar

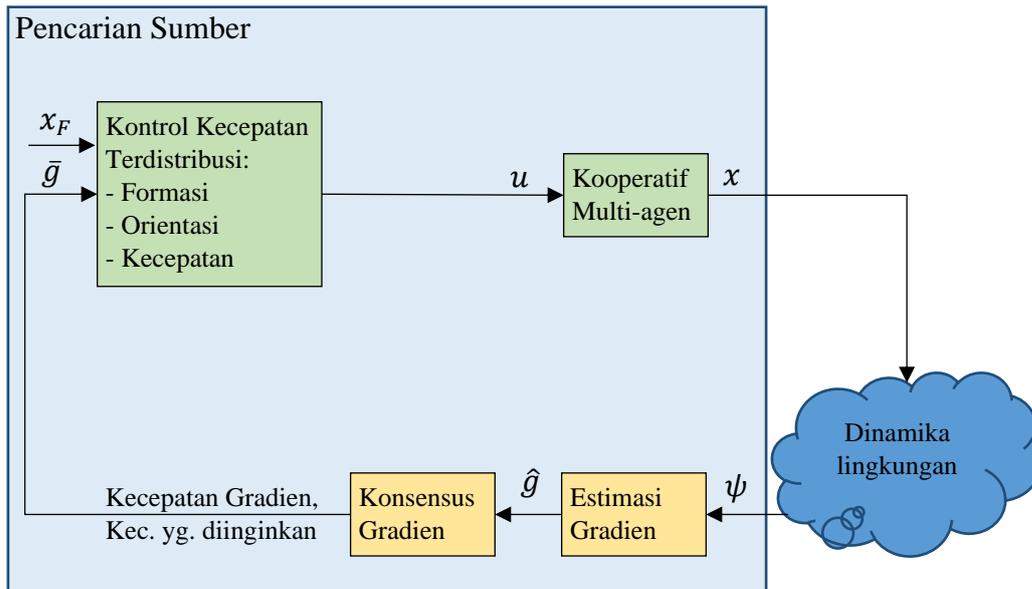
Kontrol kecepatan terdistribusi untuk kooperatif multi-agen digunakan dalam pencarian sumber, seperti pada [10]. Dalam penelitian ini kontrol terdistribusi dibagi menjadi 3 bagian, yaitu kontrol formasi, pelacakan kecepatan gradien, dan pelacakan kecepatan antar agen. Kontrol formasi dapat dirumuskan sebagai berikut $k_F \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_{F_i} - r_{F_j}) - (r_i - r_j) - \theta(v_i - v_j)$. Sedangkan pelacakan kecepatan gradien adalah $k_T(\hat{g}_i - \gamma v_i)$. Dan pelacakan kecepatan antar agen adalah $k_H(\hat{h}_i - \beta \dot{v}_i)$. Dari ketiga bagian tersebut, dengan hukum superposisi, aturan dasar dari sinyal kontrol terdistribusi adalah sebagai berikut

$$u_i = k_F \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_{F_i} - r_{F_j}) - (r_i - r_j) - \theta(v_i - v_j) + k_T(\hat{g}_i - \gamma v_i) + k_H(\hat{h}_i - \beta \dot{v}_i) \quad (3.9)$$

dimana koefisien $k_F, \theta, k_T, \gamma, k_H$, dan β adalah positif.

3.2 Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak

Rancangan kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dijelaskan dalam diagram, seperti pada Gambar 3.3. Blok kuning adalah penggunaan metode dari referensi lain, dan blok hijau adalah usulan metode disertasi ini. Intensitas



Gambar 3.3 Diagram Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak

sumber terukur oleh setiap agen dimanapun berada dan setiap saat. Karena semua agen dibekali sensor untuk mengukur intensitas sumber dan posisi agen. Dengan adanya kooperatif multi-agen melalui formasi dan topologi tertentu, satu agen juga akan mendapatkan informasi intensitas sumber beserta posisi agen *neighbor*-nya. Dari informasi tersebut, maka setiap agen dapat melakukan estimasi gradien. Hasil estimasi gradien tiap agen adalah berbeda, dengan konsensus gradien maka akan didapatkan nilai gradien yang mendekati sama (konvergen) pada semua agen.

3.2.1 Deskripsi Masalah

Diberikan medan skalar $\psi = \psi(r)$ yang merupakan pemetaan $\psi: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^+$, dimana $p = 1, 2$, atau 3 dan $r \in \mathbb{R}^p$ yang menentukan koordinat posisi agen dalam ruang. Kemampuan penginderaan agen diilustrasikan oleh $p = 2, r = [x \ y]^T \in \mathbb{R}^2$. Sumber ditemukan ditunjukkan oleh nilai maksimum ψ . Masalah pencarian sumber adalah mencari nilai r sedemikian hingga medan skalar ψ maksimum. Ini dapat dirumuskan dengan persamaan optimasi (3.1).

Fungsi skalar sumber bergerak diperlukan untuk simulasi dan analisis kooperatif pencarian sumber oleh kooperatif multi-agen. Seperti yang ditunjukkan pada fungsi skalar sumber diam yang digunakan pertama kali, kemudian dikembangkan dengan fungsi skalar sumber bergerak. Fungsi skalar sumber diam dirumuskan pada persamaan (3.2).

Kemudian, puncak fungsi skalar berada di $(x, y) = (x_1, y_1)$ dan (x_2, y_2) dapat dipindahkan secara linier atau sinusoidal dengan kecepatan tertentu. Bisa juga dilakukan untuk menskalakan fungsi skalar sehingga menjadi ekspansi atau kontraksi dari sebelumnya. Karena terdapat dua titik puncak dan kecepatan skalar konstan v_x, v_y terjadi pada sumbu- x dan sumbu- y , maka dapat didefinisikan sebagai gerak linier titik puncak pada (3.2), dengan pergerakan posisi

$$x_x(t) = v_x t [1 \ 1]^T \quad (3.10)$$

pada sumbu- x , dan

$$x_y(t) = v_y t [1 \ 1]^T \quad (3.11)$$

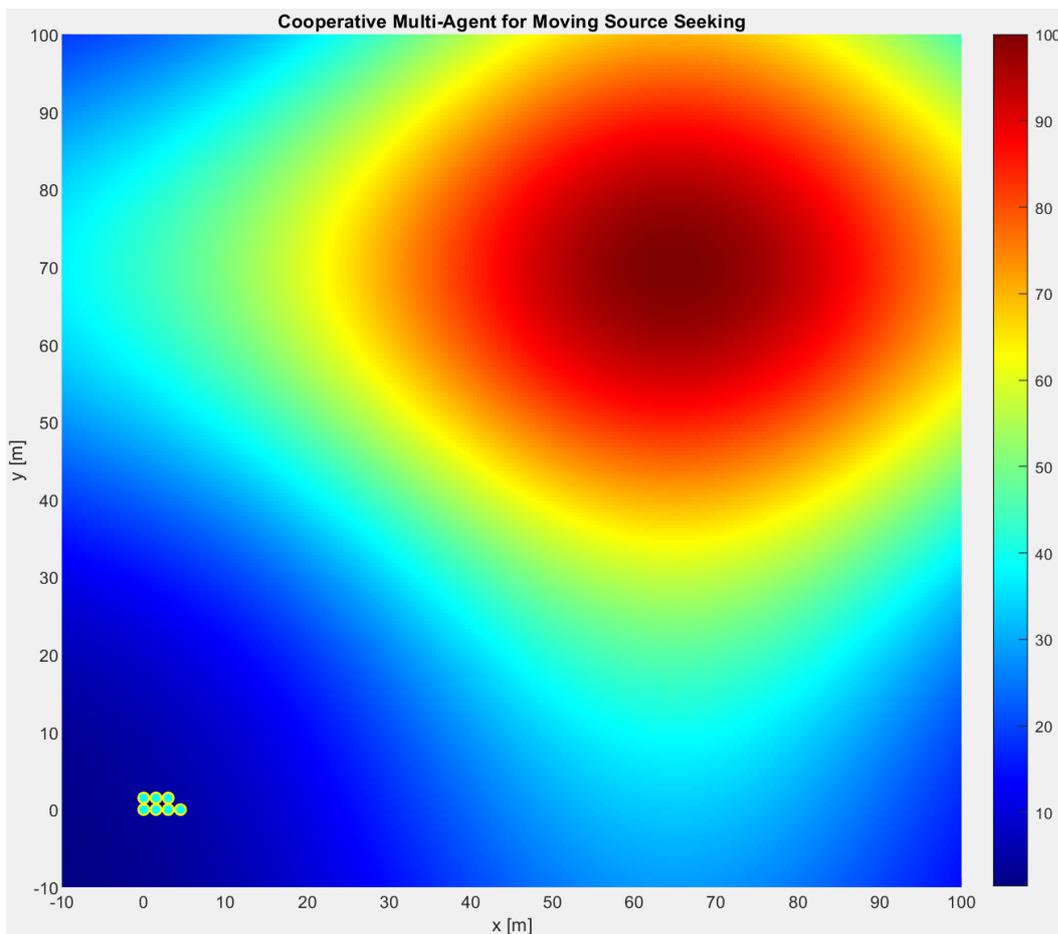
pada sumbu-y, dimana $x_x = [x_1 \ x_2]^T$ adalah posisi pada sumbu-x, dan $x_y = [y_1 \ y_2]^T$ adalah posisi pada sumbu-y. Istilah ini $[1 \ 1]^T$ digunakan untuk menunjukkan vektor kolom dengan panjang 2 dan kedua entri 1. Sedangkan perumusan untuk gerakan sinusoidal dari titik puncak fungsi skalar dibuat dua macam, yaitu gerakan sinusoidal baik pada sumbu-x atau sumbu-y saja, dalam hal ini, tidak ada penggunaan kombinasi keduanya.

Gerakan sumber sinusoidal direpresentasikan sebagai

$$x_x(t) = (v_x t + A \sin(\omega t)) [1 \ 1]^T \quad (3.12)$$

pada sumbu-x, dan

$$x_y(t) = v_y t [1 \ 1]^T \quad (3.13)$$



Gambar 3.4 Fungsi Skalar Sumber Bergerak ψ

pada sumbu- y , dimana A adalah amplitudo sinus dan ω adalah kecepatan sudut. Menggunakan rumus fungsi penyekalaan, perpindahan ke fungsi skalar menjadi ekspansi atau kontraksi dibandingkan sebelumnya, seperti

$$\sigma(t + t_s) = \alpha(\sigma(t)) \quad (3.14)$$

dimana $\sigma = [\sigma_{x_1} \sigma_{y_1} \sigma_{x_2} \sigma_{y_2}]^T$. Parameter waktu yang bervariasi dari pergerakan fungsi skalar α pada (3.14) dapat dikategorikan ekspansi atau kontraksi jika nilai parameter $\alpha > 1$ atau $\alpha < 1$, berturut-turut. Dalam penelitian ini, eksperimen ekspansi dan kontraksi dipertimbangkan dalam eksperimen yang sama, yaitu nilai dari α dapat berubah seiring waktu.

Dalam penelitian ini, asumsi berikut ditetapkan

- Asumsi 1, bidang skalar sumber $\psi(r)$ hanya memiliki satu maksimum.
- Asumsi 2, medan skalar bergerak sumber memiliki gerakan garis lurus, sinusoidal, ekspansi, dan kontraksi.
- Asumsi 3, kooperatif multi-agen memiliki topologi komunikasi yang diwakili oleh graf tidak berarah dan terhubung.

3.2.2 Sumber Bergerak

Untuk kebutuhan simulasi dan analisis kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak, digunakan fungsi skalar sumber bergerak. Dalam membuat fungsi skalar sumber bergerak, semula digunakan fungsi skalar sumber statis terlebih dahulu, seperti pada persamaan (3.2), dimana nilai parameter fungsi skalar tersebut seperti pada Tabel 3.1.

Kemudian titik puncak fungsi skalar tersebut yakni (x_1, y_1) dan (x_2, y_2) dapat digerakkan secara linier atau sinusoidal dengan kecepatan tertentu. Juga dapat dilakukan penyekalaan fungsi skalar tersebut sehingga fungsi skalar menjadi mengembang atau menyempit dari sebelumnya.

Karena terdapat 2 titik puncak dan kecepatan v_x, v_y terjadi pada sumbu- x dan sumbu- y , maka dapat didefinisikan pergerakan linier titik puncak dengan

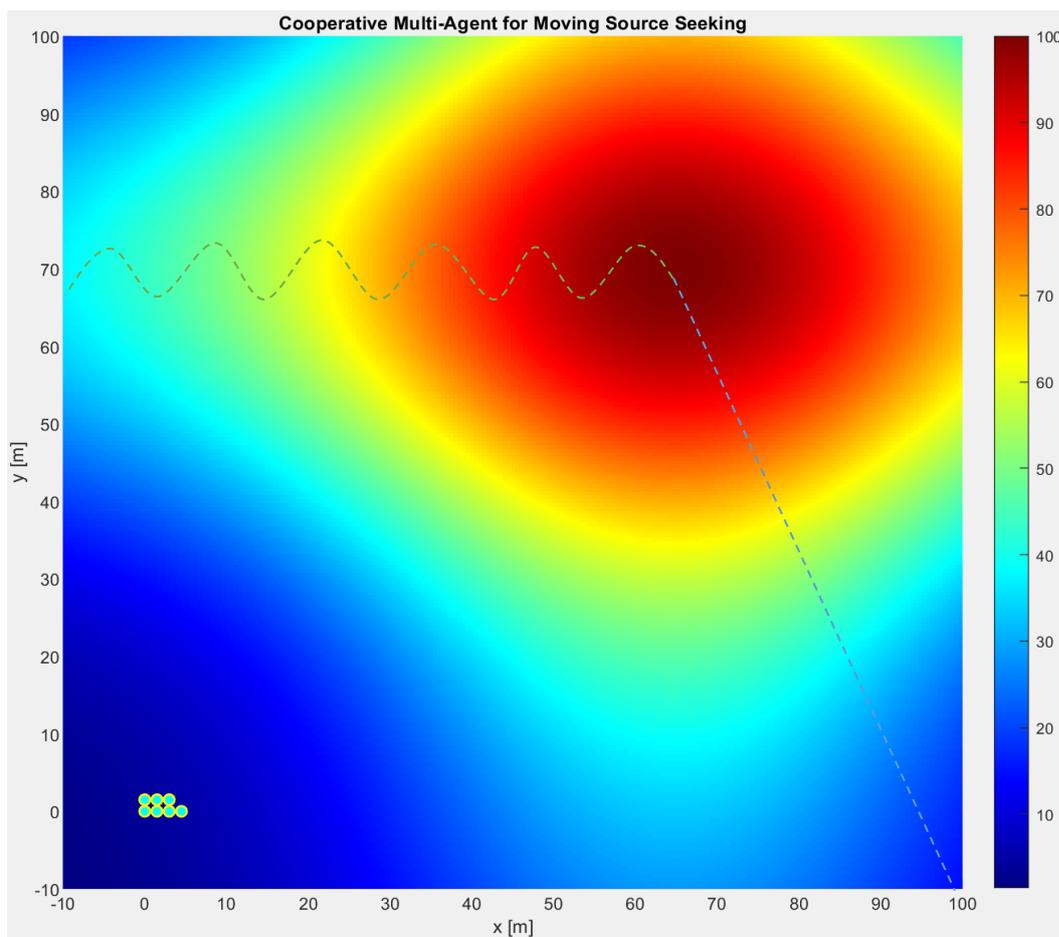
$$x_x[k + 1] = x_x[k] + v_x k [1 \ 1]' \text{ pada sumbu-}x, \text{ dan}$$

$$x_y[k + 1] = x_y[k] + v_y k [1 \ 1]' \text{ pada sumbu-}y.$$

dimana $x_x = [x_1 \ x_2]'$ adalah posisi pada sumbu- x , dan $x_y = [y_1 \ y_2]'$ adalah posisi pada sumbu- y .

Tabel 3.1 Parameter Fungsi Skalar Sumber Bergerak

Parameter	Nilai
A_1	50 [m]
x_1	65 [m]
y_1	70 [m]
σ_{x_1}	30
σ_{y_1}	75
A_2	50 [m]
x_2	65 [m]
y_2	70 [m]
σ_{x_2}	90
σ_{y_2}	25



Gambar 3.5 Fungsi Skalar Sumber Bergerak Linier dan Sinusoidal

Sedangkan formulasi untuk pergerakan sinusoidal titik puncak fungsi skalar, dibuat 2 macam yakni pergerakan sinusoidal pada sumbu- x atau pada sumbu- y saja, dalam hal ini tidak digunakan kombinasi keduanya. Untuk pergerakan sinusoidal pada sumbu- x adalah

$$x_x[k + 1] = x_x[k] + v_x k[1 \ 1]' + A_s \sin(\omega k)[1 \ 1]' \text{ pada sumbu-}x, \text{ dan}$$

$$x_y[k + 1] = x_y[k] + v_y k[1 \ 1]' \text{ pada sumbu-}y.$$

dimana A adalah amplitudo sinus, dan ω adalah frekuensi sudutnya. Untuk pergerakan sinusoidal pada sumbu- y , seperti rumus diatas, hanya saja rumus pada sumbu- x menggunakan gerakan linier dan gerakan sumbu- y menggunakan gerakan sinusoidal. Parameter yang digunakan pada pergerakan linier dan sinusoidal dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Pergerakan Linier dan Sinusoidal

Parameter	Nilai
v_x	0.002 [m/s]
v_y	-0.005 [m/s]
A_s	0.2 [m]
ω	2 [rad/s]

Untuk pergerakan penyekalaan fungsi skalar menjadi mengembang atau menyusut dibandingkan dengan sebelumnya, menggunakan rumus

$$\sigma[k + 1] = \alpha \sigma[k] \tag{3.15}$$

dimana $\sigma = [\sigma_{x_1} \ \sigma_{y_1} \ \sigma_{x_2} \ \sigma_{y_2}]^T$, dan parameter α yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

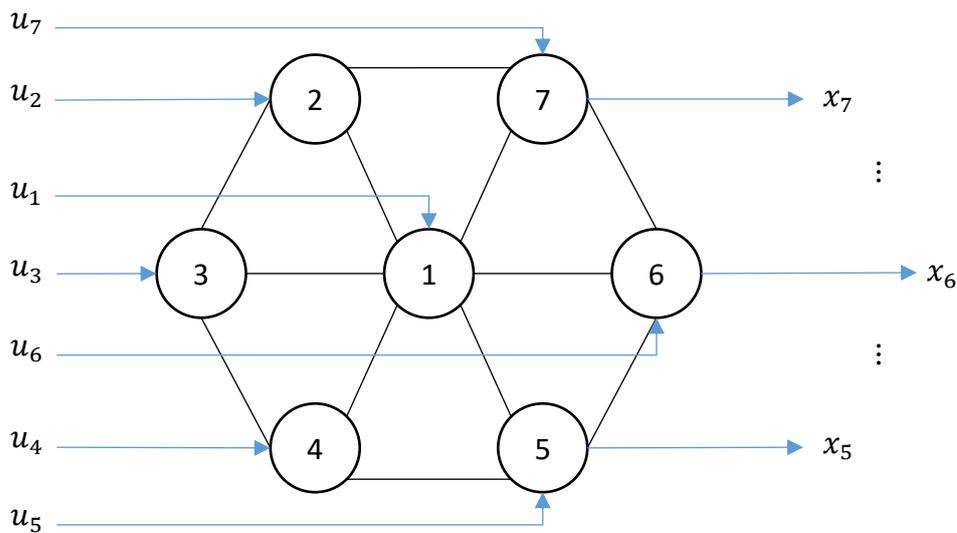
Tabel 3.3 Parameter Penyekalaan Fungsi Skalar

Parameter	Nilai	Penyekalaan
α	1.002	$\alpha > 1$ expansion
α	0.998	$\alpha < 1$ contraction

Kombinasi perubahan dari keadaan mengembang ke menyempit dan seterusnya, diberikan durasi selama 4 detik untuk setiapnya.

3.2.3 Kooperatif Multi-Agen

Kooperatif multi-agen yang digunakan terdiri dari 7 agen, sedangkan formasi dan topologi kooperatif multi-agen ditunjukkan seperti pada Gambar 3.6. Trayektori multi-agen, dengan state multi-agen x_i bergantung dari sinyal kontrol agen u_i dan hasil konsensus gradiennya.



Gambar 3.6 Diagram Kooperatif Multi-Agen

3.2.4 Estimasi Gradien dan Konsensus Gradien

Bagian ini membahas estimasi gradien masing-masing agen dan konsensus gradien pembentukan kooperatif multi-agen dalam pencarian sumber.

3.2.4.1 Estimasi Gradien

Dalam estimasi gradien berbasis multi-agen, setiap agen mempunyai gradiennya sendiri, dan agen yang terhubung menerima estimasi dari tetangganya untuk menghitung konsensus gradien. Metode yang diusulkan untuk menghitung estimasi gradien didasarkan pada kuadrat terkecil [10], [35].

Setiap agen i mengukur intensitas medan skalar ψ dimanapun posisi agen. Dilambangkan dengan $\psi_i = \psi(r_i)$, dimana $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Mengingat posisi agen j, r_j , yang dekat dengan agen i, r_i , estimasi dapat dihitung dengan

menggunakan deret Taylor orde satu. Estimasi di ψ_j diberikan r_i pada (3.3), dimana $\hat{\mathbf{g}}(r_i)$ estimasi gradien dihitung oleh agen i . Untuk $p = 2$, perkiraan gradien menjadi $\hat{\mathbf{g}}(r_i) = [\hat{\mathbf{g}}_x(r_i)\hat{\mathbf{g}}_y(r_i)]^\top$. Jika agen i memiliki $|N_i|$ tetangga, maka (3.3) menjadi (3.4), dimana $b_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times 1}$, $A_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times p}$, dan $\hat{\mathbf{g}}_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. Masalah ini dapat diselesaikan dengan menggunakan metode *least square* (3.5).

3.2.4.2 Konsensus Gradien

Algoritma konsensus diusulkan oleh Olfati-Saber dan Shamma [8] yakni filter konsensus rata-rata untuk jaringan sensor yang didistribusikan secara spasial. Dalam algoritma ini, setiap sensor menerima masukan dari tetangganya, mengestimasi, dan kemudian menghitung rata-ratanya. Konsensus rata-rata diterapkan pada konsensus gradien (3.6), dimana eror relatif gradien adalah

$$e_{g_{ij}}(t) = (\hat{g}_i(t) - g_i(t)) - (\hat{g}_j(t) - g_j(t))$$

dan $\beta \geq 1$ merupakan parameter kontrol untuk melacak kinerja gradien saat agen bergerak. Dengan menggunakan definisi graf Laplacian, diperoleh persamaan (3.7), dimana $\mathbf{I}_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$ dan $\mathbf{I}_p \in \mathbb{R}^{p \times p}$ adalah matriks identitas. Dengan demikian (3.7) dapat ditulis ulang sebagai (3.8), dimana $\mathbf{B} = \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_p + \Delta \otimes \mathbf{I}_p + \mathcal{L} \otimes \mathbf{I}_p$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{Np \times Np}$.

3.2.5 Kontrol Kecepatan Terdistribusi untuk Mencari Sumber Bergerak

Bagian ini menjelaskan persamaan dinamis dari agen individu i . Secara khusus, model integrator tunggal dua dimensi, yang digambarkan sebagai

$$\dot{x}_i = I_2 u_i \quad (3.16)$$

dimana u_i adalah sinyal kontrol yang ditentukan kemudian, dan $\dot{x}_i, u_i \in \mathbb{R}^2$. Model dua dimensi dipertimbangkan karena agen dapat mendeteksi medan skalar sumber dibawah model ini. Persamaan state terintegrasi ditulis sebagai

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_2) \mathbf{u} \quad (3.17)$$

dengan $\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{14}$ karena ada 7 agen bergerak dalam dua dimensi.

Penelitian ini memodifikasi kontrol terdistribusi untuk kooperatif multi-agen yang diusulkan dalam [10]. Penelitian ini membagi kontrol terdistribusi

menjadi dua bagian, yang disebut kontrol formasi dan pelacakan kecepatan . Bagian kontrol formasi dapat diformulasikan sebagai $k_F \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_{F_i} - r_{F_j}) - (r_i - r_j) - \theta(v_i - v_j) \right)$, sedangkan pelacakan kecepatan adalah $k_V(\bar{g}_i - \gamma v_i)$.

Dalam kontrol kecepatan dapat digunakan baik dari kecepatan gradien kooperatif multi-agen atau dari kecepatan yang diinginkan yang dikontrol secara manual. Dengan menerapkan hukum superposisi, aturan dasar yang didistribusikan ke semua agen diperoleh sebagai berikut

$$u_i = k_F \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (r_{F_i} - r_{F_j}) - (r_i - r_j) - \theta(v_i - v_j) \right) + k_V(\bar{g}_i - \gamma v_i) \quad (3.18)$$

dimana koefisien k_F, θ, k_V, γ bernilai positif. Koefisien k_F dan k_V menunjukkan bobot gerakan masing-masing berdasarkan kontrol formasi dan pelacakan kecepatan.

Dalam persamaan (3.18), istilah $k_V(\bar{g}_i - \gamma v_i)$ dihitung dengan dua cara berbeda, pertama dengan menggunakan konsensus gradien \bar{g}_i yang disebut dengan kecepatan gradien dan dengan menggabungkan kecepatan gradien dengan kecepatan konstan yang disebut kecepatan yang diinginkan. Pendekatan konsensus gradien telah digunakan dalam hasil sebelumnya [35] untuk menangani eksperimen sumber statis. Di sisi lain, dalam eksperimen kecepatan yang diinginkan, \bar{g}_i diganti dengan konstanta v_d untuk selang waktu tertentu. Penggunaan kecepatan yang diinginkan dapat mengurangi kecepatan puncak gerakan agen yang lebih tinggi tanpa mengorbankan kinerjanya. Kondisi seperti ini dapat menganggap kecepatan yang diinginkan ini sebagai fase jelajah agen dengan *cruise control*.

Selanjutnya dianalisis interaksi antara kecepatan dan sumber bergerak. Satu masalah yang mungkin timbul untuk mengejar sumber bergerak adalah bahwa agen mungkin tidak dapat bergerak cukup dekat dengan sumbernya. Untuk itu, diasumsikan bahwa sumber tidak bergerak dengan kecepatan yang terlalu cepat, yaitu, diasumsikan bahwa terdapat waktu dimana kecepatan memenuhi $(\bar{g}_i - \gamma v_i) > v_x$ dan $(\bar{g}_i - \gamma v_i) > v_y$.

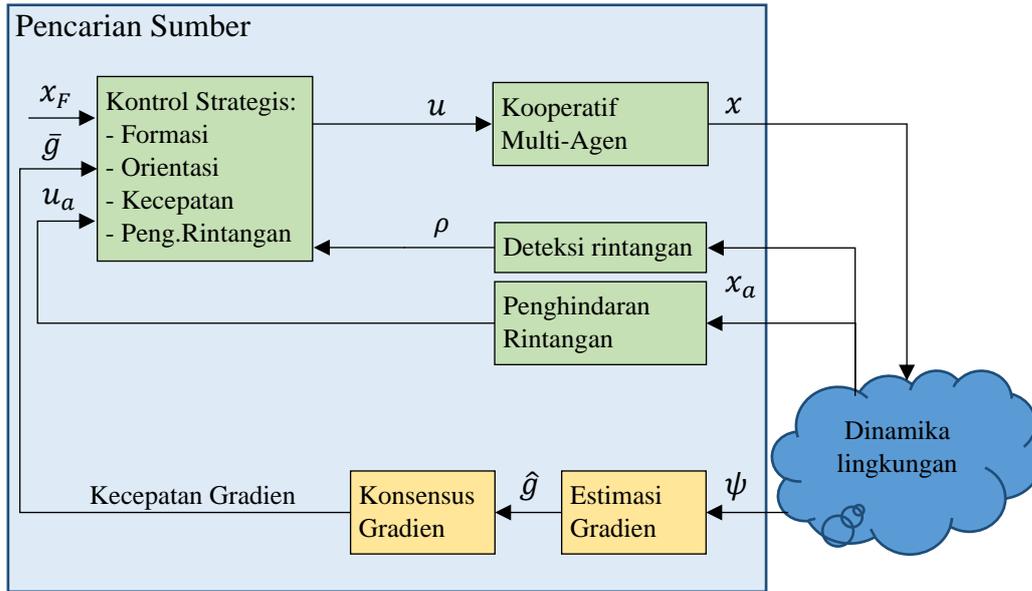
Selain itu, dapat dilihat bahwa agen perlu merespon dengan cepat karena medan skalar yang berubah seiring waktu. Karena itu, dapat dilihat bahwa hanya menggunakan kecepatan gradien untuk menentukan kecepatan agen mungkin tidak selalu optimal, dibandingkan dengan menggunakan kecepatan yang diinginkan.

3.3 Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Dengan Penghindaran Rintangan

Rancangan kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan dijelaskan dalam diagram, seperti pada Gambar 3.7. Blok kuning adalah penggunaan metode dari referensi lain, dan blok hijau adalah metode yang diusulkan pada disertasi ini. Rancangan ini merupakan kelanjutan dari rancangan sebelumnya, sehingga metode-metode yang ada sebelumnya juga digunakan pada rancangan ini. Disamping itu, terdapat tambahan metode dan permasalahan baru yakni formasi penghindaran rintangan, kontrol strategis, dan penyusutan formasi. Kontrol strategis dibutuhkan karena ada 2 kontrol yang berbeda, yakni kontrol kecepatan terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan, dan kontrol strategis merupakan kombinasi dari kedua control tersebut selama manuver, baik kondisi apakah formasi dapat mendeteksi rintangan atau tidak.

3.3.1 Sumber Bergerak Linier

Pada bagian ini, medan skalar dari sumber dijelaskan. Umumnya, agen seharusnya mencapai sumber bergerak yang menghasilkan medan skalar. Di sini dianggap medan skalar $\psi = \psi(r)$ yang merupakan pemetaan $\psi: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^+$, dimana $p = 1, 2$, atau 3 menunjukkan dimensi dan $r \in \mathbb{R}^p$ menentukan koordinat posisi agen dalam ruang. Dalam penelitian ini eksperimen dua dimensi, diasumsikan yaitu $p = 2$, $r = [x \ y]^T \in \mathbb{R}^2$. Sumber terletak pada nilai maksimum dari ψ , yang ingin dicapai oleh agen. Secara khusus, agen berusaha menemukan nilai yang $r(t)$ memaksimalkan medan skalar ψ . Ini dapat dirumuskan dengan persamaan optimasi (3.1).



Gambar 3.7 Diagram Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak dengan Penghindaran Rintangan

Awalnya, fungsi skalar sumber statis digunakan terlebih dahulu di $t = 0$, kemudian diikuti oleh fungsi skalar sumber bergerak. Fungsi skalar sumber bergerak yang mengandung satu puncak dan kombinasi dari dua kontur yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10, diformulasikan seperti pada persamaan (3.2).

Pada $t > 0$, puncak atau maksimum dari fungsi skalar pada $(x, y) = (x_1, y_1) = (x_2, y_2)$ bergerak dengan kecepatan tertentu sesuai dengan gerakan sumbernya gerakan linier dan sinusoidal. Pada penelitian ini, diasumsikan bahwa medan skalar sumber yang bergerak $\psi(r)$ hanya memiliki satu maksimum dan tidak ada maksimum lokal.

Pada bagian gerak linier, sumber bergerak dengan kecepatan skalar konstan v_x, v_y pada sumbu- x dan sumbu- y sebagai

$$x_x(t) = v_x t [1 \ 1]^T \quad (3.19)$$

$$x_y(t) = v_y t [1 \ 1]^T \quad (3.20)$$

dimana $x_x = [x_1 \ x_2]^T$ dan $x_y = [y_1 \ y_2]^T$ menunjukkan posisi puncak masing-masing pada sumbu- x dan sumbu- y .

Juga medan skalar dapat mengalami penyekalaan dalam bentuk ekspansi atau kontraksi. Secara khusus, dengan menggunakan rumus fungsi penyekalaan, pergerakan penyekalaan fungsi skalar dengan periode penyekalaan t_s ditentukan seperti pada persamaan (3.15), dimana $\sigma = [\sigma_{x_1} \ \sigma_{y_1} \ \sigma_{x_2} \ \sigma_{y_2}]^T$. Pergerakan dari σ dalam (3.15) dapat dikategorikan sebagai ekspansi atau kontraksi jika $\alpha > 1$ atau $\alpha < 1$, berturut-turut. Di sini, eksperimen pengembangan dan penyusutan dipertimbangkan dalam eksperimen yang sama, yaitu nilai dari α dapat berubah seiring waktu.

3.3.2 Estimasi Gradien dan Konsensus Gradien

Bagian ini membahas estimasi gradien masing-masing agen dan konsensus gradien pembentukan kooperatif multi-agen dalam pencarian sumber.

3.3.2.1 Estimasi Gradien

Dalam estimasi gradien berbasis multi-agen, setiap agen mendekati gradiennya sendiri, dan agen yang terhubung menerima estimasi dari tetangganya untuk menghitung gradien global. Metode yang diusulkan untuk menghitung estimasi gradien didasarkan pada kuadrat terkecil [10], [35].

Setiap agen i mengukur intensitas medan skalar ψ dimanapun posisi agen. Dilambangkan dengan $\psi_i = \psi(r_i)$ dimana $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Mengingat posisi agen j, r_j , yang dekat dengan agen i, r_i , estimasi dapat dihitung dengan menggunakan deret Taylor orde satu. Estimasi di ψ_j diberikan r_i pada persamaan (3.3), dimana $\hat{g}(r_i)$ perkiraan gradien dihitung oleh agen i . Untuk $p = 2$, perkiraan gradien menjadi $\hat{g}(r_i) = [\hat{g}_x(r_i) \ \hat{g}_y(r_i)]^T$. Jika agen i memiliki $|N_i|$ tetangga, maka (3.3) menjadi (3.4), dimana $b_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times 1}$, $A_i \in \mathbb{R}^{|N_i| \times p}$, dan $\hat{g}_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. Masalah ini dapat diselesaikan dengan menggunakan metode kuadrat terkecil pada persamaan (3.5), yang dapat ditulis dalam bentuk terintegrasi sebagai

$$\hat{\mathbf{g}} = \hat{\mathbf{g}}_i \otimes \mathbf{I}_N \quad (3.21)$$

dimana $\hat{\mathbf{g}}_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$, $\mathbf{I}_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $\hat{\mathbf{g}} \in \mathbb{R}^{pN \times N}$, dengan agen $i = 1, \dots, N = 7$.

3.3.2.2 Konsensus Gradien

Algoritma konsensus diusulkan oleh Olfati-Saber dan Shamma di [8] adalah filter konsensus rata-rata untuk jaringan sensor yang didistribusikan secara spasial. Dalam algoritma ini, setiap sensor menerima masukan dari tetangganya, memperkirakannya, dan kemudian menghitung rata-ratanya. Konsensus rata-rata diterapkan pada konsensus gradien (3.6), dimana

$$e_{g_{ij}}(t) = (\hat{g}_i(t) - g_i(t)) - (\hat{g}_j(t) - g_j(t))$$

dan $\beta \geq 1$ merupakan parameter kontrol untuk melacak kinerja gradien saat agen bergerak. Dengan menggunakan definisi graf Laplacian, diperoleh persamaan (3.7), dimana $\mathbf{I}_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$ dan $\mathbf{I}_p \in \mathbb{R}^{p \times p}$ adalah matriks identitas. Dengan demikian (3.7) dapat ditulis ulang sebagai (3.8), dimana $\mathbf{A}_g = -\mathbf{B}_g$ dan $\mathbf{B}_g = \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_p + \Delta \otimes \mathbf{I}_p + \mathcal{L} \otimes \mathbf{I}_p$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{Np \times Np}$.

3.3.3 Medan Potensi Buatan dari Rintangan

Pada bagian ini, dijelaskan rintangan dan Medan Potensi Buatan yang terkait. Umumnya, agen seharusnya menghindari rintangan di sepanjang jalan untuk mencapai sumbernya. Metode *Artificial Potential Field (APF)* yang digunakan adalah yang dimodifikasi yaitu *APF* optimal. Algoritma dikembangkan melalui skenario dimana agen bergerak dalam ruang dua dimensi dengan posisi $\mathbf{r} = (x, y)^T$.

APF telah digunakan secara luas pada masalah perencanaan jalur dengan mempertimbangkan rintangan. Berikut ini, *APF* yang diusulkan yang disebut dengan *Modified APF (MAPF)* yang digunakan dalam penelitian ini akan dibandingkan dengan *APF* dengan algoritma gaya *virtual (VAPF)* yang diusulkan dalam [39]. Peneliti mempertimbangkan *VAPF* dengan algoritma gaya *virtual* dengan gaya tolak sebagai

$$F_{rep}(r) = -\nabla(U_{rep}) = \begin{cases} F_{rep1}(r) + F_{vir}(r), & \text{for } \rho(r) \leq \rho_0 \\ 0, & \text{for } \rho(r) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.22)$$

dimana

$$F_{rep1}(r) = k_r \left(1 - \frac{\rho(r)}{\rho_0}\right) \frac{1}{\rho^2(r)} \quad (3.23)$$

$$F_{vir}(r) = -k_{vir} \frac{1}{\rho(r)} \quad (3.24)$$

k_{vir} adalah penguatan kekuatan *virtual*.

Dalam penelitian ini, medan tolak U_{rep} dari rintangan mempengaruhi gerakan agen

$$U_{rep}(r) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho_t(r), & \text{for } \rho(r) \leq \rho_0 \\ 0, & \text{for } \rho(r) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.25)$$

Adapun gaya tolak F_{rep} dari *modified artificial potential field (MAPF)* adalah sebagai berikut

$$F_{rep}(r) = -\nabla(U_{rep}) = \begin{cases} F_{rep1}(r), & \text{for } \rho(r) \leq \rho_0 \\ 0, & \text{for } \rho(r) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.26)$$

dimana

$$F_{rep1}(r) = k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(r)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho_t(r)}{\rho(r)^2} \frac{\partial \rho(r)}{\partial (r)} \quad (3.27)$$

dimana F_{rep} adalah gaya tolak dari rintangan. Kekuatan ditambahkan ke posisi agen saat ini dan menjadi posisi referensi untuk kontrol manuver. Adapun untuk mendukung proses mempertahankan formasi, nilainya akan bervariasi jika memenuhi kriteria tertentu, seperti pada suatu saat agen akan melambat, dan agen lainnya akan memperlambat pada saat yang bersamaan.

3.3.4 Kontrol Kecepatan Terdistribusi

Model agen integrator ganda

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t),\end{aligned}\tag{3.28}$$

dimana

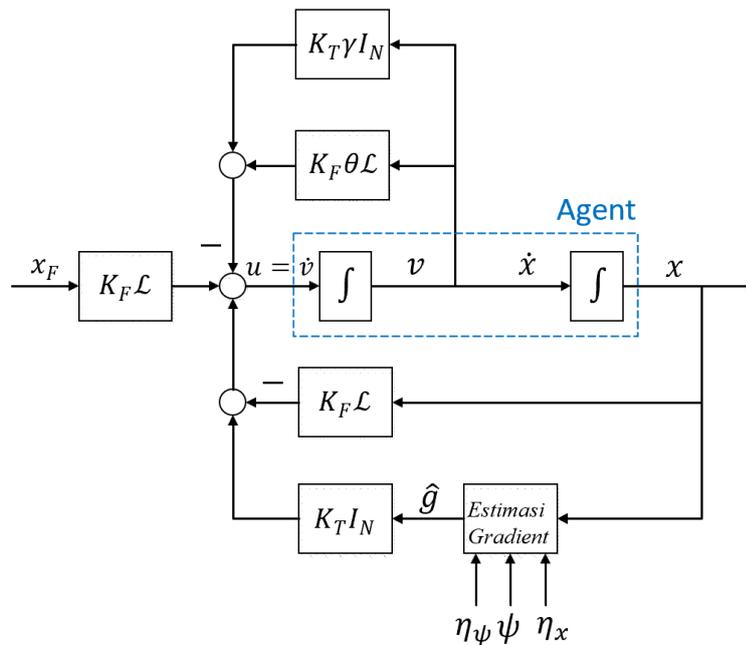
$$\begin{aligned}u_i(t) &= k_F \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left[(x_{Fi}(t) - x_{Fj}(t)) - (x_i(t) - x_j(t)) \right. \\ &\quad \left. - \theta (v_i(t) - v_j(t)) \right] + k_T (\hat{g}_i(t) - \gamma v_i(t))\end{aligned}\tag{3.29}$$

dimana $k_F > 0, k_T > 0, k_H > 0, \theta > 0, \gamma > 0, \beta > 0$ adalah parameter kontrol skalar, dari persamaan tersebut dapat disusun dalam ruang state, dinamika loop tertutup

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \Sigma \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_F \mathcal{L} & k_T I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_F \\ \hat{g}(x) \end{bmatrix}\tag{3.30}$$

dimana

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0 & I_N \\ -k_F \mathcal{L} & -k_F \theta \mathcal{L} - k_T \gamma I_N \end{bmatrix}\tag{3.31}$$



Gambar 3.8 Diagram kontrol terdistribusi

3.3.5 Kontrol Strategis untuk Pencarian Sumber Bergerak

Pada umumnya, agen akan menghindari rintangan di sepanjang jalan untuk mencapai sumbernya. Model agen integrator ganda seperti berikut

$$\dot{r}_i(t) = v_i(t) \quad (3.32)$$

$$\dot{v}_i(t) = u_i(t) \quad (3.33)$$

dimana

$$u_i(t) = k_F \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left[(r_{Fi}(t) - r_{Fj}(t)) - (r_i(t) - r_j(t)) \right] + k_v (\bar{g}_i(t) - \gamma v_i(t)) + k_r F_{rep} \quad (3.34)$$

dimana koefisiennya k_F, k_v, γ, k_r bilangan positif. Koefisien k_F dan k_v menunjukkan bobot gerakan masing-masing berdasarkan kontrol formasi dan pelacakan kecepatan. Model kooperatif multi-agen terpadu dari (3.32) sampai (3.34) menjadi

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_m \mathbf{x} + \mathbf{B}_m \mathbf{u} \quad (3.35)$$

dimana

$$\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]^\top, \text{ dimana } x_i = \begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \dots u_n]^\top, \text{ dimana } u_i = \begin{bmatrix} r_F \\ \hat{g}(r) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Karena model agen integrator ganda adalah sebagai berikut,

$$\mathbf{A}_m = A_{m_i} \otimes I_N \quad (3.38)$$

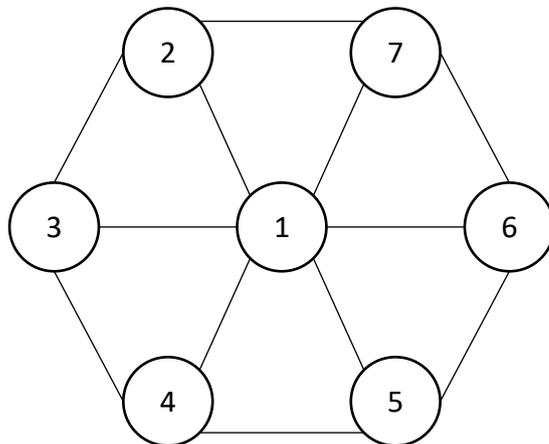
$$\mathbf{B}_m = B_{m_i} \otimes I_N, \quad (3.39)$$

dimana

$$A_{m_i} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$B_{m_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

dan I_N menjadi matriks identitas dengan dimensi $N \times N$.



Gambar 3.9 Formasi yang Digunakan dalam Eksperimen

Algoritma 1. Kontrol Strategis Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak dengan Penghindaran Rintangan.

```

INPUT:
time sampling  $T_s$ , simulasi akhir  $E_s$ , agen posisi awal  $r$ , agen
pembentuk posisi  $r_f$ , parameter kooperatif multi-agen  $k_F, k_v, k_r, \beta, \gamma$ ,
parameter sumber bergerak  $A_1, x_1, y_1, \sigma_{x1}, \sigma_{y1}, A_2, x_2, y_2, \sigma_{x2}, \sigma_{y2}, v_x, v_y, A, \omega, \alpha$ ,
parameter bidang potensial buatan  $K_{rep}, \rho_0, K_{att}$ , Matriks sistem gradien
konsensus dan sistem model  $A_g, B_g, A_m, B_m$ , Rintangan  $O_s$ 

OUTPUT: trayektori semua agen
for t = 0 to  $E_s$  step  $T_s$ 
   $\psi_s(x, y) \leftarrow x, y$  %memindahkan sumber dengan (3.2)
  Kontrol Strategis:
   $\hat{g} \leftarrow g_i$  %estimasi gradien oleh (3.21)
   $\bar{g} \leftarrow \hat{g}$  %konsensus gradien oleh (3.22)
  if  $\rho(X) \leq \rho_0$ 
     $F_{rep} \leftarrow \rho(X), \rho_t(X)$  %gaya tolak (3.26)
  if  $d_o(X) \leq d_0$ 
     $r_f \leftarrow \zeta$  %formasi menyusut
     $u \leftarrow r, r_f, \hat{g}, F_{rep}$  %sinyal kontrol oleh (3.37)
     $x \leftarrow x, u$  %status model oleh (3.35)
     $r \leftarrow x$  %posisi agen menurut (3.36)
     $d_{a1_o} \leftarrow r, O_s$  %jarak agen #1 dan tiga rintangan
  end
return  $r, d_{a1_o}$ 

```

3.3.6 Pengujian Kontrol Strategis

Kontrol strategis berisi perubahan kontrol kooperatif multi-agen. Bila formasi kooperatif multi-agen tidak mendeteksi adanya rintangan, maka multi-agen akan menjalankan kontrol kecepatan terdistribusi. Sedangkan bila formasi mendeteksi adanya rintangan maka multi-agen menjalankan kombinasi dari kontrol kecepatan terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan. Pada penghindaran rintangan ini, formasi bisa diupayakan untuk dipertahankan. Namun pada eksperimen tertentu, mungkin terdapat ruang antar dua rintangan yang berdekatan, sehingga perlu melakukan penyusutan formasi terkait dengan kondisi rintangan tersebut.

Prosedur kontrol strategis adalah sebagai berikut

- Deteksi jarak terpendek antar agen #1 dan rintangan ρ
- Bila $\rho > \rho_0$ maka kooperatif multi-agen menjalankan kontrol kecepatan terdistribusi, diasumsikan $\rho_0 = 20 m$

- Bila $\rho \leq \rho_0$ maka kooperatif multi-agen menjalankan kombinasi dari kontrol kecepatan terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan

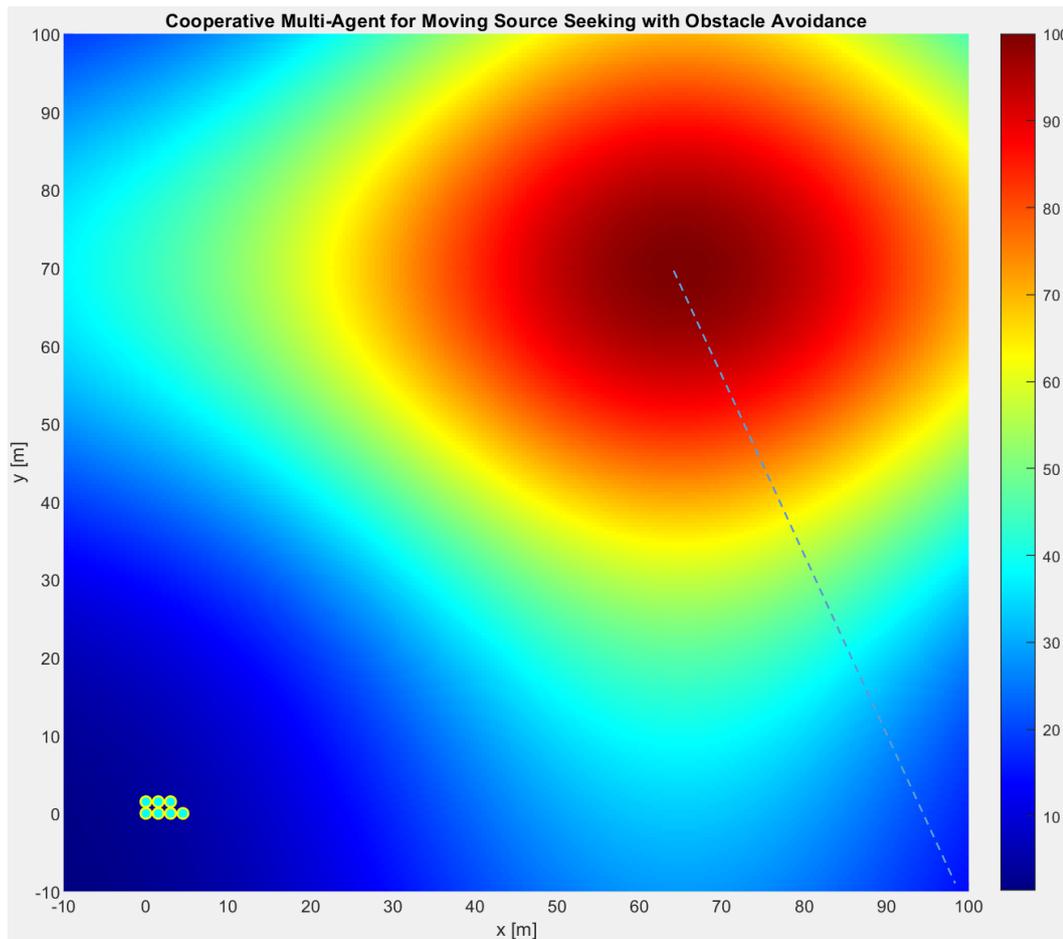
Hipotesa penelitian yang dilakukan adalah

1. Diharapkan kooperatif multi-agen dapat mengikuti dan mencapai sumber bergerak dengan menggunakan kontrol kecepatan terdistribusi yang didapat dari kecepatan konsensus gradien.
2. Dengan deteksi rintangan yang digunakan sebagai perubah kontrol pada kontrol strategis, akan menjalankan penghindaran rintangan hingga pada jarak tertentu akan kembali menjalankan kontrol kecepatan terdistribusi, diharapkan kooperatif multi-agen dapat menghindari rintangan, melacak, dan mencapai sumber bergerak.

Pengujian akan dilakukan untuk pembuktian hipotesa yang telah dibuat.

Pengujian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut

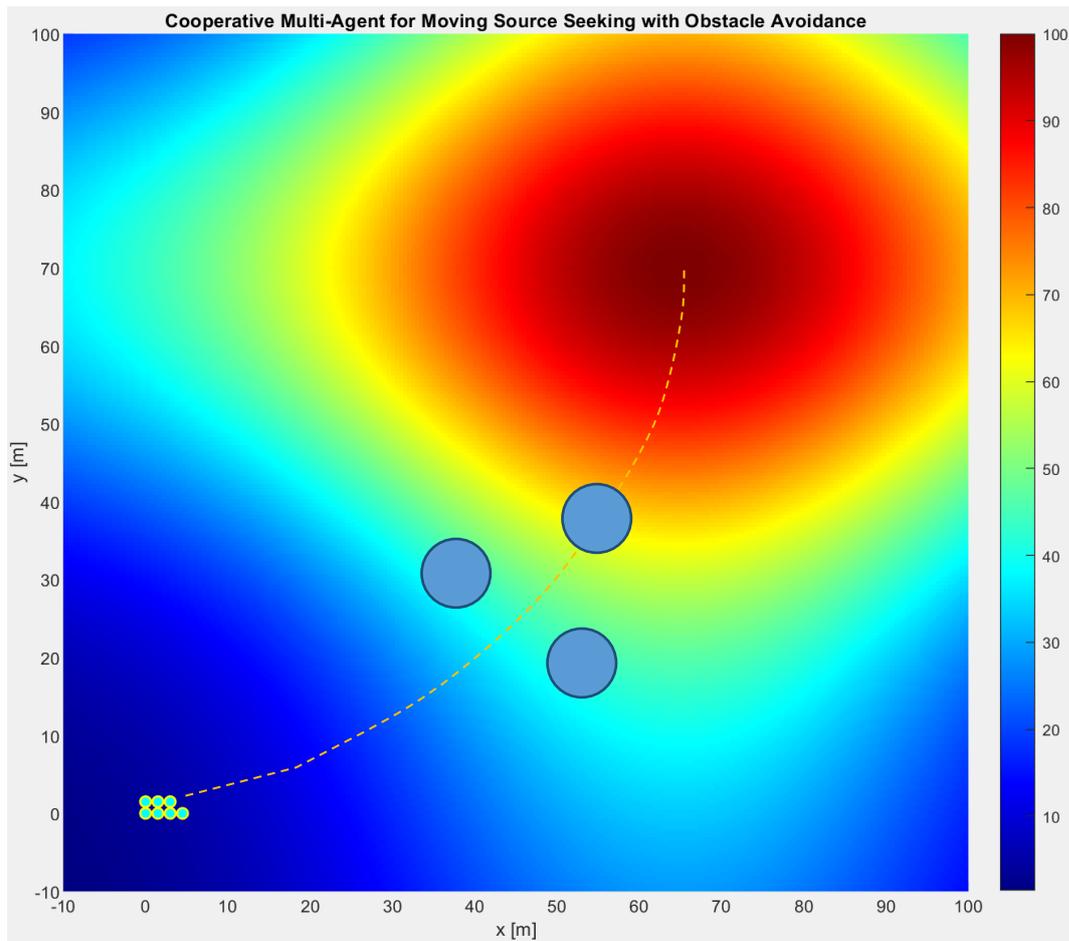
1. Kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak
 - a. Menguji dengan pergerakan sumber secara linier. *Single optima* sumber bergerak secara linier, dapat dibuat arah linier seperti yang diinginkan. Sebagai contoh bisa dilihat pada Gambar 3.10.
 - b. Menguji dengan pergerakan sumber secara mengembang-menyempit dengan durasi 4 detik setiapnya. Misal awal kali terjadi mengembang, selama 4 detik, kemudian berubah menjadi menyempit juga selama 4 detik, demikian seterusnya.
 - c. Menguji dengan pergerakan sumber secara kombinasi linier dan mengembang-menyempit.



Gambar 3.10 Fungsi Skalar Sumber Bergerak Linier

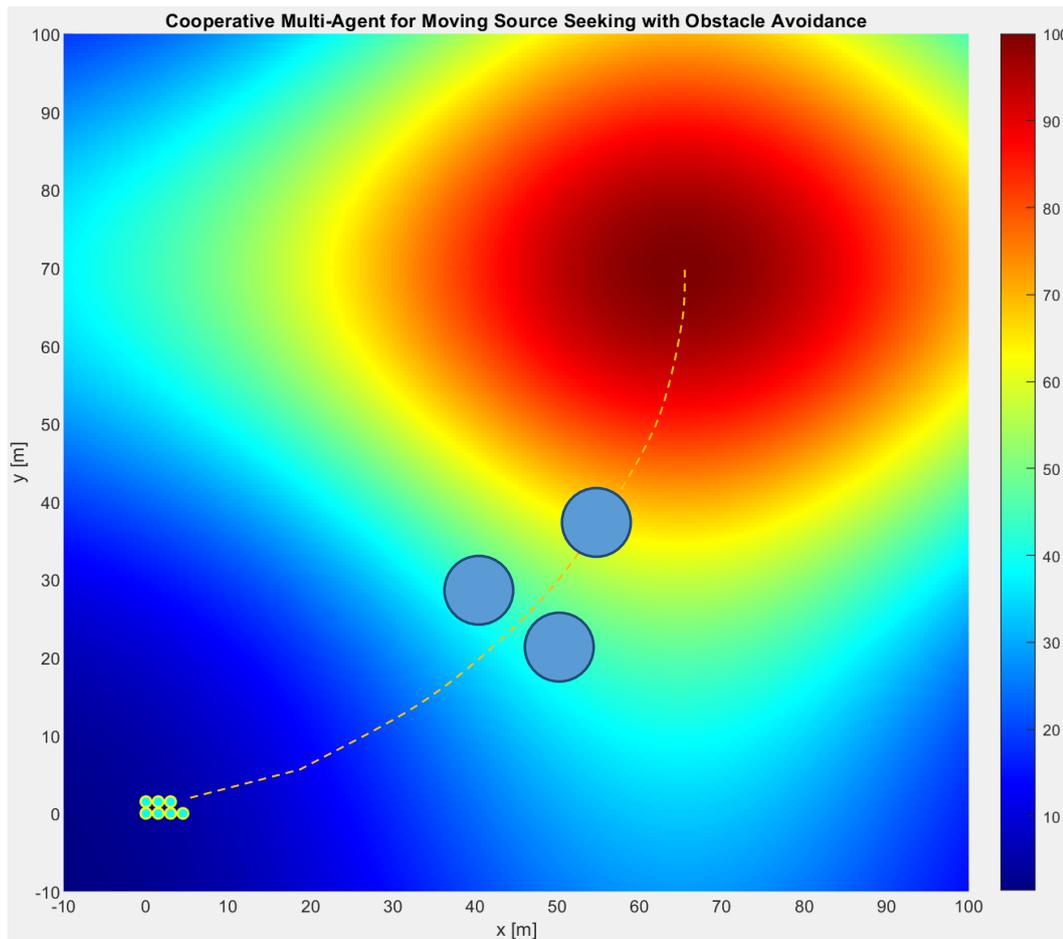
2. Kooperatif multi-agen pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan

- a. Menguji dengan tiga rintangan tetap. Formasi bergerak mengikuti hasil konsensus kecepatan gradien. Ketika terdeteksi rintangan dalam $\rho \leq 20 m$, kombinasi dari kontrol kecepatan terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan bekerja. Dengan tetap mempertahankan formasi dan menghindari tiga rintangan tetap. Ketika formasi menjauhi rintangan, kontrol kecepatan terdistribusi berfungsi kembali sehingga formasi dapat mencapai sumber. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.11.



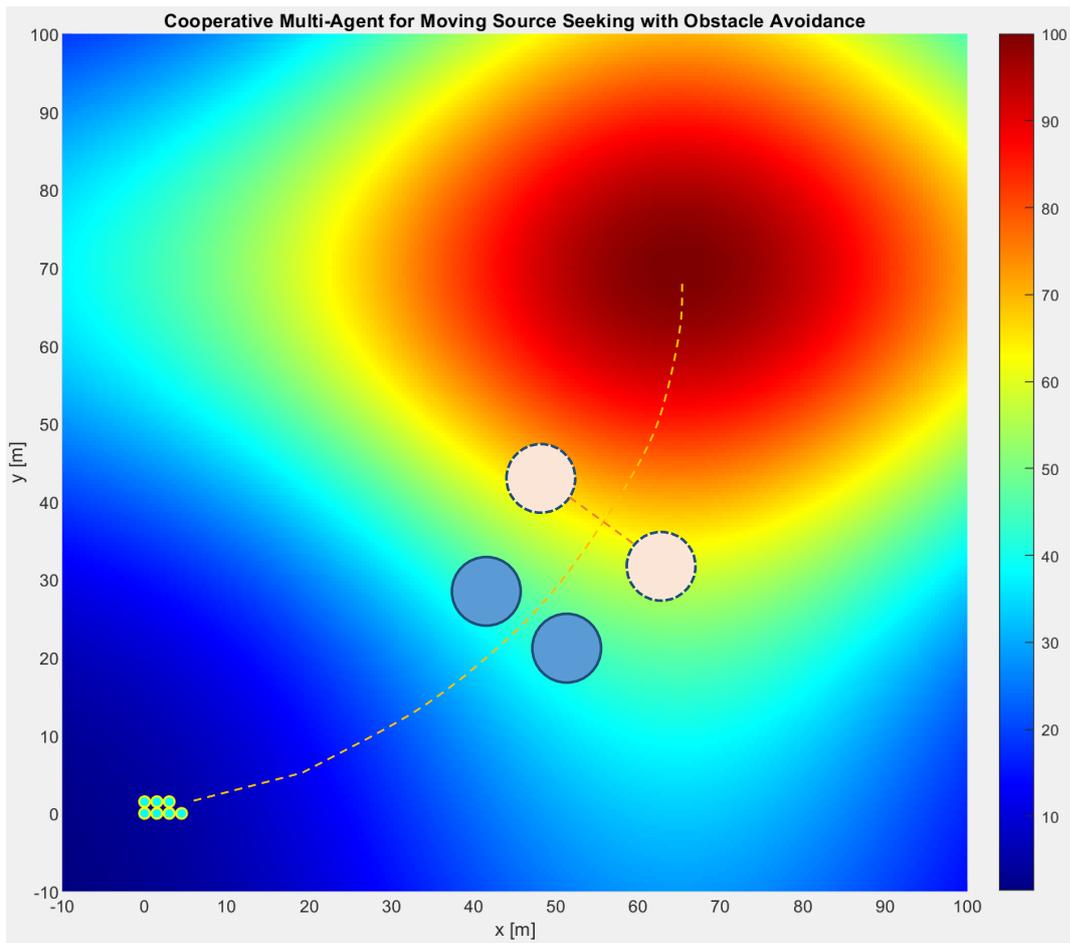
Gambar 3.11 Skenario Penghindaran Tiga Rintangan Tetap

- b. Menguji dengan tiga rintangan tetap dan penyusutan formasi. Formasi bergerak mengikuti hasil konsensus kecepatan gradien. Ketika terdeteksi rintangan dalam $\rho \leq 20 m$, kombinasi dari kontrol kecepatan terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan bekerja. Dengan melakukan penyusutan formasi saat ruang antar dua rintangan yang berdekatan, kemudian kembali ke formasi awal setelah melalui 2 rintangan yang berdekatan tersebut, dan menghindari tiga rintangan tetap. Ketika formasi menjauhi rintangan, kontrol kecepatan terdistribusi berfungsi kembali sehingga formasi dapat mencapai sumber. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Skenario Penghindaran Tiga Rintangan Tetap dan Penyusutan Formasi

- c. Menguji dengan dua rintangan tetap, satu rintangan bergerak dan penyusutan formasi. Formasi bergerak mengikuti hasil konsensus kecepatan gradien. Ketika terdeteksi rintangan dalam $\rho \leq 20 m$, kombinasi dari kontrol kecepatan terdistribusi dan kontrol penghindaran rintangan bekerja. Dengan melakukan penyusutan formasi saat ruang dari 2 rintangan sempit, kemudian kembali ke formasi awal setelah melalui 2 rintangan sempit tersebut. Kemudian menghindari rintangan bergerak, dan menghindari tiga rintangan tersebut. Ketika formasi menjauhi rintangan, kontrol kecepatan terdistribusi berfungsi kembali sehingga formasi dapat mencapai sumber. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.13.



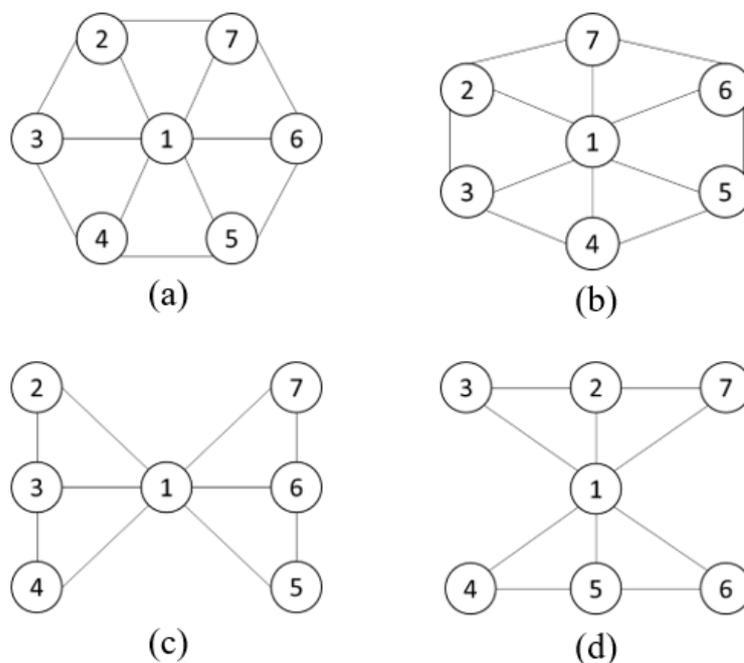
Gambar 3.13 Skenario Penghindaran Dua Rintangan Tetap, Satu Rintangan Bergerak, dan Penyusutan Formasi

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perubahan Topologi Formasi Pencarian Sumber

Penelitian perubahan formasi dan topologi ini dibuat dalam dua keadaan, yaitu graf dengan topologi tetap, dan graf dengan topologi berubah. Analisis permasalahan ini menggunakan teori aljabar graf, teori matriks, dan teori kontrol. Untuk menstabilkan sistem multi-agen, topologinya harus terhubung dengan kuat dan seimbang. Dalam penelitian ini, diusulkan 4 macam formasi. Multi-agen memiliki 7 agen yang memiliki bentuk formasi dan topologi. Setiap formasi akan digunakan, dipicu oleh bilangan bulat secara acak setiap sepuluh detik. Dan perubahan topologi dihasilkan dari posisi masing-masing agen saat ini dimana masing-masing agen memiliki jangkauan komunikasi dengan agen lainnya. Semua jenis formasi dan topologi yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Formasi yang Digunakan dalam Simulasi

Dan representasi masing-masing jenis dalam koordinat $[x y z]$ agen pertama hingga ketujuh dijelaskan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Koordinat Formasi

Pertama (a)	Kedua (b)	Ketiga (c)	Keempat (d)
[2 2 101;	[2 2 101;	[2 2 101;	[2 2 101;
1 4 101;	0 3 101;	0 4 101;	2 4 101;
0 2 101;	0 1 101;	0 2 101;	0 4 101;
1 0 101;	2 0 101;	0 0 101;	0 0 101;
3 0 101;	4 1 101;	4 0 101;	2 0 101;
4 2 101;	4 3 101;	4 2 101;	4 0 101;
3 4 101]	2 4 101]	4 4 101]	4 4 101]

Untuk eksperimen simulasi, fungsi medan skalar adalah

$$\psi(x, y) = 50e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} + 50e^{-\frac{(x-65)^2}{16200} - \frac{(y-70)^2}{1250}} \quad (4.1)$$

dan gradien asli diperoleh secara analitik dari gradien $\psi(x, y)$

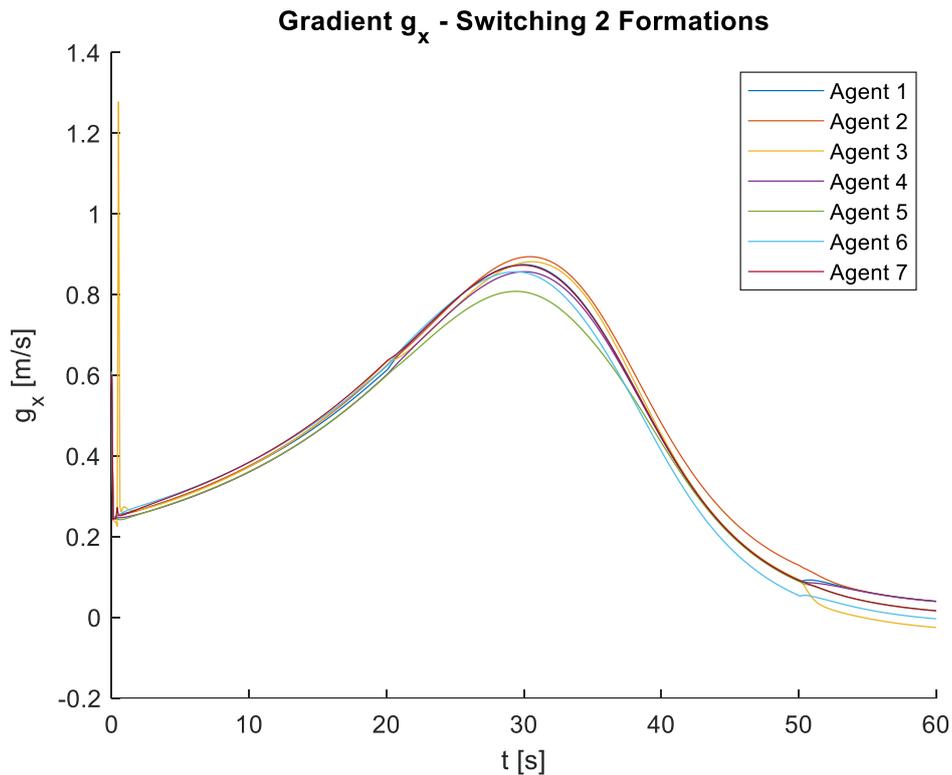
$$\nabla\psi(x, y) = \frac{\partial\psi}{\partial x}i + \frac{\partial\psi}{\partial y}j \quad (4.2)$$

dimana

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{x-65}{900}e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} - \frac{x-65}{8100}e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}}$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial y} = -\frac{y-70}{5625}e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}} - \frac{y-70}{625}e^{-\frac{(x-65)^2}{1800} - \frac{(y-70)^2}{11250}}$$

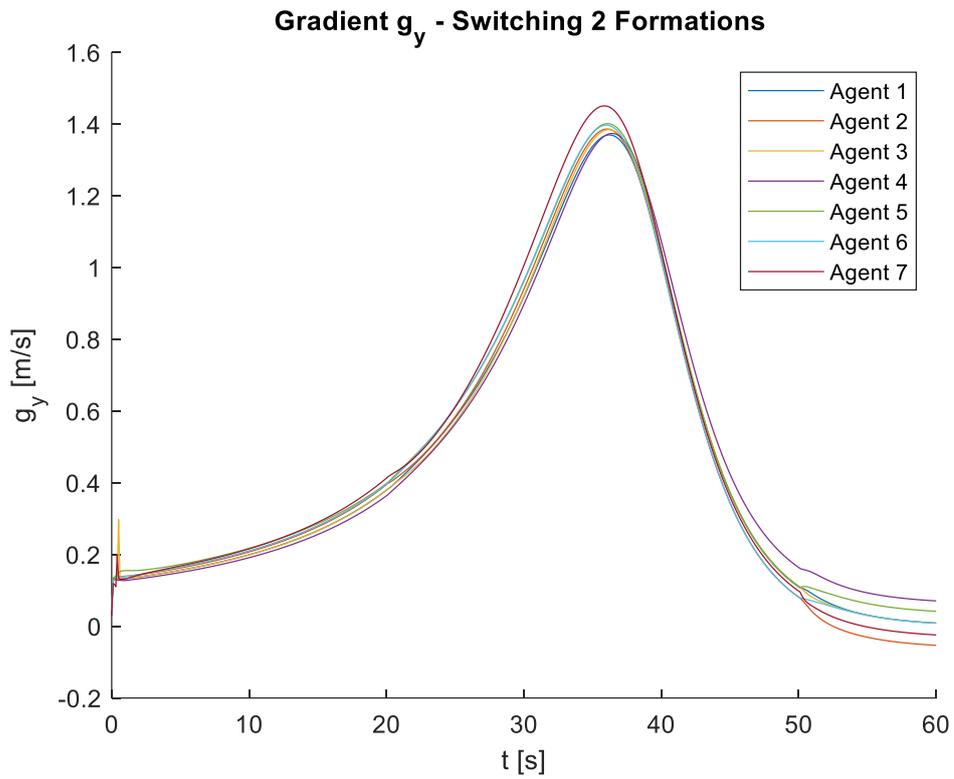
Eksperimen dibagi dalam tiga skenario. Skenario pertama adalah pergantian 2 formasi, yang kedua adalah pergantian 3 formasi dan yang terakhir adalah pergantian 4 formasi dengan kooperatif multi-agen dalam pencarian sumber diam. Pertama, pencarian sumber dengan perubahan 2 formasi adalah skenario pertama (lihat Gambar 4.1 (a), (b)). Gradien g_x terjadi deviasi maksimum 1,0337 pada agen #3 seperti pada Gambar 4.2. Analog dengan g_x, g_y terjadi deviasi maksimum 0,1874 pada agen #3, dapat lihat pada Gambar 4.3. Perambatan kooperatif multi-agen dengan perubahan 2 formasi dapat dilihat pada Gambar 4.4, dimana masing-masing agen merupakan model integrator tunggal. Perambatan awal dan akhir dapat dilihat pada Gambar 4.5.



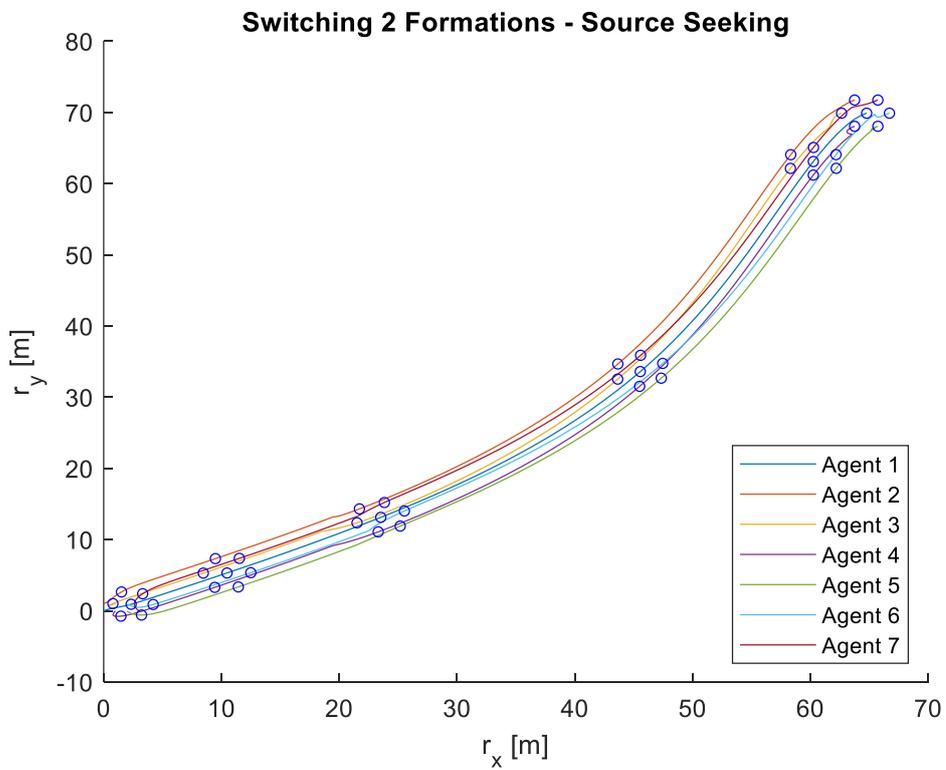
Gambar 4.2 Gradien g_x dalam Pergantian 2 Formasi

Lihat animasi: <http://bit.ly/switchingFormationTopology>

Selanjutnya, skenario kedua adalah pencarian sumber dengan pergantian 3 formasi (lihat Gambar 4.1 (a), (b), (c)). Disini gradien g_x terjadi deviasi maksimum 4.1523 pada agen #3, seperti pada Gambar 4.6. Hal ini terjadi karena agen 3 menjauh dari formasinya, karena kontrol formasi bekerja, maka agen 3 mendekati formasi dan gradiennya menjadi lebih baik lagi. Secara analog dengan g_x , g_y terjadi penyimpangan namun tidak besar, hanya 0.1732 pada agen #3, seperti pada Gambar 4.7. Namun demikian, skenario kedua dapat mencapai target (Gambar 4.8). Meskipun dalam perjalanan, beberapa formasi tidak dapat terbentuk dengan tepat, tetapi semakin lama semakin membentuk formasi yang diinginkan.

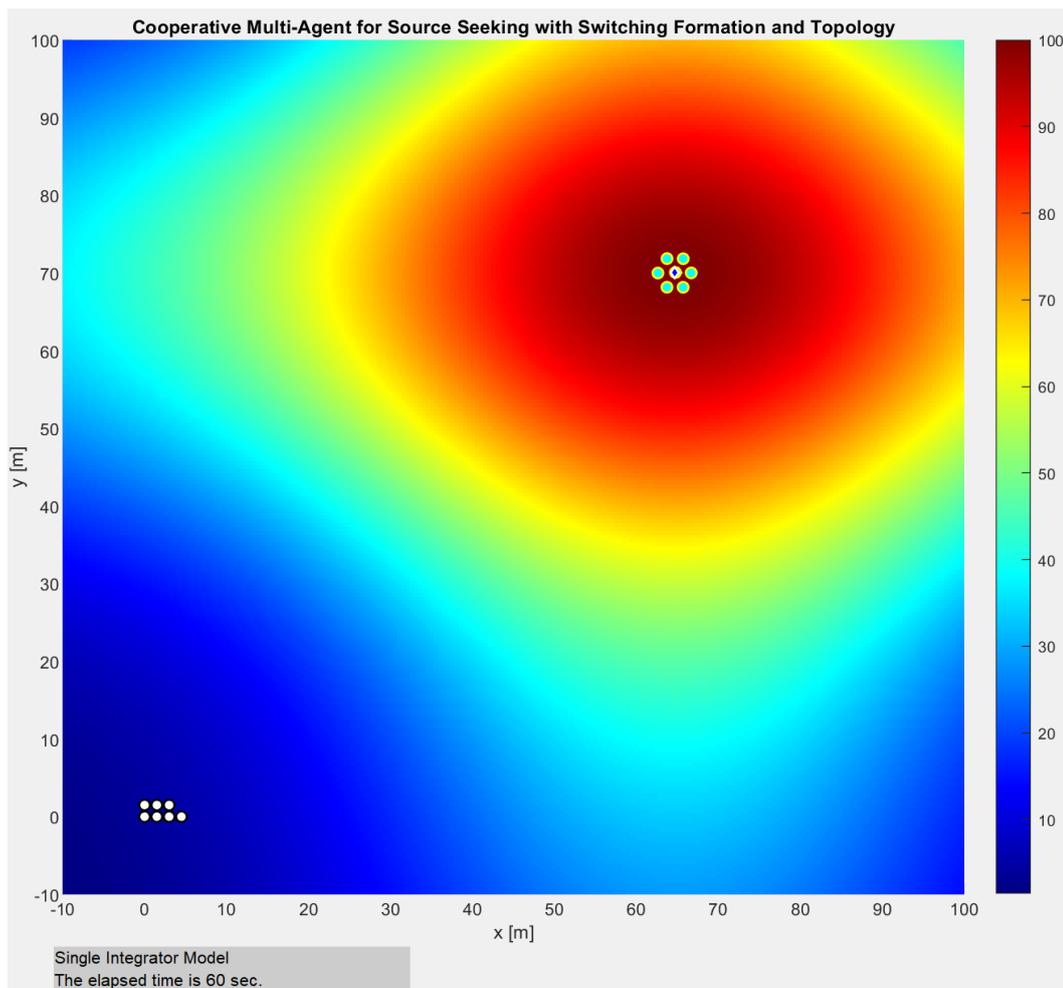


Gambar 4.3 Gradien g_y dalam Pergantian 2 Formasi

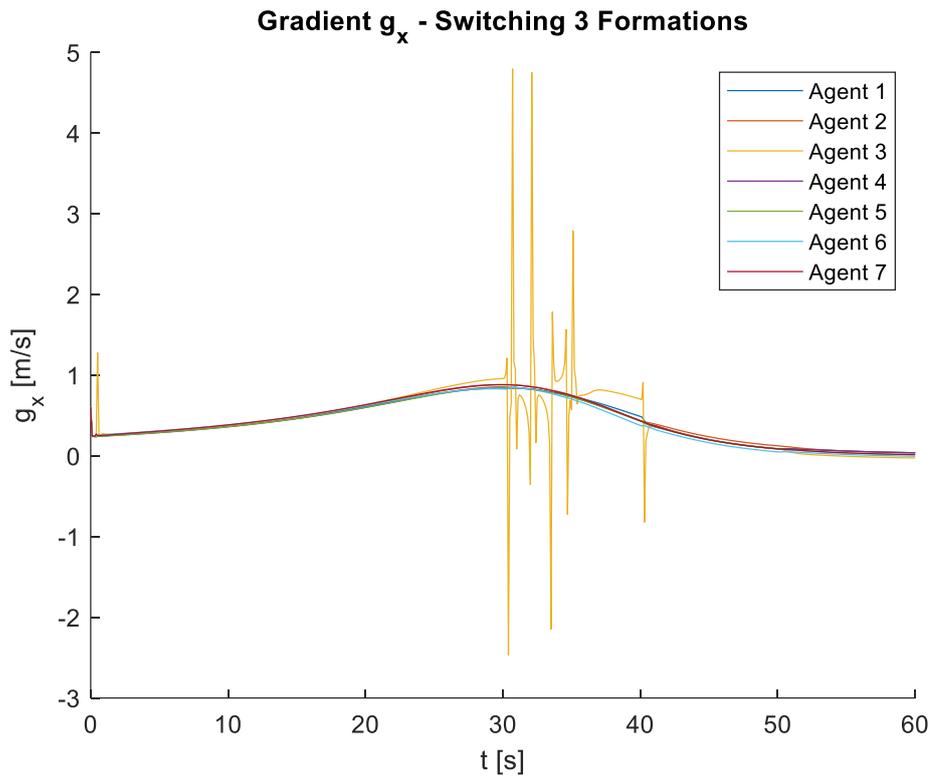


Gambar 4.4 Trayektori pada Pergantian 2 Formasi

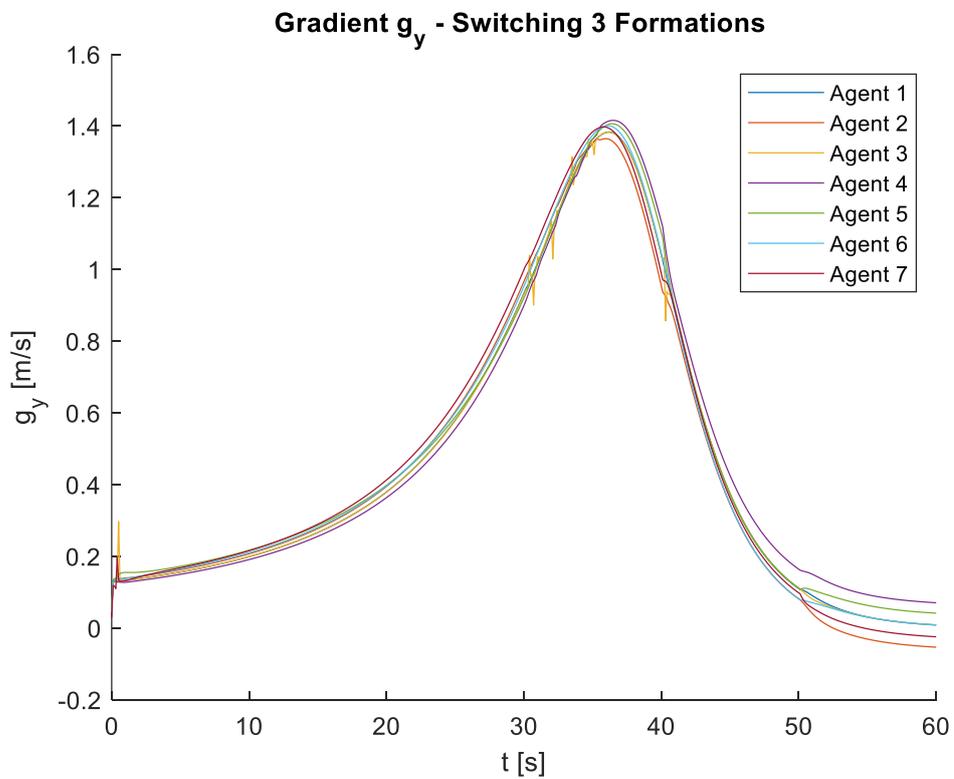
Terakhir, skenario ketiga adalah pencarian sumber dengan pergantian 4 formasi (lihat Gambar 4.1 (a), (b), (c), (d)). Gradien g_x terjadi deviasi maksimum 27.7821 pada agen #3, seperti pada Gambar 4.9. Hal ini terjadi karena agen 3 menjauh dari formasinya, dan karena kontrol formasi bekerja, maka agen 3 mendekati formasi dan gradiennya menjadi lebih baik. Analog dengan g_x, g_y terjadi deviasi maksimum 9,7359 pada agen#3, seperti pada Gambar 4.10. Namun demikian, skenario ketiga dapat mencapai target (Gambar 4.11). Meskipun dalam perjalanan, beberapa formasi tidak dapat terbentuk dengan tepat, tetapi semakin lama semakin membentuk formasi yang diinginkan. Dapat disimpulkan bahwa skenario ketiga memiliki deviasi yang lebih besar dibandingkan skenario pertama dan kedua.



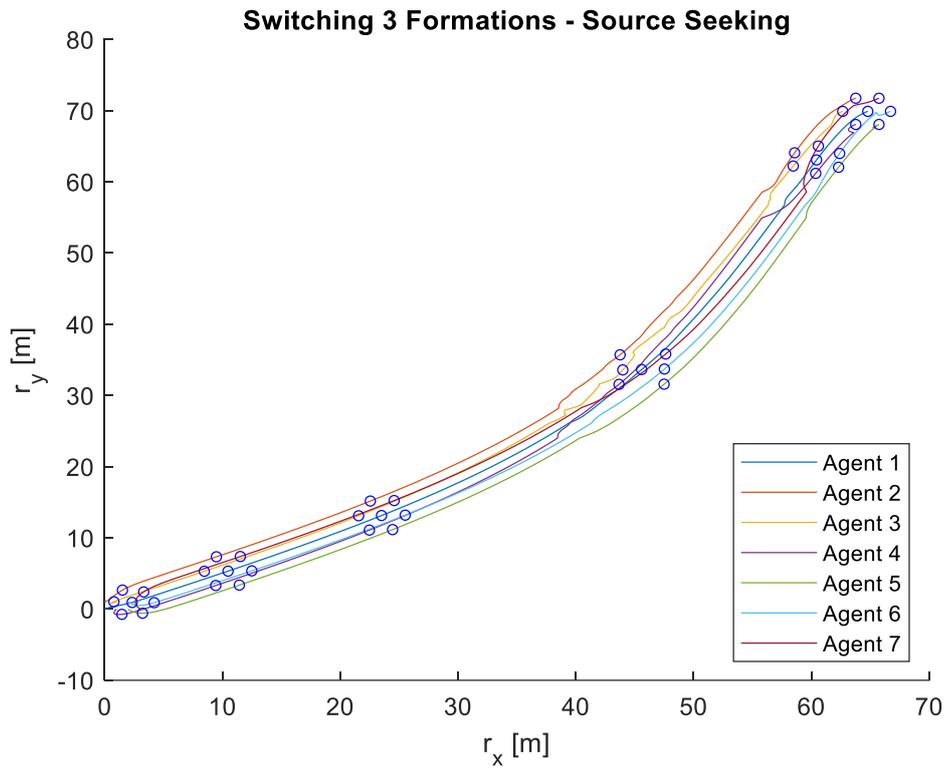
Gambar 4.5 Trayektori Awal dan Akhir dalam Pergantian 2 Formasi



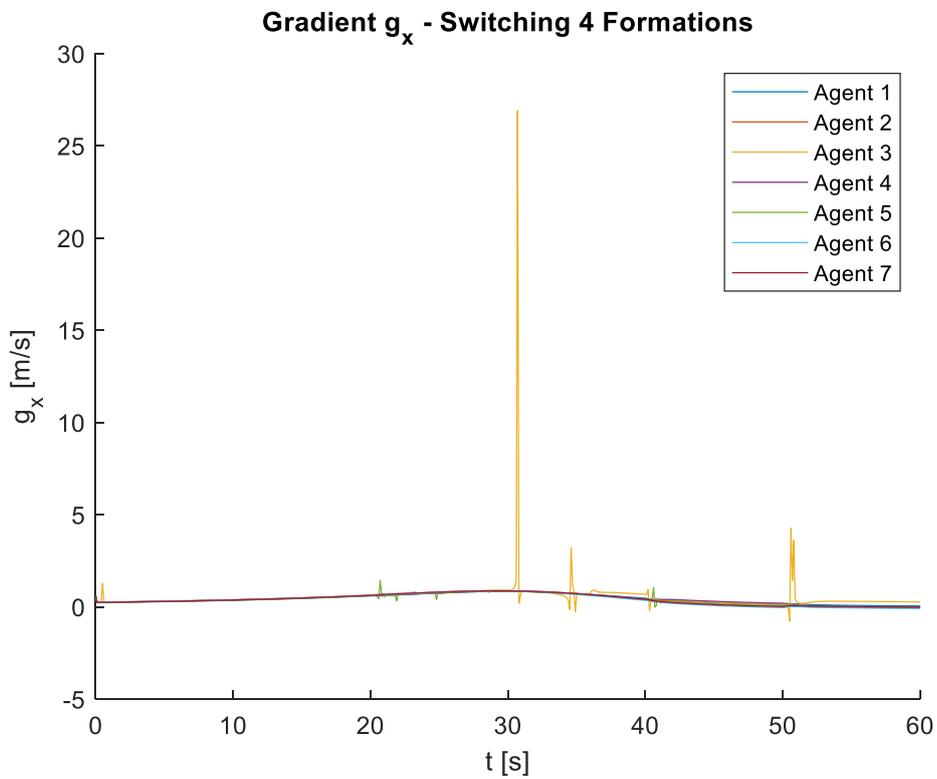
Gambar 4.6 Gradien g_x dalam Pergantian 3 Formasi



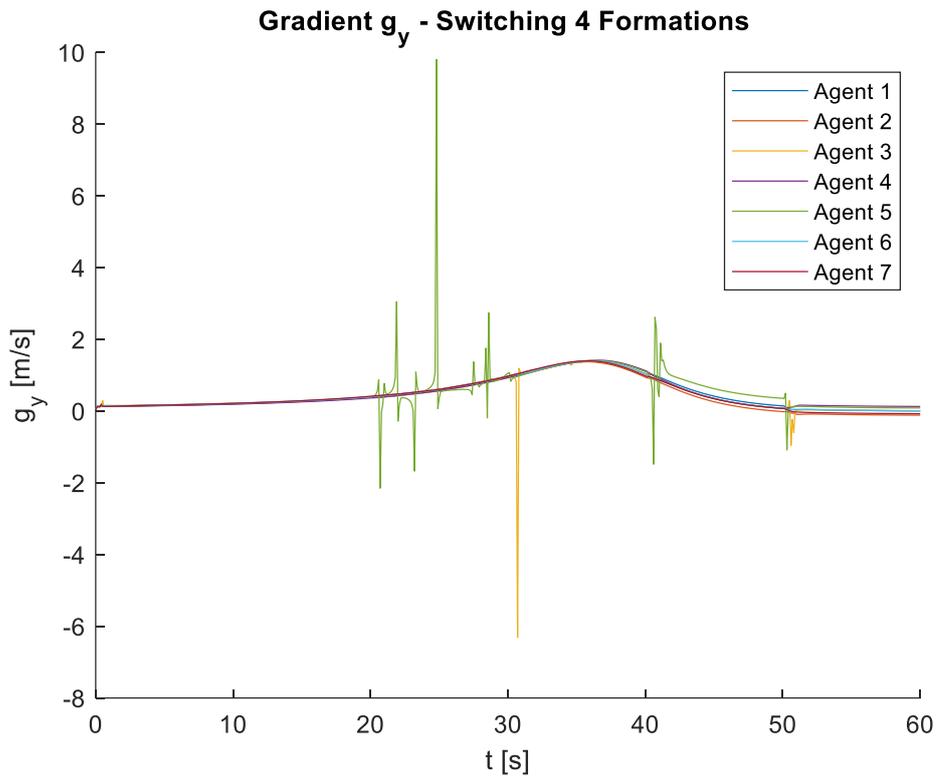
Gambar 4.7 Gradien g_y dalam Pergantian 3 Formasi



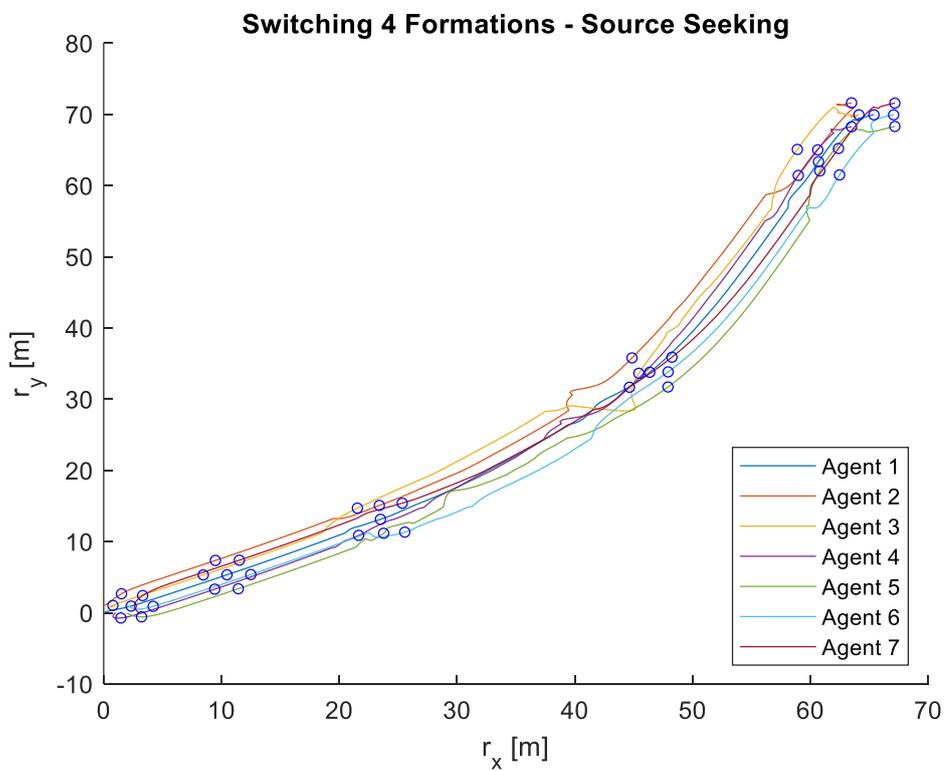
Gambar 4.8 Trayektori pada Pergantian 3 Formasi



Gambar 4.9 Gradien g_x dalam Pergantian 4 Formasi



Gambar 4.10 Gradien g_y dalam Pergantian 4 Formasi



Gambar 4.11 Trayektori pada Pergantian 4 Formasi

Rangkuman deviasi maksimum g_x dan g_y untuk masing-masing skenario dan agen mana yang memiliki deviasi maksimum dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Penyimpangan Maksimum g_x dan g_y

Skenario #	Deviasi maks g_x (agen #)	Deviasi maks g_y (agen #)	Resultan deviasi maks.
1	1,0337 (3)	0,1874 (3)	1.0505
2	4.1523 (3)	0,1732 (3)	4.1559
3	27.7821 (3)	9.7359 (3)	29.4386

Dari Tabel 4.2. dapat disimpulkan bahwa penyimpangan maksimum yang terkecil adalah pada skenario 1 yakni pergantian 2 formasi dan topologi, dengan besar resultan deviasi maksimum sebesar 1.0505, dimana simpangan maksimum tersebut terjadi pada agen ke-3.

4.2 Kontrol Kecepatan Terdistribusi Pencarian Sumber Bergerak

Nilai parameter yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada

Tabel 4.3. Parameter pergerakan fungsi skalar pada (3.14) terdiri dari ekspansi ($\alpha > 1$) dengan $\alpha = 1.002$ dan kontraksi ($\alpha < 1$) dengan $\alpha = 0.998$. Dalam penelitian ini, titik puncak yang sama dari sumber di $(x_1, y_1) = (x_2, y_2)$ digunakan untuk menghasilkan medan skalar tunggal yang optimal. Perlu dicatat bahwa mempertimbangkan nilai yang berbeda dari x dan y juga dimungkinkan dalam kasus *multiple optima*.

Konsensus gradien menggunakan parameter $\beta = 1$. Untuk kontrol kecepatan terdistribusi agen, berikut nilai parameter $k_F = 0.5$ dan $\theta = 1$ dipertimbangkan untuk kontrol formasi, sementara $k_V = 0.5$ untuk kontrol kecepatan. Agen diasumsikan memiliki formasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12, untuk mengkarakterisasi lebih baik waktu dimana agen mencapai sumber; ketujuh agen dikatakan mencapai sumber jika agen #1 yang ditempatkan di tengah mencapai sumber.

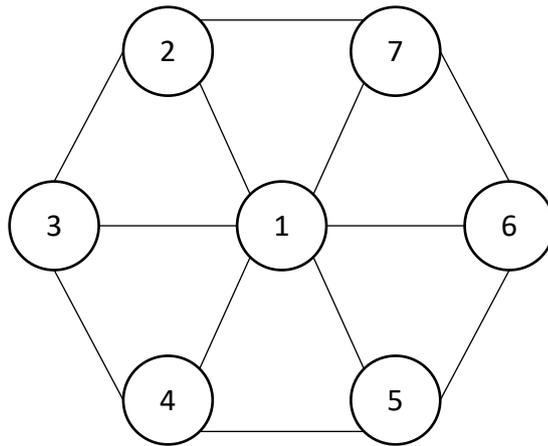
4.2.1 Simulasi Pencarian Sumber Bergerak Linier

Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.13 sampai Gambar 4.18 yang menunjukkan posisi manuver kooperatif multi-agen. Parameter yang digunakan

pada sumber bergerak linier di (3.10) dan (3.11) adalah $v_x = 0.02m/s$ dan $v_y = -0.005m/s$. Gambar 4.13 menunjukkan eksperimen kecepatan gradien dan kecepatan yang diinginkan; eksperimen kecepatan gradien (disingkat *LG* untuk *Linear source seeking with Gradient velocity*) menggunakan nilai \bar{g}_i pada (3.6), yang nantinya mempengaruhi sinyal kontrol u_i yang didefinisikan dalam (3.17). Di sisi lain, dalam eksperimen kecepatan yang diinginkan (disingkat *LD* untuk *Linear source seeking with Desired velocity*), dimana \bar{g}_1 diganti dengan v_d untuk beberapa interval waktu tertentu.

Dalam simulasi ini, sumber diasumsikan berhenti bergerak pada $t = 50$ s. Dengan demikian, pada eksperimen kecepatan yang diinginkan, v_d digunakan pada agen #1 dari saat formasi awal terbentuk hingga $t = 50$ s, dengan agen lain mengikuti pergerakan agen #1 berdasarkan kontrol formasi. Setelah itu, agen #1 menggunakan \bar{g}_1 lagi hingga mencapai sumbernya.

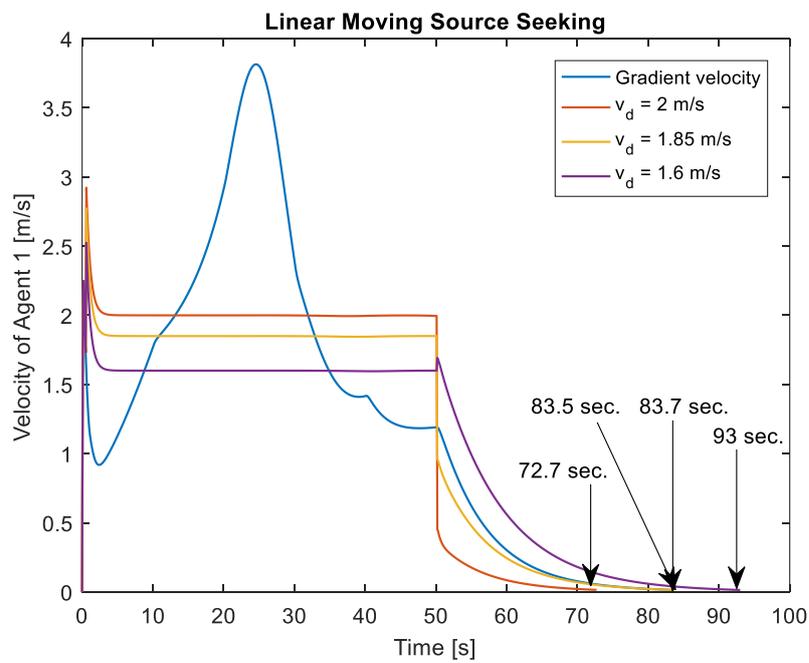
Kecepatan agen dibawah sumber bergerak linier ditunjukkan pada Gambar 4.13 dengan $v_d = \{1.6, 1.85, 2\}m/s$ pada eksperimen kecepatan yang diinginkan. Dari Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 terlihat bahwa agen dengan kecepatan gradien dapat mencapai sumber yang bergerak secara linier, dengan agen #1 tepat mengenai sumber $t = 83.5$ s. Angka tersebut menunjukkan bahwa agen berhasil menjaga formasi dalam proses pencarian sumber. Demikian pula, Gambar 4.13 sampai Gambar 4.17 mengilustrasikan bahwa agen dengan kecepatan yang diinginkan $v_d = 2$ m/s juga dapat mencapai sumber yang bergerak secara linear; dalam hal ini dibawah kecepatan yang diinginkan, agen mencapai sumber lebih cepat $t = 72.7$ s.



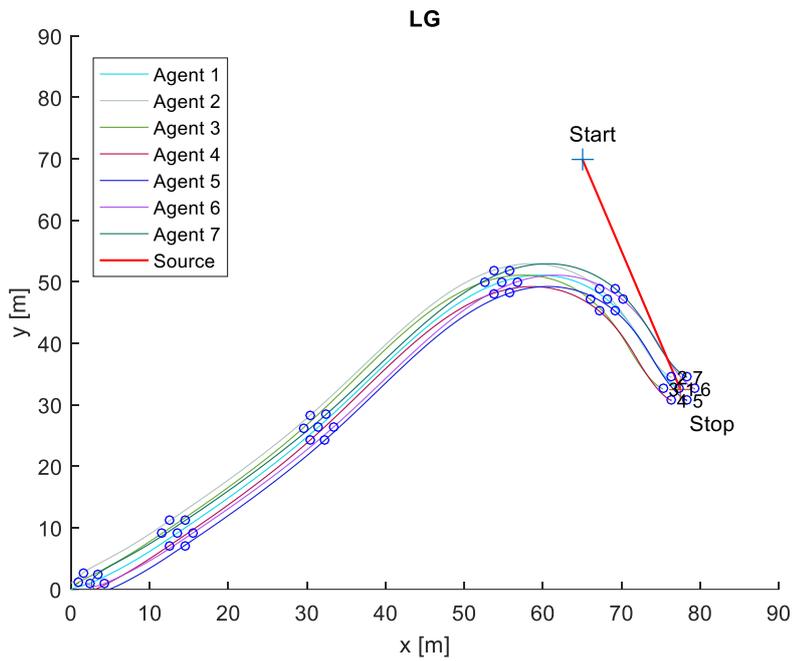
Gambar 4.12 Formasi yang digunakan dalam simulasi

Tabel 4.3 Parameter Fungsi Skalar Sumber Bergerak

Parameter	Nilai
$A_1 = A_2$	50 m
$x_1 = x_2$	65 m
$y_1 = y_2$	70 m
σ_{x_1}	30
σ_{y_1}	75
σ_{x_2}	90
σ_{y_2}	25

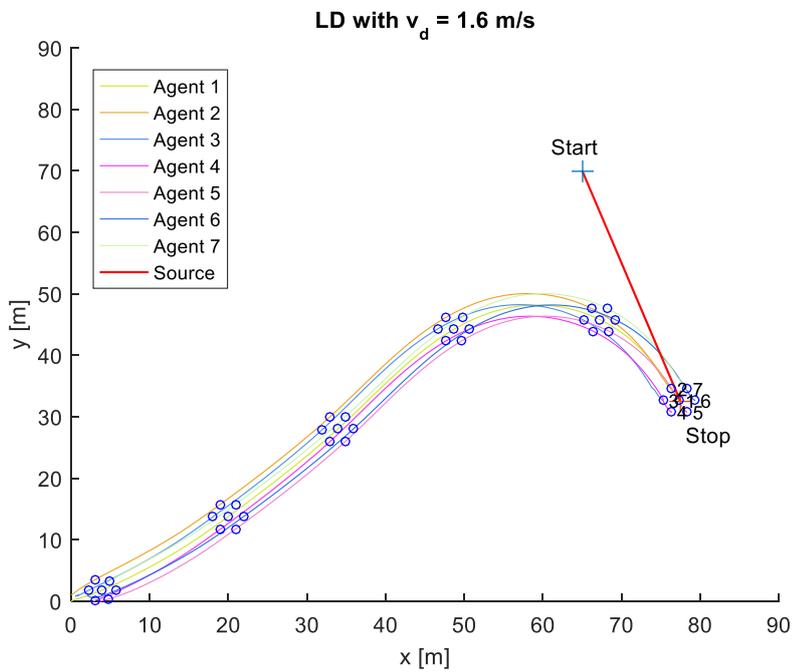


Gambar 4.13 Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Pencarian Sumber Bergerak Linier dengan v_d bervariasi

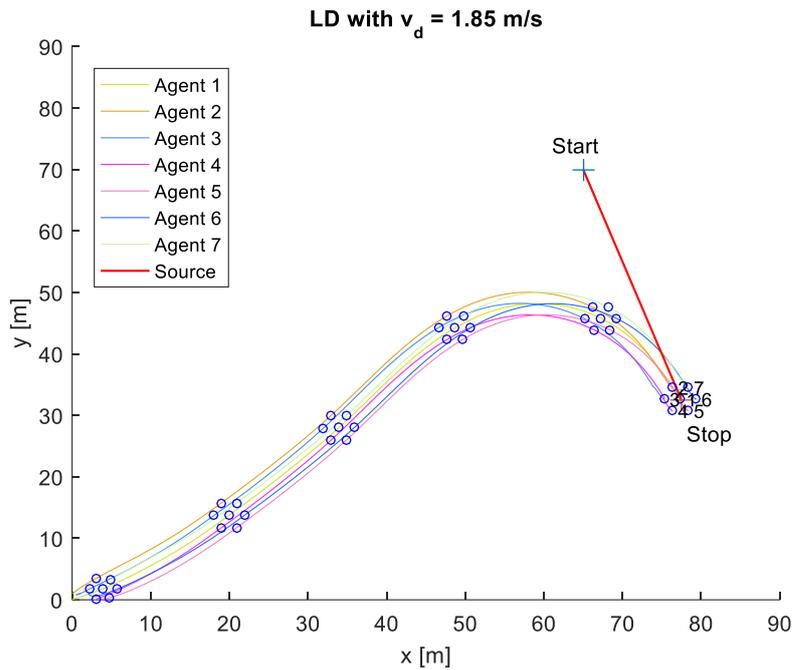


Gambar 4.14 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan Gradien

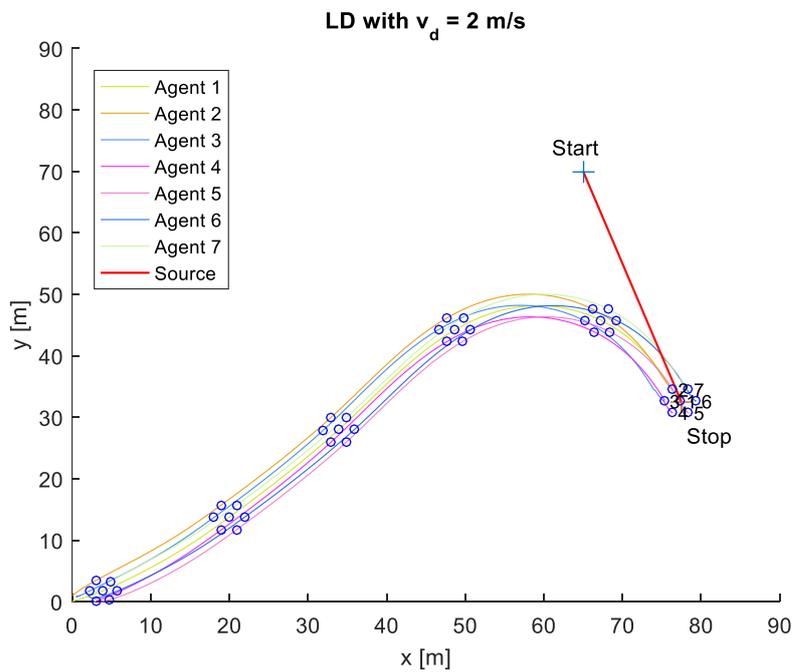
Lihat animasi di <http://bit.ly/LinearAndSinusoidalMovingSourceSeeking>



Gambar 4.15 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan $v_d = 1.6 \text{ m/s}$



Gambar 4.16 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan $v_d = 1.85 \text{ m/s}$



Gambar 4.17 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan $v_d = 2 \text{ m/s}$

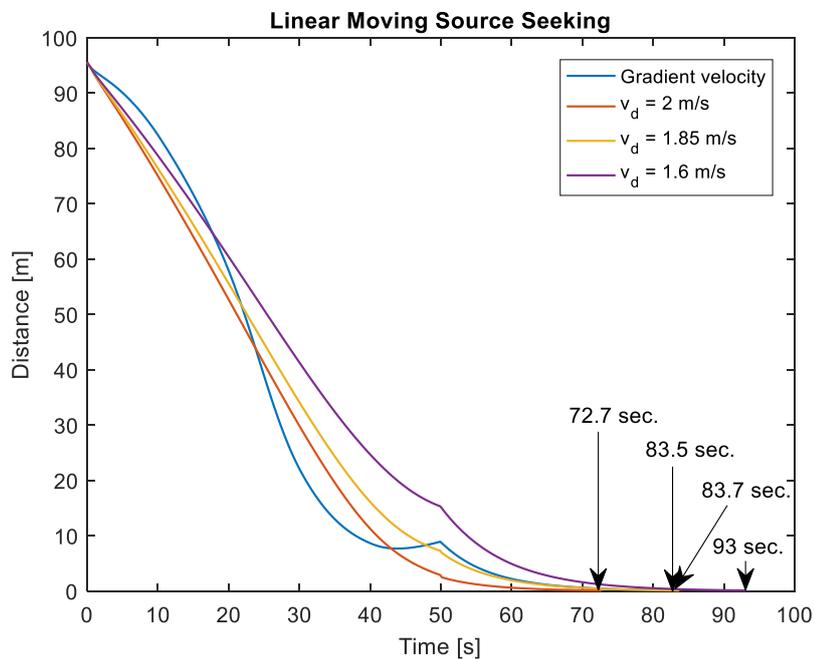
Jarak antara agen #1 dan sumber dari waktu ke waktu diilustrasikan seperti pada Gambar 4.18. Plot grafik menunjukkan bahwa pada *LD*, jarak antara agen #1

dan sumber berubah secara linier karena sumber juga bergerak linier. Di sisi lain, dalam eksperimen *LG*, agen awalnya bergerak lambat tetapi kemudian mengikuti kecepatannya, tergantung seberapa dekat dengan sumbernya.

Tabel 4.4, berisi ringkasan waktu pencarian sumber bergerak linier dengan kecepatan gradien (*LG*) dan kecepatan yang diinginkan (*LD*) yang ditentukan secara manual dengan beberapa nilai v_d . Terlihat di sini bahwa semakin tinggi v_d , semakin cepat agen mencapai sumber yang bergerak linier. Dibawah kontrol simulasi ini, eksperimen *LG* dan *LD* memiliki waktu pencarian yang sama jika $v_d \approx 1.85 \text{ m/s}$.

Tabel 4.4 Perbandingan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Sumber Bergerak Linier

No.	Eksperimen	v_d [m/s]	Waktu Cari [s]
1	LG pada Gambar 4.14	-	83.5
2	LD pada Gambar 4.15	1.6	93
3	LD pada Gambar 4.16	1.85	83.7
4	LD pada Gambar 4.17	2	72.7



Gambar 4.18 Jarak Agen #1 dan Sumber Bergerak Linier dengan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan

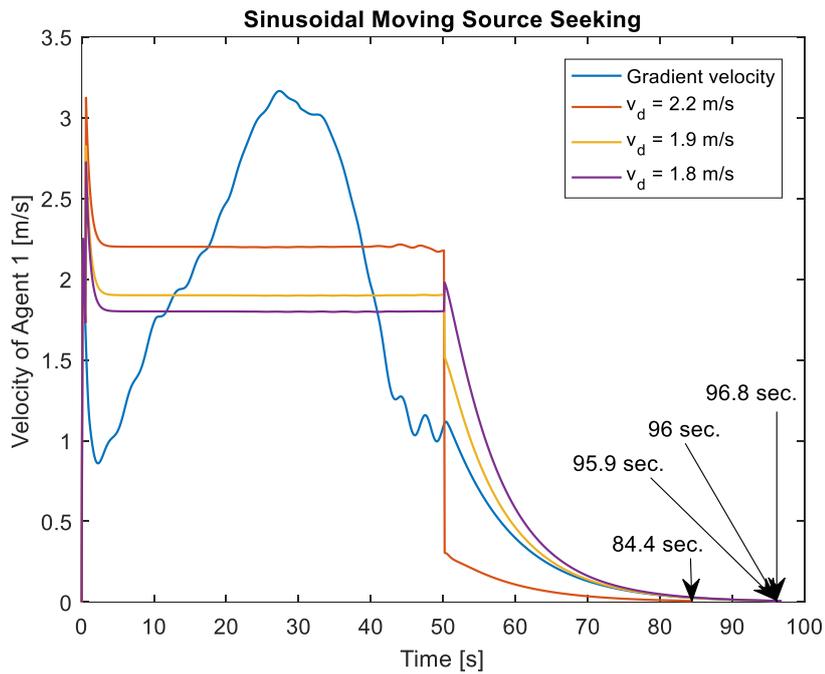
4.2.2 Simulasi Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal

Serupa dengan sumber bergerak linier pada sub bab 4.2.1, eksperimen kecepatan gradien (*SG* untuk *Sinusoidal source seeking with Gradient velocity*) dan kecepatan yang diinginkan (*SD* untuk *Sinusoidal source seeking with Desired velocity*) dipertimbangkan dalam sumber bergerak sinusoidal. Juga dianggap bahwa sumber berhenti bergerak setelah 50 s. Parameter yang digunakan di sini dalam sumber bergerak sinusoidal di (3.12) dan (3.13) adalah $v_x = -0.03 \text{ m/s}$, $v_y = 0.001 \text{ m/s}$, $A = 0.2 \text{ m}$, $\omega = 2 \text{ rad/s}$.

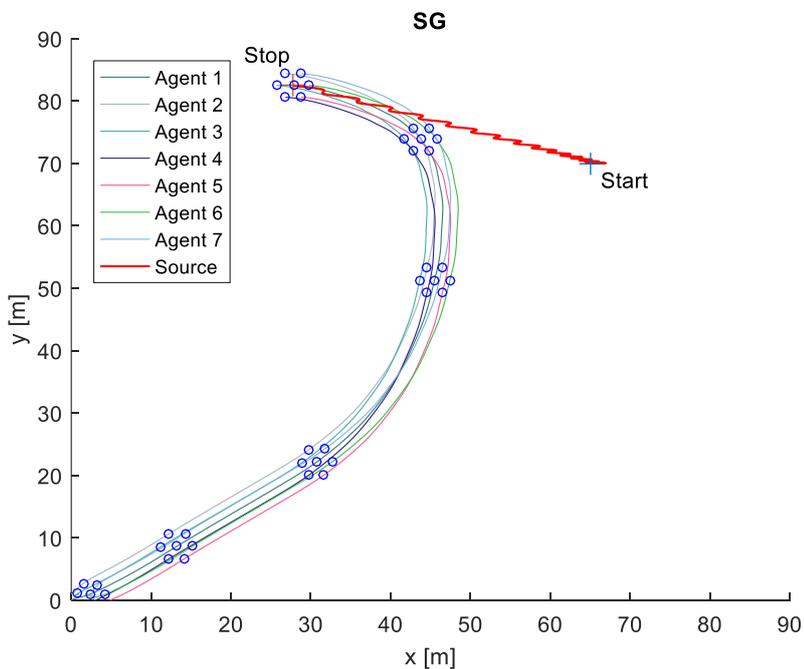
Dapat diamati dari Gambar 4.19 bahwa agen dibawah kecepatan gradien dan kecepatan konstan yang diinginkan juga dapat mencapai sumber yang bergerak secara sinusoidal, dengan agen #1 tepat mengenai sumber dibawah $t = 95.9 \text{ s}$ kecepatan gradien pada saat $t = 84.4 \text{ s}$ dengan kecepatan yang diinginkan $v_d = 2.2 \text{ m/s}$. Selain itu dapat dilihat dari Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 bahwa untuk eksperimen sinusoidal, agen mempertahankan formasinya untuk sebagian besar proses pencarian sumber.

Ditunjukkan pada Gambar 4.20 bahwa dengan gerakan sinusoidal dari sumber, terdapat interval dimana agen #1 bergerak sedikit lebih jauh dari sumber; Namun, akhirnya mencapai sumbernya. Mirip dengan sumber bergerak linier yang dibahas sebelumnya, agen dibawah kecepatan gradien awalnya bergerak lebih lambat tetapi kemudian mengikuti kecepatannya.

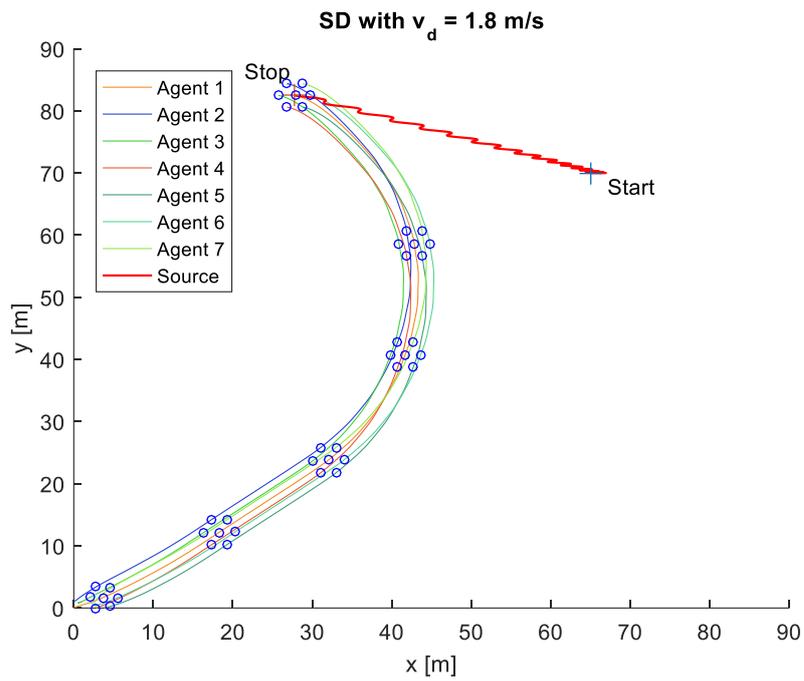
Perbandingan antara beberapa nilai untuk v_d eksperimen sinusoidal dapat dilihat pada Tabel 4.5, yang menunjukkan bahwa waktu pencarian juga menjadi lebih pendek seiring v_d bertambahnya; ini hampir mirip untuk eksperimen *SG* dan *SD* untuk $v_d = 1.9 \text{ m/s}$.



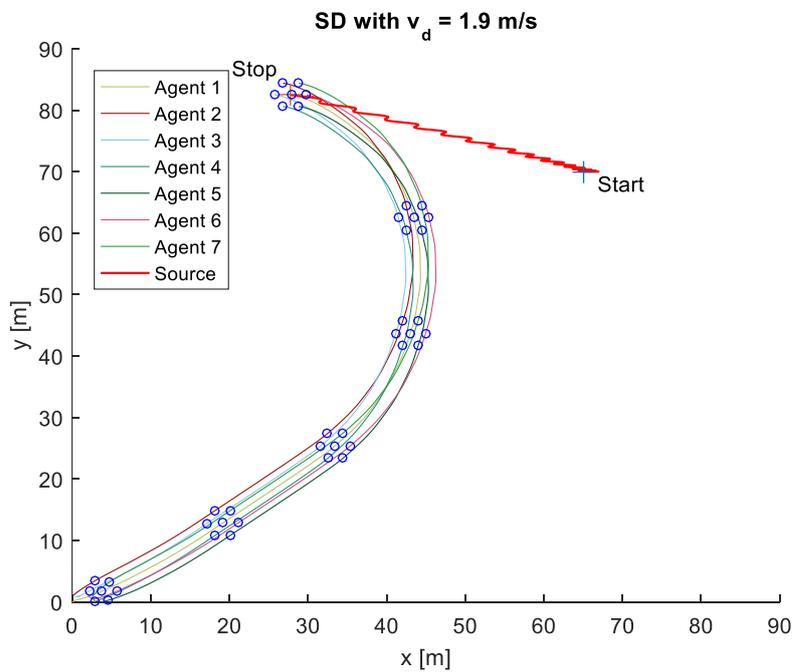
Gambar 4.19 Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan kecepatan v_d bervariasi



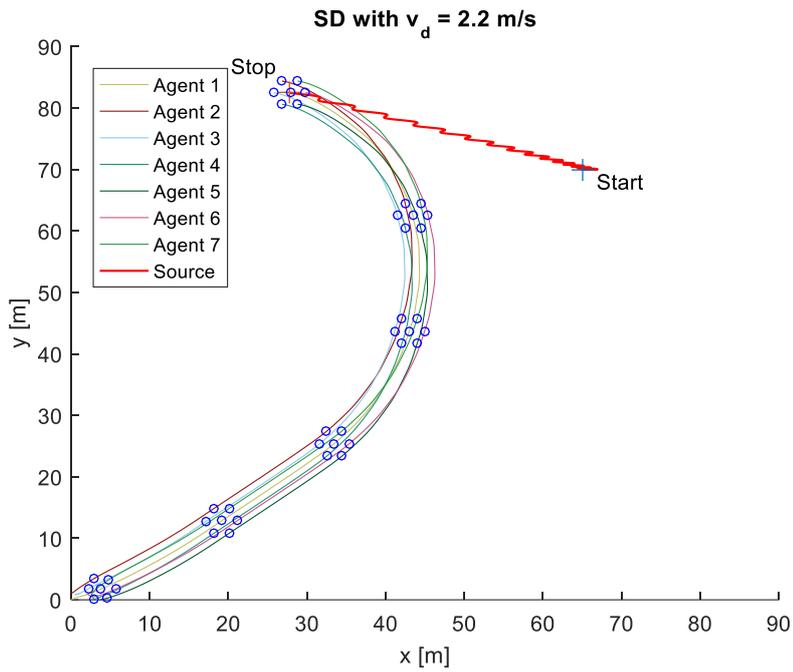
Gambar 4.20 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan Gradien



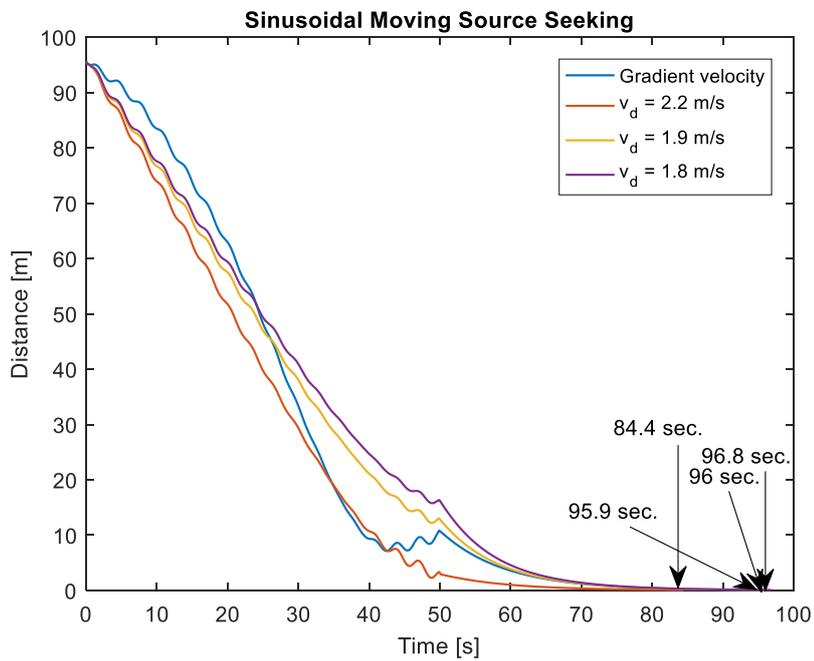
Gambar 4.21 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan $v_d = 1.8 \text{ m/s}$



Gambar 4.22 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan $v_d = 1.9 \text{ m/s}$



Gambar 4.23 Trayektori Kooperatif Multi-Agen Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan $v_d = 2.2\text{m/s}$



Gambar 4.24 Jarak Agen #1 dan Sumber Bergerak Sinusoidal dengan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan

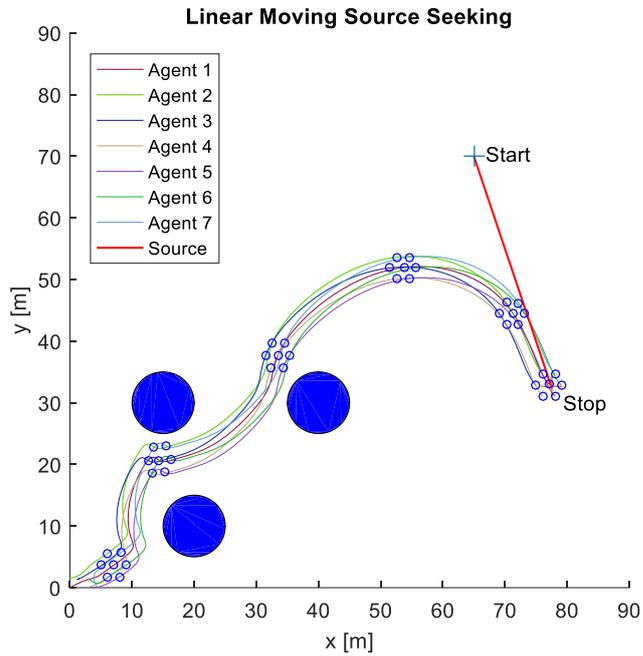
Tabel 4.5 Perbandingan Kecepatan Gradien dan Kecepatan yang Diinginkan pada Pencarian Sumber Bergerak Sinusoidal

No	Eksperimen	v_d [m/s]	Waktu Cari [s]
1	SG pada Gambar 4.20	-	95.9
2	SD pada Gambar 4.21	1.8	96.8
3	SD pada Gambar 4.22	1.9	96
4	SD pada Gambar 4.23	2.2	84.4

4.3 Kontrol Strategis Pencarian Sumber Bergerak dengan Rintangan

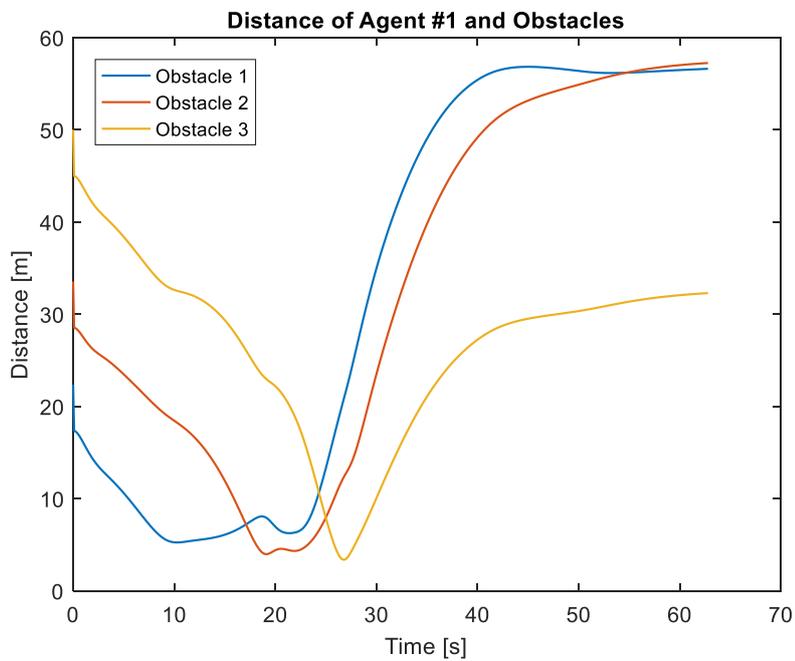
Pada penelitian ini, beberapa contoh numerik disediakan untuk pencarian sumber bergerak dengan penghindaran rintangan. Sumber bergerak linier dengan rintangan diam dan bergerak dipertimbangkan, dengan dan tanpa penyusutan agen. Parameter yang digunakan untuk sinyal kendali $u_i(t)$ adalah $k_F = 0.5$, $k_v = 6$, $k_{rep} = 0.01$, $k_r = 1$, $\gamma = 0.5$, dan $\beta = 1$.

Pada gambar yang ditampilkan di seluruh bagian ini, grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.25 dipertimbangkan. Agen #1, yang ditempatkan di tengah grafik, adalah agen penting dan akan digunakan untuk menunjukkan grafik dan posisi agen lain di seluruh eksperimen. Gambar 4.25 menunjukkan lintasan penghindaran rintangan dibawah tiga rintangan dan sebuah sumber bergerak secara linier sedangkan Gambar 4.26 mengilustrasikan jarak antara agen #1 dan ketiga rintangan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa agen mampu menangkap sumber sambil menghindari tiga rintangan diam.

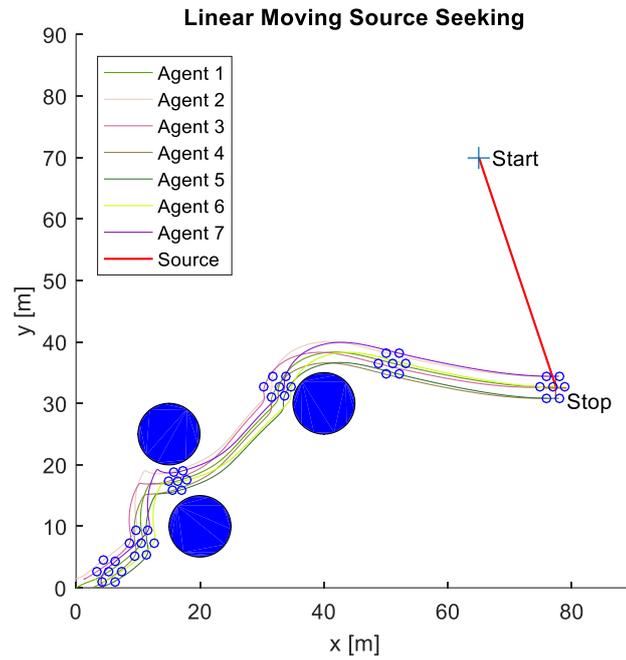


Gambar 4.25 Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan *APF* dimodifikasi (*MAPF*)

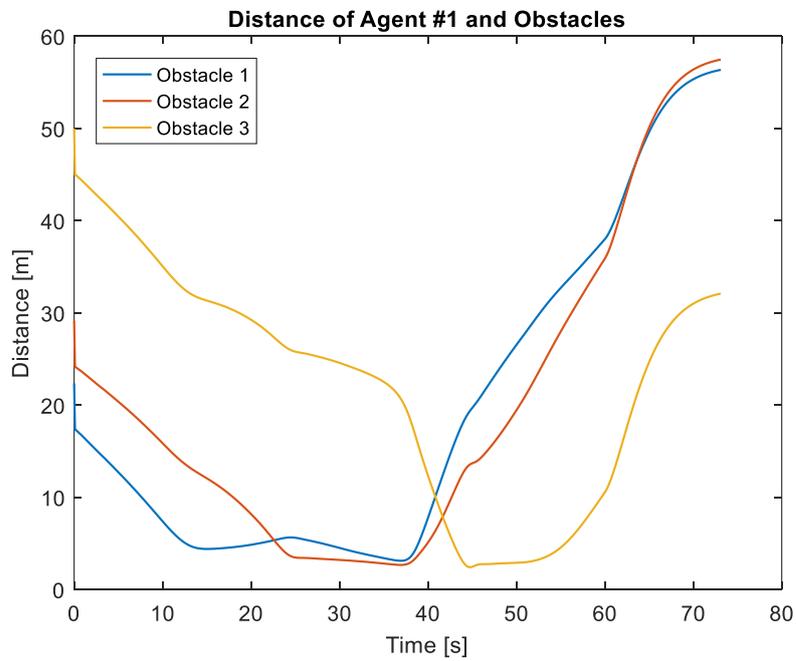
Lihat animasi di <http://bit.ly/MovingSourceSeekingWithObstaclesAvoidance>



Gambar 4.26 Jarak antara Agen #1 dan Rintangan dengan *APF* yang dimodifikasi (*MAPF*)



Gambar 4.27 Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan Formasi Menyusut dan *MAPF*

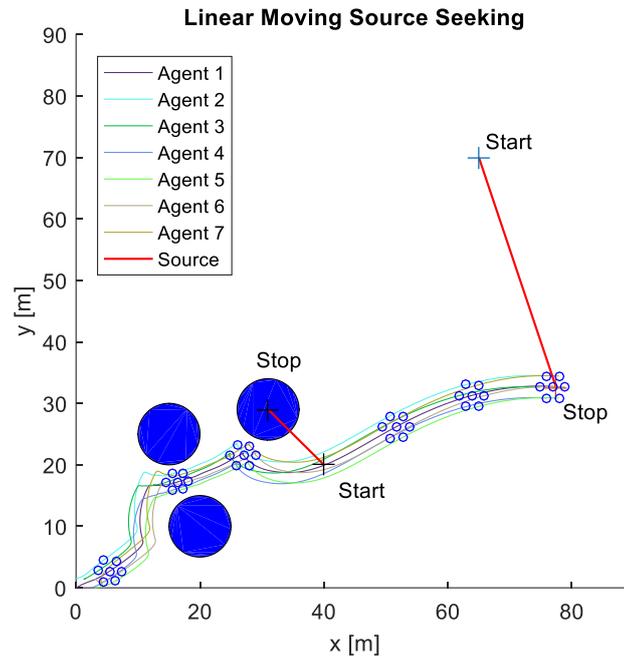


Gambar 4.28 Jarak antara Agen #1 dan Rintangan untuk Penyusutan Formasi dan *MAPF*

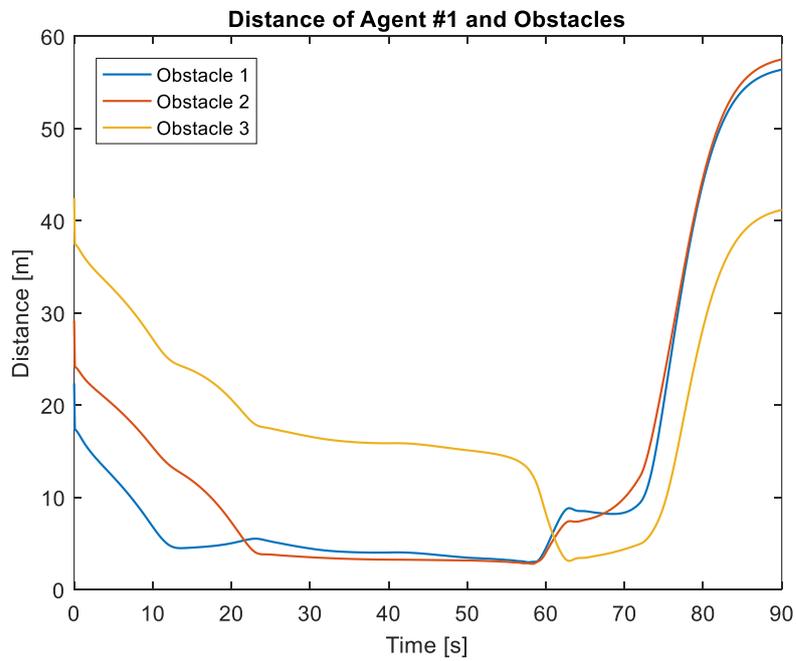
Dari Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 terlihat bahwa agen dapat mempertahankan formasi dan menghindari rintangan dengan jarak antar rintangan yang rapat. Ini dapat dicapai dengan melakukan manuver penyusutan agen. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.27, pada sekitar 20 detik posisi agen menjadi lebih padat karena ruang antar rintangan yang lebih sempit.

Selanjutnya, Gambar 4.29 menunjukkan lintasan penghindaran rintangan dengan dua rintangan diam dan satu rintangan bergerak yang bergerak ke atas dengan jarak yang ditunjukkan pada Gambar 4.30. Dari gambar tersebut terlihat bahwa agen mampu menangkap sumber sekaligus menghindari rintangan yang bergerak.

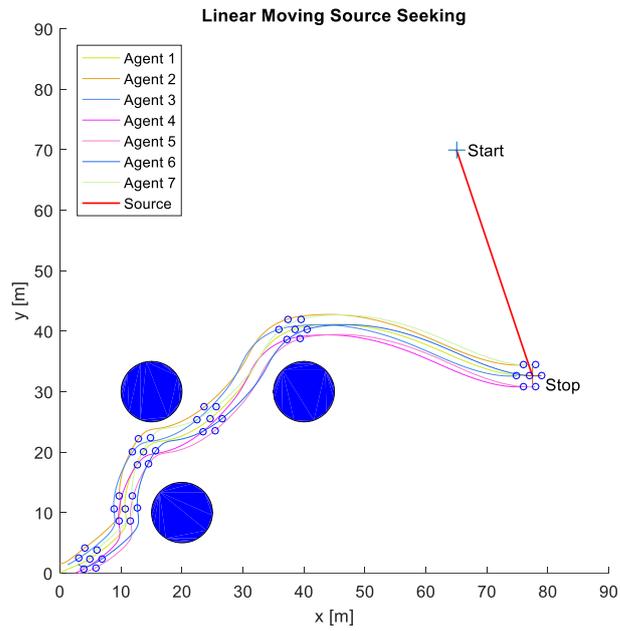
Hasilnya selanjutnya dibandingkan dengan *virtual APF* yang didefinisikan dalam (3.22). Secara khusus telah diperlihatkan, gambar yang terkait diperlihatkan dengan rintangan diam, rintangan diam dengan gerakan menyusut, dan rintangan bergerak dengan gerakan menyusut. Dari Gambar 4.31 sampai Gambar 4.36 terlihat bahwa agen dapat mencapai sumber dalam semua eksperimen. Kedua metode agen mencapai sumber tercepat ketika semua rintangan tidak bergerak. Di sisi lain, agen mencapai sumber paling lambat di kedua metode saat rintangan bergerak, karena mereka harus bermanuver untuk menghindari rintangan yang lebih gesit.



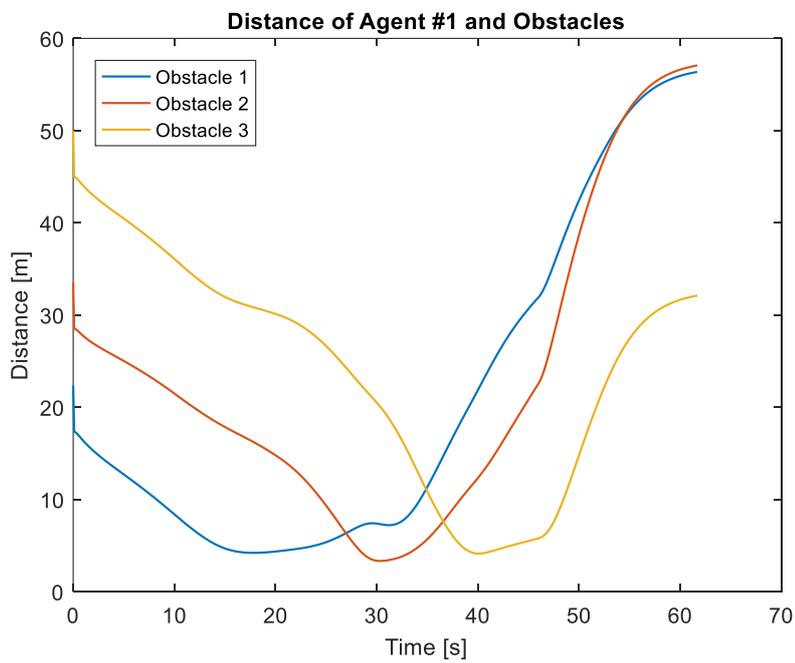
Gambar 4.29 Trayektori Penghindaran Rintangan Bergerak dan *MAPF*



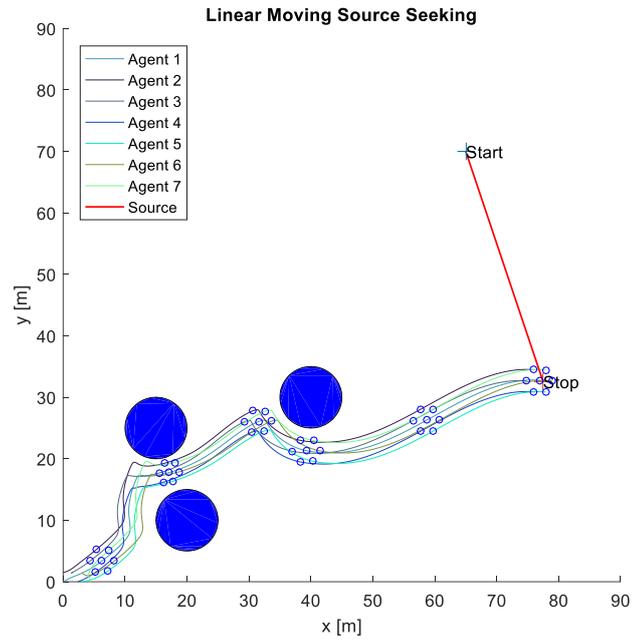
Gambar 4.30 Jarak antara Agen #1 dan Rintangan untuk Rintangan Bergerak dan *MAPF*



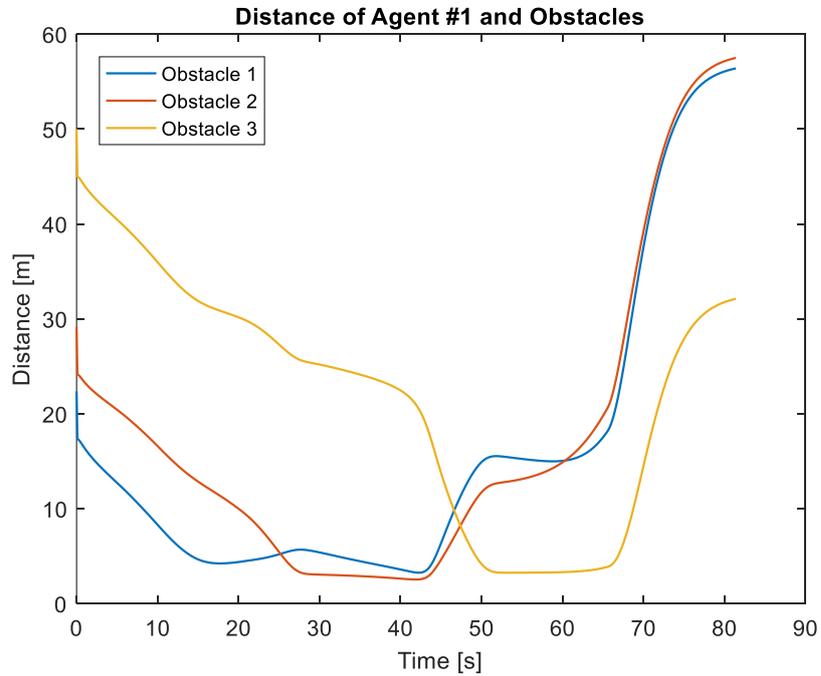
Gambar 4.31 Trayektori Penghindaran Rintangan Diam dengan *Virtual APF (VAPF)*



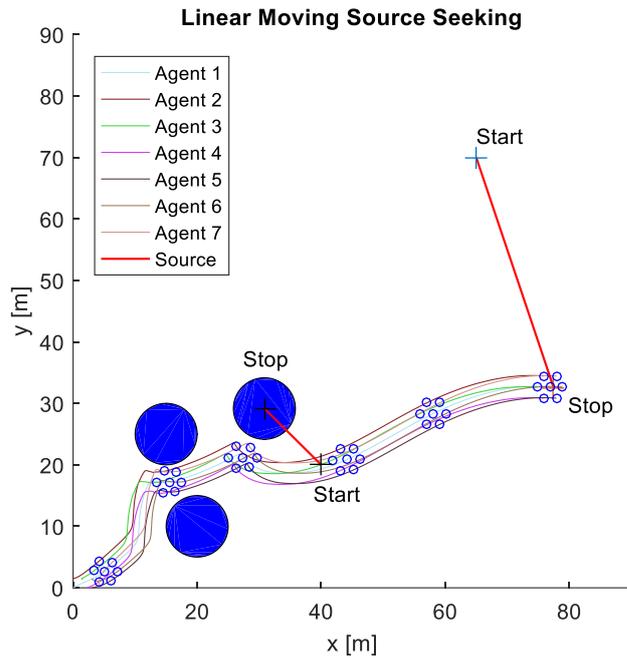
Gambar 4.32 Jarak antara Agen #1 dan Rintangan dengan *Virtual APF (VAPF)*



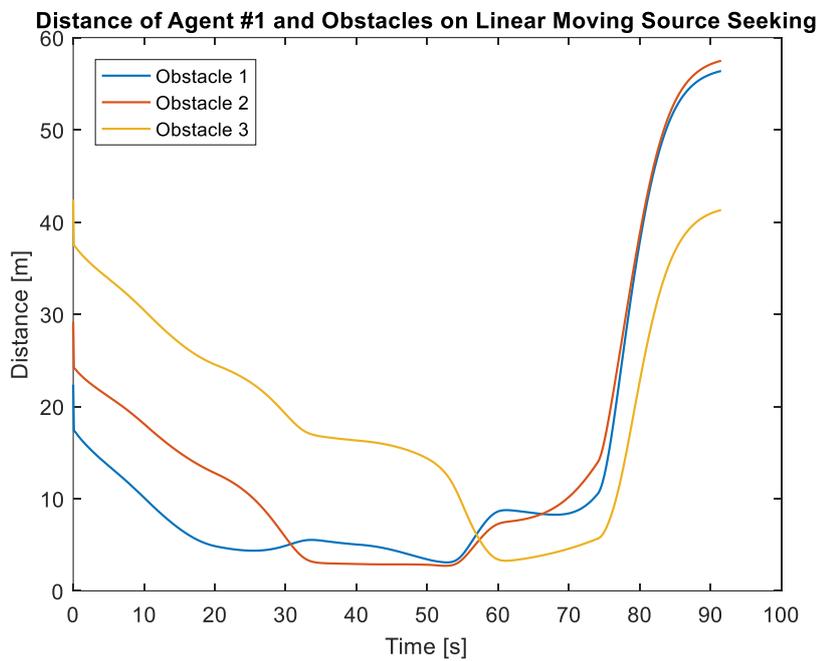
Gambar 4.33 Trayektori Penghindaran Rintangian Diam dengan Formasi Menyusut dan *Virtual APF*



Gambar 4.34 Jarak antara Agen #1 dan Rintangian dengan Formasi Menyusut dan *Virtual APF*



Gambar 4.35 Trayektori Penghindaran Rintangan Bergerak dengan *Virtual APF*



Gambar 4.36 Jarak antara Agen #1 dan Rintangan untuk Rintangan Bergerak dengan *Virtual APF*

Jarak minimum antara Agen #1 dan masing-masing dari tiga rintangan serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai sumber bergerak untuk *MAPF* dan *VAPF* diilustrasikan pada Tabel 4.6. Dapat dilihat bahwa di Tabel 4.6 menunjukkan perbandingan antara metode yang diusulkan *MAPF* versus *VAPF*. Variabel 'min dist' adalah jarak minimum dengan tepi rintangan. Ketiga 'min dist' menyatakan jarak minimum agen #1 terhadap tiga rintangan masing-masing. Tiga eksperimen dilakukan, yaitu rintangan statis, rintangan statis dengan formasi menyusut, dan rintangan bergerak dengan formasi menyusut. Terlihat bahwa dalam semua eksperimen, jarak minimum lebih besar dari jarak yang diperbolehkan.

Dari Tabel 4.6, terlihat bahwa metode yang diusulkan menggabungkan konsensus gradien dengan *MAPF* dapat bekerja lebih baik dibandingkan dengan *virtual APF* dalam skenario formasi menyusut karena ruang antar 2 rintangan yang berdekatan, dan formasi menyusut dengan rintangan bergerak, dengan waktu pencarian yang diperlukan dengan *MAPF* versus *VAPF* untuk mencapai sumber adalah 73,1 detik versus 81,4 detik dan 90 detik versus 91,5 detik berturut-turut. Jadi, untuk situasi dimana agen perlu menyusut untuk menghindari rintangan, terlihat bahwa metode *MAPF* dapat bekerja lebih baik dibandingkan dengan *VAPF*.

Tabel 4.6 Jarak Minimum antara Agen #1 dan Tiga Rintangan dengan APF yang Dimodifikasi dan Virtual

No.	Eksperimen	min jarak1 (m)	min jarak2 (m)	min jarak3 (m)	Waktu (detik)
1	Statis: MAPF	5.25	3.98	3.37	62.8
2	Statis: VAPF	4.22	3.34	4.14	61.7
3	Menyusut: MAPF	3.13	2.68	2.43	73.1
4	Menyusut: VAPF	3.26	2.54	3.26	81.4
5	Menyusut+Bergerak: MAPF	2.97	2.80	3.12	90
6	Menyusut+Bergerak: VAPF	3.27	2.54	0,17	91.5

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian perubahan formasi dan topologi pada pencarian sumber, menyajikan tiga jenis skenario, yakni skenario pergantian 2 formasi, pergantian 3 formasi, dan pergantian 4 formasi. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa skenario dengan menggunakan pergantian 2, 3, dan 4 formasi sangat baik. Perbandingan dengan ketiga skenario tersebut, dimana skenario pergantian 2 formasi adalah yang terbaik, karena memiliki resultan deviasi minimum 1.0505.

Pada penelitian kontrol kecepatan terdistribusi pada sistem multi-agen yang harus melacak sumber bergerak sambil mempertahankan formasi tertentu dari waktu ke waktu menggunakan kontrol formasi. Dua jenis kecepatan terdistribusi agen dipertimbangkan untuk melacak sumber bergerak, yakni kecepatan gradien, dan kecepatan yang diinginkan. Dengan kedua kecepatan tersebut, terlihat bahwa agen dapat mencapai sumber yang bergerak baik secara linear maupun sinusoidal. Dalam beberapa eksperimen kecepatan yang diinginkan dapat bekerja lebih baik, yaitu memberikan waktu pencarian yang lebih singkat untuk mendapatkan sumbernya. Yakni pencarian pada linier dan sinusoidal sumber bergerak dengan $v_d = 2\text{m/s}$ dan 2.2m/s , dengan waktu pencarian 72.7s , dan 84.4s berturut-turut.

Dalam penelitian kontrol strategis merupakan kombinasi dari konsensus gradien dan kontrol kecepatan berbasis medan potensi buatan dari sistem multi-agen yang mencari sumber bergerak sambil menghindari rintangan. Pendekatan kecepatan konsensus gradien digunakan untuk menyesuaikan kecepatan agen, yang bertugas melacak posisi sumber bergerak sambil menghindari rintangan dengan memancarkan gaya tolak tertentu yang dinyatakan dalam *modified artificial potential field (MAPF)*. Dibawah kontrol kecepatan konsensus gradien dan metode penghindaran rintangan *MAPF* ini, terlihat bahwa agen dapat mencapai sumber bergerak sambil menghindari rintangan diam dan bergerak. Terlihat bahwa metode yang diusulkan menggabungkan konsensus gradien dengan *MAPF* dapat bekerja lebih baik dibandingkan dengan *virtual APF* dalam skenario formasi menyusut

karena ruang antar 2 rintangan yang berdekatan, dan formasi menyusut dengan rintangan bergerak, dengan waktu pencarian yang diperlukan dengan *MAPF* versus *VAPF* untuk mencapai sumber adalah 73,1 detik versus 81,4 detik dan 90 detik versus 91,5 detik berturut-turut.

5.2 Saran

Sangat menarik untuk melakukan penelitian terkait dengan penggunaan model agen *UAV*, perubahan formasi dan topologi yang disebabkan oleh situasi lingkungan atau penugasan terhadap kooperatif multi-agen, sumber dengan *multiple optima* bergerak, pencarian sumber asal (*original source seeking*), konsensus Hessian, penghindaran rintangan 3 dimensi, dan kontrol trayektori kooperatif multi-agen model *UAV*, dengan skenario yang lebih menantang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mesbahi and M. Egerstedt, *Graph theoretic methods in multiagent networks*. 2010. doi: 10.1515/9781400835355.
- [2] A. Turgeman and H. Werner, “Multiple Source Seeking using Glowworm Swarm Optimization and Distributed Gradient Estimation,” in *Proceedings of the American Control Conference*, 2018. doi: 10.23919/ACC.2018.8430843.
- [3] R. Fabbiano, F. Garin, and C. C. De Wit, “Distributed Source Seeking Without Global Position Information,” *IEEE Trans Control Netw Syst*, vol. 5, no. 1, pp. 228–238, 2018, doi: 10.1109/TCNS.2016.2594493.
- [4] F. Zhang and N. E. Leonard, “Cooperative filters and control for cooperative exploration,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 55, no. 3, 2010, doi: 10.1109/TAC.2009.2039240.
- [5] “Information consensus in multivehicle cooperative control,” *IEEE Control Syst*, vol. 27, no. 2, 2007, doi: 10.1109/mcs.2007.338264.
- [6] W. Ren and E. Atkins, “Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 17, no. 10–11, 2007, doi: 10.1002/rnc.1147.
- [7] J. S. Shamma, *Cooperative Control of Distributed Multi-Agent Systems*. 2007. doi: 10.1002/9780470724200.
- [8] R. Olfati-Saber and J. S. Shamma, “Consensus filters for sensor networks and distributed sensor fusion,” in *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, CDC-ECC '05*, 2005. doi: 10.1109/CDC.2005.1583238.
- [9] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, “Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 49, no. 9, 2004, doi: 10.1109/TAC.2004.834113.
- [10] E. Rosero and H. Werner, “Cooperative source seeking via gradient estimation and formation control (Part 1),” in *2014 UKACC International Conference on Control, CONTROL 2014 - Proceedings*, 2014. doi: 10.1109/CONTROL.2014.6915212.
- [11] E. Rosero and H. Werner, “Cooperative source seeking via gradient estimation and formation control (Part 2),” in *2014 UKACC International*

- Conference on Control, CONTROL 2014 - Proceedings*, 2014. doi: 10.1109/CONTROL.2014.6915213.
- [12] E. Rosero and H. Werner, “Modified distributed consensus filter for sensor networks,” in *2014 European Control Conference, ECC 2014*, 2014. doi: 10.1109/ECC.2014.6862440.
- [13] T. Miyazaki and K. Takaba, “Formation control of mobile robots with obstacle avoidance,” in *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2014. doi: 10.1109/ICCAS.2014.6987970.
- [14] J. Sun, J. Tang, and S. Lao, “Collision Avoidance for Cooperative UAVs With Optimized Artificial Potential Field Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18382–18390, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2746752.
- [15] J. Zhang, J. Yan, and P. Zhang, “Fixed-wing UAV formation control design with collision avoidance based on an improved artificial potential field,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78342–78351, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885003.
- [16] J. Cochran and M. Krstic, “Nonholonomic source seeking with tuning of angular velocity,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 54, no. 4, pp. 717–731, 2009, doi: 10.1109/TAC.2009.2014927.
- [17] C. Zhang, D. Arnold, N. Ghods, A. Siranosian, and M. Krstic, “Source seeking with non-holonomic unicycle without position measurement and with tuning of forward velocity,” *Syst Control Lett*, vol. 56, no. 3, 2007, doi: 10.1016/j.sysconle.2006.10.014.
- [18] J. Cochran, A. Siranosian, N. Ghods, and M. Krstic, “3-D source seeking for underactuated vehicles without position measurement,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 1, pp. 117–129, 2009, doi: 10.1109/TRO.2008.2008742.
- [19] A. S. Matveev, H. Teimoori, and A. V. Savkin, “Navigation of a unicycle-like mobile robot for environmental extremum seeking,” *Automatica*, vol. 47, no. 1, pp. 85–91, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.automatica.2010.10.003.
- [20] S. I. Azuma, M. S. Sakar, and G. J. Pappas, “Stochastic source seeking by mobile robots,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 57, no. 9, pp. 2308–2321, 2012, doi: 10.1109/TAC.2012.2186927.
- [21] R. Fabbiano, C. C. De Wit, and F. Garin, “Distributed Source Localisation with no Position Information,” in *2014 European Control Conference, ECC 2014*, 2014. doi: 10.1109/ECC.2014.6862562.
- [22] P. Ogren, E. Fiorelli, and N. E. Leonard, “Cooperative Control of Mobile Sensor Networks: Adaptive Gradient Climbing in a Distributed

- Environment,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 49, no. 8, pp. 1292–1302, Aug. 2004, doi: 10.1109/TAC.2004.832203.
- [23] E. Biyik and M. Arcak, “Gradient climbing in formation via extremum seeking and passivity-based coordination rules,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2007. doi: 10.1109/CDC.2007.4434735.
- [24] L. Briñón-Arranz, A. Seuret, and C. Canudas-De-Wit, “Collaborative estimation of gradient direction by a formation of AUVs under communication constraints,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2011. doi: 10.1109/CDC.2011.6160776.
- [25] S. Zhu, D. Wang, and C. B. Low, “Cooperative Control of Multiple UAVs for Source Seeking,” *J Intell Robot Syst*, vol. 70, no. 1–4, pp. 293–301, Apr. 2013, doi: 10.1007/s10846-012-9739-9.
- [26] S. Zhu, D. Wang, and C. B. Low, “Cooperative control of multiple UAVs for moving source seeking,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 74, no. 1–2, 2014, doi: 10.1007/s10846-013-9899-2.
- [27] J. A. Fax and R. M. Murray, “Information flow and cooperative control of vehicle formations,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 49, no. 9, 2004, doi: 10.1109/TAC.2004.834433.
- [28] F. Borrelli and T. Keviczky, “Distributed LQR design for identical dynamically decoupled systems,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 53, no. 8, 2008, doi: 10.1109/TAC.2008.925826.
- [29] P. Massioni and M. Verhaegen, “Distributed control for identical dynamically coupled systems: A decomposition approach,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 54, no. 1, 2009, doi: 10.1109/TAC.2008.2009574.
- [30] A. P. Popov and H. Werner, “A robust control approach to formation control,” in *2009 European Control Conference, ECC 2009*, 2014. doi: 10.23919/ecc.2009.7075097.
- [31] U. Pilz, A. P. Popov, and H. Werner, “Robust controller design for formation flight of quad-rotor helicopters,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2009. doi: 10.1109/CDC.2009.5400593.
- [32] A. M. Gonzalez and H. Werner, “LPV formation control of non-holonomic multi-agent systems,” in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014. doi: 10.3182/20140824-6-za-1003.01453.
- [33] A. M. Gonzalez, C. Hoffmann, and H. Werner, “LPV formation control for a class of non-holonomic agents with directed and switching

- communication topologies,” in *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, Dec. 2015, pp. 2792–2797. doi: 10.1109/CDC.2015.7402639.
- [34] S. Ahmadi Barogh, E. Rosero, and H. Werner, “Formation control of non-holonomic agents with collision avoidance,” in *Proceedings of the American Control Conference*, 2015. doi: 10.1109/ACC.2015.7170825.
- [35] M. Sahal, “Comparison of Gradient Estimation in Cooperative Multi-Agent Source Seeking,” *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, vol. 1, no. 2, 2017, doi: 10.12962/j25796216.v1.i2.21.
- [36] O. Khatib, “REAL-TIME OBSTACLE AVOIDANCE FOR MANIPULATORS AND MOBILE ROBOTS.,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, 1986, doi: 10.1177/027836498600500106.
- [37] Y. Koren and J. Borenstein, “Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991. doi: 10.1109/robot.1991.131810.
- [38] S. S. Ge and Y. J. Cui, “New potential functions for mobile robot path planning,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, 2000, doi: 10.1109/70.880813.
- [39] I. Iswanto, A. Ma’arif, O. Wahyunggoro, and A. Imam, “Artificial Potential Field Algorithm Implementation for Quadrotor Path Planning,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, no. 8, 2019, doi: 10.14569/IJACSA.2019.0100876.
- [40] Z. Li, K. You, and S. Song, “Cooperative source seeking via networked multi-vehicle systems,” *Automatica*, vol. 115, 2020, doi: 10.1016/j.automatica.2020.108853.
- [41] A. Ma’Arif, W. Rahmaniari, M. A. M. Vera, A. A. Nuryono, R. Majdoubi, and A. Cakan, “Artificial Potential Field Algorithm for Obstacle Avoidance in UAV Quadrotor for Dynamic Environment,” in *2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, IEEE, Jul. 2021, pp. 184–189. doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530803.
- [42] S. Al-Abri and F. Zhang, “A Distributed Active Perception Strategy for Source Seeking and Level Curve Tracking,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 67, no. 5, 2022, doi: 10.1109/TAC.2021.3077457.
- [43] J. I. Poveda, M. Benosman, A. R. Teel, and R. G. Sanfelice, “Robust Coordinated Hybrid Source Seeking with Obstacle Avoidance in

Multivehicle Autonomous Systems,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 67, no. 2, 2022, doi: 10.1109/TAC.2021.3056365.

- [44] M. Sahal, T. Agustinah, and A. Jazidie, “Switching Formation and Topology in Cooperative Multi-Agent Source Seeking Using Gradient Estimation,” in *Proceeding - 2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology, ICAIT 2019*, 2019. doi: 10.1109/ICAIT.2019.8834525.

BIOGRAFI PENULIS

Informasi Personal

Mochammad Sahal, S.T., M.Sc.

Lektor; Penata Tingkat I; III/c

NIDN: 0019117002

Departemen Teknik Elektro,

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika

Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,

Gedung B, C, dan AJ Kampus ITS, Keputih,

Sukolilo, Surabaya, 60111



sahal@ee.its.ac.id

Tahun	Pendidikan	Beasiswa
Doktoral 2016 – 2023	Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia	-
Insyaa Allaah		
Master of Science 2005 – 2007	Double Degrees of Electrical Engineering, Darmstadt University of Applied Sciences, Germany and Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia	DIKTI
Sarjana Teknik 1990 – 1997	Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia	-

Daftar Publikasi

1. M. Sahal, T. Agustinah, and A. Jazidie, "Switching Formation and Topology in Cooperative Multi-Agent Source Seeking Using Gradient Estimation," in *Proceeding - 2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology, ICAIIT 2019*, 2019. doi: 10.1109/ICAIT.2019.8834525.
2. M. Sahal, T. Agustinah, A. Jazidie, and H. Du, "Distributed Velocity Control in Cooperative Multi-Agent Moving Source Seeking," *Przeegląd Elektrotechniczny*, to appear in August 2023.
3. M. Sahal, T. Agustinah, A. Jazidie, and H. Du, "Strategic Control in Cooperative Multi-Agent Moving Source Seeking with Obstacles Avoidance," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, Vol.xx, No.x, pp.xxx-xxx, 202x. DOI: xx.xxxxx/ijies2023.xxxx.xx, to appear in late August 2023..