

**ANALISA KOMPARASI PEMODELAN PENGENDALIAN
FORMASI MULTI-ROBOT DENGAN MENGGUNAKAN
LOGIKA FUZZY TIPE 2 – MODIFIED PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

TESIS



OLEH

**ANGGUN ISLAMI
09012682024004**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

**ANALISA KOMPARASI PEMODELAN PENGENDALIAN
FORMASI MULTI-ROBOT DENGAN MENGGUNAKAN
LOGIKA FUZZY TIPE 2 – MODIFIED PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

TESIS

**Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister**



OLEH

**ANGGUN ISLAMI
09012682024004**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA KOMPARASI PEMODELAN
PENGENDALIAN FORMASI MULTI-ROBOT
DENGAN MENGGUNAKAN LOGIKA *FUZZY* TIPE 2 –
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**

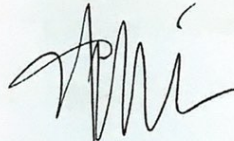
TESIS

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister

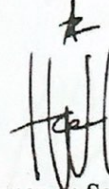
**OLEH:
ANGGUN ISLAMI
09012682024004**

Palembang, Juli 2022
Pembimbing II

Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T
NIP. 196908021994012001



Hadipurnawan Satria, Ph.D.
NIP. 198004182020121001

Mengetahui,
Koordinator Program Studi Magister Ilmu Komputer



Dian Palupi Rini, S.Si, M.Kom, Ph.D
NIP. 197802232006042002



HALAMAN PERSETUJUAN

Pada hari Senin tanggal 11 Juli 2022 telah dilaksanakan ujian sidang tesis oleh Magister Ilmu Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.

Nama : Anggun Islami
N I M : 09012682024004
Judul : Analisa Komparasi Pemodelan Pengendalian Formasi Multi Robot Dengan Menggunakn *Logika Fuzzy Tipe 2 – Particle Swarm Optimization*


1. Pembimbing I

Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T.
NIP. 196908021994012001


.....


2. Pembimbing II

Hadipurnawan Satria, Ph.D.
NIP. 198004182020121001


.....

3. Penguji I

Dr. Ir. Sukemi, M.T.
NIP. 196612032006041001


.....

4. Penguji II

Muhammad Qurhanul Rizqic, Ph.D
NIP. 198712032022031006


.....

Mengetahui,
Koordinator Program Studi Magister Ilmu Komputer



Dian Palupi Rini, S.Si, M.Kom, Ph.D
NIP.197802232006042002

LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Anggun Islami
NIM : 09012682024004
Program Studi : Magister Ilmu Komputer
Judul Tesis : Analisa Komparasi Pemodelan Pengendalian Formasi
Multi Robot Dengan Menggunakan *Logika Fuzzy Tipe 2 –
Particle Swarm Optimization*

Hasil Pengecekan Software iThenticate/Turnitin : 18 %

Menyatakan bahwa laporan tesis saya merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam laporan tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan tidak ada paksaan oleh siapapun.



Palembang, Juli 2022



Anggun Islami

NIM. 09012682024004

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin. Puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan kesehatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul **“Analisa Komparasi Pemodelan Pengendalian Formasi Multi Robot Dengan Menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2 – Particle Swarm Optimization”**

Pada penyusunan tesis ini, penulis banyak mendapatkan ide dan saran serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan rasa syukur kepada Allah SWT dan terimakasih kepada yang terhormat :

1. Kedua orang tua beserta keluarga yang selalu mendoakan serta memberikan motivasi dan semangat.
2. Ibu Dian Palupi Rini, S.Si, M.Kom., Ph.D selaku Koordinator Program Studi Magister Ilmu Komputer
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Hadipurnawan Satria, Ph.D. selaku Pembimbing II yang telah berkenan meluangkan waktunya guna membimbing, memberikan saran serta bimbingan terbaik untuk penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Bapak Dr. Ir. Sukemi, M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Semua dosen Program Studi Magister Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya yang telah melimpahkan ilmunya kepada penulis.
6. Seluruh teman-teman Jurusan Magister Ilmu Komputer angkatan 2020 yang tidak dapat saya tulis satu persatu yang telah memotivasi penulis untuk menyelesaikan Tesis ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan Tesis ini. Penulis berharap semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak khususnya Magister Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.

Palembang, Juli 2022

Penulis

ANALISA KOMPARASI PEMODELAN PENGENDALIAN FORMASI MULTI-ROBOT DENGAN MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY TIPE 2 – PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Anggun Islami

*Jurusan Magister Ilmu Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya
anggunislami2@gmail.com

Abstrak

Multi robot merupakan robot yang terdiri dari beberapa robot yang saling terhubung serta dapat berkomunikasi dan berkolaborasi satu sama lain untuk menyelesaikan suatu tujuan dengan kesamaan fisik yang memiliki dua roda terkendali dan satu roda bebas bergerak dengan kecepatan yang sama. Dalam penelitian ini, untuk mengendalikan pergerakan formasi multi robot dalam mencari target karena harus menciptakan bentuk geometris yang dinamis menuju target merupakan masalah utama. Dalam pergerakannya memerlukan suatu sistem kendali agar dapat berpindah posisi sesuai dengan yang diinginkan. Untuk formasi pergerakan multi robot memiliki trajektori sendiri yang telah ditentukan dengan relatif konstan dalam kecepatan dan akselerasi yang bervariasi, bahkan keadaan berhenti mendadak. Berdasarkan kelemahan tersebut, robot-robot harus dapat menghindari rintangan dan mencapai target. Penelitian ini menggunakan algoritma *Logika Fuzzy tipe 2 – Particle Swarm Optimization* yang dibandingkan dengan *Logika Fuzzy tipe 2 – Modified Particle Swarm Optimization* dan *Logika Fuzzy tipe 2 – Dynamic Particle Swarm Optimization*. Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan pada setiap lingkungan didapatkan bahwa pada *Logika Fuzzy tipe 2 – Modified Particle Swarm Optimization* memiliki data iterasi, waktu, dan *resouce* yang lebih baik serta pergerakan robot yang lebih halus dibandingkan *Logika Fuzzy tipe 2 – Particle Swarm Optimization* dan *Logika Fuzzy tipe 2 – Dynamic Particle Swarm Optimization*.

Kata Kunci : *Multi-robot, Fuzzy Logic Type 2 , Particle Swarm Optimization, Modified Particle Swarm Optimization, Dynamic Particle Swarm Optimization.*

COMPARATIVE ANALYSIS MULTI-ROBOT FORMATION CONTROL MODELING USING FUZZY LOGIC TYPE 2 – PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Anggun Islami

Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Science,
Universitas Sriwijaya
*anggunislami2@gmail.com

Abstract

Multi-robot is a robotic system consisting of several robots that are interconnected and can communicate and collaborate with each other to complete a goal. With physical similarities, they have two controlled wheels and one free wheel that moves at the same speed. In this Problem, there is a main problem remaining in controlling the movement of the multi robot formation in searching the target. It occurs because the robots have to create dynamic geometric shapes towards the target. In its movement, it requires a control system in order to move the position as desired. For multi-robot movement formations, they have their own predetermined trajectories which are relatively constant in varying speeds and accelerations even in sudden stops. Based on these weaknesses, the robots must be able to avoid obstacles and reach the target. This research used Fuzzy Logic type 2 – Particle Swarm Optimization algorithm which was compared with Fuzzy Logic type 2 – Modified Particle Swarm Optimization and Fuzzy Logic type 2 – Dynamic Particle Swarm Optimization. Based on the experiments that had been carried out in each environment, it was found that Fuzzy Logic type 2 - Modified Particle Swarm Optimization had better iteration, time and resource and also smoother robot movement than Fuzzy Logic type 2 - Particle Swarm Optimization and Fuzzy Logic type 2 - Dynamic Particle Swarm Optimization.

Keywords: Multi-robot, Fuzzy Logic Type 2 , Particle Swarm Optimization, Modified Particle Swarm Optimization, Dynamic Particle Swarm Optimization

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Perumusan Masalah	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Sistematika Pembahasan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Pemodelan <i>Multi Robot</i>	7
2.2 Kecerdasan pada <i>Multi Robot</i>	10
2.3 Kendali Formasi	12

2.4 Metode Kendali Formasi pada <i>Multi Robot</i>	14
2.5 Pencarian Target dengan Kecerdasan Buatan	14
2.6 Algoritma Fuzzy Logic	16
2.6.1 Algoritma LFT 1	17
2.6.1.1 Fuzzifikasi LFT 1	17
2.6.1.2 Fungsi Keanggotaan LFT 1	17
2.6.1.3 Rule Base LFT 1	20
2.6.1.4 Inferensi LFT 1	20
2.6.1.5 Defuzzifikasi LFT 1	20
2.6.2 Logika Fuzzy Tipe 2 (LFT 2)	20
2.6.2.1 Fuzzifikasi LFT 2	21
2.6.2.2 Fungsi Keanggotaan LFT 2	22
2.6.2.3 Rule Base LFT 2	22
2.6.2.4 Inferensi LFT 2	22
2.6.2.5 Reduksi tipe LFT 2	22
2.6.2.5 Defuzzifikasi LFT 2	24
2.7 Diagram Penelitian	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Pendahuluan	27
3.2 Kerangka Kerja	27
3.3 Pemodelan Sistem	29
3.3.1 Pemodelan <i>Multi Robot</i>	29
3.3.1.1 Pemodelan Persamaan Kinematik Robot Individu	29
3.3.1.2 Non-Holonomik Constraints DDMR	32

3.3.1.3	Persamaan Steering System Mobile Robot	34
3.3.1.4	Pemodelan <i>Multi Robot</i>	38
3.4	Sensor Ultrasonik	39
3.5	Pemodelan metode Interval Type 2 fuzzy Logic System	41
3.5.1	Fuzzifikasi LTF 2	41
3.5.2	Rule Base dan Inferensi LTF 2	43
3.5.3	Reduksi Tipe dan Defuzzifikasi	45
3.6	Pengujian Logika Fuzzy Type 1	49
3.6.1	Fuzzy Logic Type 1	49
3.6.2	Fuzzy Logic Type 2	54
3.7	Particle Swarm Optimization (PSO)	58
3.8	Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)	64
3.8.1	Linear Decreasing Inertia Weight (LDIW)	64
3.9	Dynamic Particle Swarm Optimization	66
3.9.1	Bobot Inersia Dinamis	66
3.9.2	Parameter Sosial Dinamis	67
3.8	Interaksi antara Fuzzy tipe 2 dengan PSO	69
3.9	Pengujian Sistem dan Validasi Data	69
3.10	Analisis dan Kesimpulan	69
BAB IV	HASIL DAN ANALISA	70
4.1	Pendahuluan	70
4.2	Hasil dan Analisis Perbandingan Simulasi Fuzzy 2 – PSO, Fuzzy 2 – DPSO dan Fuzzy 2 – MPSO (pengujian pertama)	71
4.2.1	Hasil percobaan dengan Logika Fuzzy Type 2 - PSO	72

4.2.2 Hasil percobaan dengan Logika Fuzzy Type 2 - DPSO	74
4.2.3 Hasil percobaan dengan Logika Fuzzy Type 2 - MPSO	76
4.3 Data Hasil percobaan Fuzzy 2 – PSO, Fuzzy 2 – DPSO, Fuzzy 2 – MPSO	78
4.3.1 Data Hasil percobaan tanpa Halangan	78
4.3.2 Data Hasil percobaan Satu Halangan	80
4.3.3 Data Hasil percobaan Dua Halangan	82
4.3.4 Data Hasil percobaan tiga Halangan	84
4.3.5 Data Hasil percobaan Empat Halangan	86
4.3.6 Data Hasil percobaan Halangan Lingkaran	88
4.3.7 Data Hasil percobaan Halangan Persegi	90
4.3.8 Data Hasil percobaan Halangan Oval	92
4.4 Hasil perbandingan data Fuzzy 2 – PSO, Fuzzy 2 – DPSO dan Fuzzy 2 – MPSO	94
4.5 Hasil dan Analisis Perbandingan Simulasi Fuzzy 2 – PSO, Fuzzy 2 – DPSO dan Fuzzy 2 – MPSO (pengujian kedua)	100
4.5.1 Hasil percobaan dengan Logika Fuzzy Type 2 - PSO	102
4.5.2 Hasil percobaan dengan Logika Fuzzy Type 2 - DPSO	103
4.5.3 Hasil percobaan dengan Logika Fuzzy Type 2 - MPSO	105
4.6 Data Hasil percobaan Fuzzy 2 – PSO, Fuzzy 2 – DPSO, Fuzzy 2 – MPSO	107
4.6.1 Data Hasil percobaan tanpa Halangan	107
4.6.2 Data Hasil percobaan Satu Halangan	109
4.6.3 Data Hasil percobaan Dua Halangan	111
4.6.4 Data Hasil percobaan tiga Halangan	113
4.6.5 Data Hasil percobaan Empat Halangan	115
4.6.6 Data Hasil percobaan Halangan Lingkaran	117
4.6.7 Data Hasil percobaan Halangan Persegi	119

4.6.8 Data Hasil percobaan Halangan Oval	121
4.7 Hasil perbandingan data Fuzzy 2 – PSO, Fuzzy 2 – DPSO dan Fuzzy 2 – MPSO	123
BAB V KESIMPULAN	131
5.1 Kesimpulan	131
5.2 Saran	131
DAFTAR PUSTAKA	132

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Model formasi dari tiga mobile robot nonholonomic	8
Gambar 2.2 Model formasi dari tiga mobile robot nonholonomic	8
Gambar 2.3 <i>Biological swarm</i> di alam	10
Gambar 2.4. Sistem Logika Fuzzy Tipe-1	17
Gambar 2.5. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Linier Naik	18
Gambar 2.6. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Linier Turun	18
Gambar 2.7. Grafik Representasi Fungsi Keanggotaan Kurva Segitiga	19
Gambar 2.8. Grafik Fungsi Keanggotaan Kurva Trapesium	19
Gambar 2.9. Sistem Logika Fuzzy Tipe-2	21
Gambar 2.10. Fungsi keanggotaan dari Logika Fuzzy Logika tipe 2	22
Gambar 3.1. Kerangka Kerja Penelitian	28
Gambar 3.2. Nonholonomik mobile robot	30
Gambar 3.3. Perpindahan Mobile robot	32
Gambar 3.4a Kecepatan roda kanan robot berdasarkan porosnya	33
Gambar 3.4b Kecepatan roda kiri robot berdasarkan porosnya	33
Gambar 3.5. Struktur kinematik dari peputaran roda pada bidang horizontal	34
Gambar 3.6. Model Formasi Multi Robot	38
Gambar 3.7. <i>Blok diagram persamaan kinematik</i>	39
Gambar 3.8. Letak 3 sensor ultrasonik pada robot swarm	39
Gambar 3.9. <i>Pseudocode</i> Sensor Ultrasonik	40
Gambar 3.10 Perancangan Algoritma IT2FLS	41
Gambar 3.11. <i>Consequent</i> pada fungsi keanggotaan Gaussian	43

Gambar 3.13 <i>Pseudocode</i> fuzzifikasi \bar{f}	43
Gambar 3.14 <i>Pseudocode</i> fuzzifikasi \underline{f}	43
Gambar 3.15 <i>Pseudocode</i> Rule Base dan Inferensi \bar{fmin}	44
Gambar 3.16 <i>Pseudocode</i> Rule Base dan Inferensi \underline{fmin}	45
Gambar 3.17 <i>Pseudocode</i> Karnik-Mendel ckanan	46
Gambar 3.18 <i>Pseudocode</i> Karnik-Mendel c_{kiri}	46
Gambar 3.19 <i>Pseudocode</i> keluaran kecepatan pada <i>ykanan</i>	47
Gambar 3.20 <i>Pseudocode</i> keluaran kecepatan pada <i>ykir</i>	48
Gambar 3.21 <i>Membership function LFT 1</i> Input 1 “Sensor 0”	51
Gambar 3.22. <i>Membership function LFT 1</i> Input 2 “Sensor 1”	51
Gambar 3.23. <i>Membership function LFT 1</i> Input 3 “Sensor 2”	51
Gambar 3.24. <i>Membership function LFT 1</i> Output 1 “Kecepatan”	52
Gambar 3.25. <i>Membership function LFT 1</i> Output 2 “Sudut”	52
Gambar 3.26. <i>Rule Base</i> Logika Fuzzy Type 1	53
Gambar 3.27. Hasil <i>rule base</i> 2 variabel linguistic	54
Gambar 3.28 <i>Membership function LFT 2</i> Input 1 “Sensor 0”	55
Gambar 3.29. <i>Membership function LFT 2</i> Input 2 “Sensor 1”	56
Gambar 3.30. <i>Membership function LFT 2</i> Input 3 “Sensor 2”	56
Gambar 3.31. <i>Membership function LFT 2</i> Output 1 “Kecepatan”	56
Gambar 3.32. <i>Membership function LFT 2</i> Output 2 “Sudut”	57
Gambar 3.33. <i>Rule Base</i> Logika Fuzzy Type 2	57
Gambar 3.34. Hasil <i>rule base</i> 2 variabel linguistic	58
Gambar 3.35. <i>Flowchart</i> Algoritma PSO	61
Gambar 3.36. <i>Pseudocode</i> PSO	62

Gambar 3.37. <i>Flowchart</i> Algoritma MPSO	65
Gambar 3.38. <i>Pseudocode</i> MPSO	66
Gambar 3.39. <i>Pseudocode</i> DPSO	67
Gambar 3.40. <i>Flowchart</i> Algoritma DPSO	68
Gambar 4.1. Flowchart Multi Robot	70
Gambar 4.2. Lingkungan Pengujian Pertama	72
Gambar 4.3. Lingkungan Pengujian dengan Logika Fuzzy Tipe 2 - PSO	73
Gambar 4.4. Lingkungan Pengujian dengan Logika Fuzzy Tipe 2 - DPSO	75
Gambar 4.5. Lingkungan Pengujian dengan Logika Fuzzy Tipe 2 - MPSO	77
Gambar 4.6. Grafik Hasil Perbandingan Data (Iterasi)	95
Gambar 4.7. Grafik Hasil Perbandingan Waktu (detik)	97
Gambar 4.8. Grafik Hasil Perbandingan <i>Resource</i> (kb)	99
Gambar 4.9. Lingkungan Pengujian	101
Gambar 4.10. Lingkungan Pengujian dengan Logika Fuzzy Tipe 2 - PSO	103
Gambar 4.11. Lingkungan Pengujian dengan Logika Fuzzy Tipe 2 - DPSO	104
Gambar 4.12. Lingkungan Pengujian dengan Logika Fuzzy Tipe 2 - MPSO	106
Gambar 4.13. Grafik Hasil Perbandingan Data (Iterasi)	125
Gambar 4.14. Grafik Hasil Perbandingan Waktu (detik)	127
Gambar 4.15. Grafik Hasil Perbandingan <i>Resource</i> (kb)	129

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Klasifikasi topik berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan	25
Tabel 3.1. Kombinasi masukan untuk tiap-tiap rules	44
Tabel 3.2. Linguistik Input 1 LFT 1 “ <i>Sensor 0</i> ”	49
Tabel 3.3. Linguistik Input 2 LFT 1 “ <i>Sensor 1</i> ”	49
Tabel 3.4 Linguistik Input 3 LFT 1 “ <i>Sensor 2</i> ”	49
Tabel 3.5 Linguistik Output 1 LFT 1 “ <i>Sudut</i> ”	50
Tabel 3.6. Linguistik Output 2 LFT 1 “ <i>Kecepatan</i> ”	50
Tabel 3.7. Parameter Fngsi keanggotaan	54
Tabel 3.8 Linguistik Output 1 LFT 2 “ <i>Sudut</i> ”	55
Tabel 3.9. Linguistik Output 2 LFT 2 “ <i>Kecepatan</i> ”	55
Tabel 4.1. Fuzzy type 2 – PSO Tanpa halangan (Pengujian Pertama)	78
Tabel 4.2. Fuzzy type 2 – DPSO Tanpa halangan (Pengujian Pertama)	79
Tabel 4.3. Fuzzy type 2 – MPSO Tanpa halangan (Pengujian Pertama)	79
Tabel 4.4. Fuzzy type 2 – PSO Satu halangan (Pengujian Pertama)	80
Tabel 4.5. Fuzzy type 2 – DPSO Satu halangan (Pengujian Pertama)	81
Tabel 4.6. Fuzzy type 2 – MPSO Satu halangan (Pengujian Pertama)	81
Tabel 4.7. Fuzzy type 2 – PSO Dua halangan (Pengujian Pertama)	82
Tabel 4.8. Fuzzy type 2 – DPSO Dua halangan (Pengujian Pertama)	83
Tabel 4.9. Fuzzy type 2 – MPSO Dua halangan (Pengujian Pertama)	83
Tabel 4.10. Fuzzy type 2 – PSO Tiga halangan (Pengujian Pertama)	84
Tabel 4.11. Fuzzy type 2 – DPSO Tiga halangan (Pengujian Pertama)	85
Tabel 4.12. Fuzzy type 2 – MPSO Tiga Halangan (Pengujian Pertama)	85

Tabel 4.13. Fuzzy type 2 – PSO Empat halangan (Pengujian Pertama)	86
Tabel 4.14. Fuzzy type 2 – DPSO Empat halangan (Pengujian Pertama)	87
Tabel 4.15. Fuzzy type 2 – MPSO Empat Halangan (Pengujian Pertama)	87
Tabel 4.16. Fuzzy type 2 – PSO Halangan Lingkaran (Pengujian Pertama)	88
Tabel 4.17. Fuzzy type 2 – DPSO Halangan Lingkaran (Pengujian Pertama)	88
Tabel 4.18. Fuzzy type 2 – MPSO Halangan Lingkaran (Pengujian Pertama)	89
Tabel 4.19. Fuzzy type 2 – PSO Halangan Persegi (Pengujian Pertama)	90
Tabel 4.20. Fuzzy type 2 –D PSO Halangan Persegi (Pengujian Pertama)	90
Tabel 4.21. Fuzzy type 2 – MPSO Halangan Persegi (Pengujian Pertama)	91
Tabel 4.22. Fuzzy type 2 – PSO Halangan Oval (Pengujian Pertama)	92
Tabel 4.23. Fuzzy type 2 – DPSO Halangan Oval (Pengujian Pertama)	92
Tabel 4.24. Fuzzy type 2 – MPSO Halangan Oval (Pengujian Pertama)	93
Tabel 4.25. Perbandingan Data Iterasi Masing-masing Pengujian	94
Tabel 4.26. Perbandingan Waktu Masing-masing Pengujian	96
Tabel 4.27. Perbandingan <i>Resource</i> Masing-masing Pengujian	98
Tabel 4.28. Fuzzy type 2 – PSO Tanpa halangan (Pengujian Pertama)	108
Tabel 4.29. Fuzzy type 2 – DPSO Tanpa halangan (Pengujian Pertama)	108
Tabel 4.30. Fuzzy type 2 – MPSO Tanpa halangan (Pengujian Pertama)	109
Tabel 4.31. Fuzzy type 2 – PSO Satu halangan (Pengujian Pertama)	110
Tabel 4.32. Fuzzy type 2 – DPSO Satu halangan (Pengujian Pertama)	110
Tabel 4.33. Fuzzy type 2 – MPSO Satu halangan (Pengujian Pertama)	111
Tabel 4.34. Fuzzy type 2 – PSO Dua halangan (Pengujian Pertama)	112
Tabel 4.35. Fuzzy type 2 – DPSO Dua halangan (Pengujian Pertama)	112
Tabel 4.36. Fuzzy type 2 – MPSO Dua halangan (Pengujian Pertama)	113
Tabel 4.37. Fuzzy type 2 – PSO Tiga halangan (Pengujian Pertama)	113

Tabel 4.38. Fuzzy type 2 – DPSO Tiga halangan (Pengujian Pertama)	114
Tabel 4.39. Fuzzy type 2 – MPSO Tiga Halangan (Pengujian Pertama)	115
Tabel 4.40. Fuzzy type 2 – PSO Empat halangan (Pengujian Pertama)	116
Tabel 4.41. Fuzzy type 2 – DPSO Empat halangan (Pengujian Pertama)	116
Tabel 4.42. Fuzzy type 2 – MPSO Empat Halangan (Pengujian Pertama)	117
Tabel 4.43. Fuzzy type 2 – PSO Halangan Lingkaran (Pengujian Pertama)	117
Tabel 4.44. Fuzzy type 2 – DPSO Halangan Lingkaran (Pengujian Pertama)	118
Tabel 4.45. Fuzzy type 2 – MPSO Halangan Lingkaran (Pengujian Pertama)	118
Tabel 4.46. Fuzzy type 2 – PSO Halangan Persegi (Pengujian Pertama)	119
Tabel 4.47. Fuzzy type 2 –D PSO Halangan Persegi (Pengujian Pertama)	120
Tabel 4.48. Fuzzy type 2 – MPSO Halangan Persegi (Pengujian Pertama)	120
Tabel 4.49. Fuzzy type 2 – PSO Halangan Oval (Pengujian Pertama)	121
Tabel 4.50. Fuzzy type 2 – DPSO Halangan Oval (Pengujian Pertama)	122
Tabel 4.51. Fuzzy type 2 – MPSO Halangan Oval (Pengujian Pertama)	122
Tabel 4.52. Perbandingan Data Iterasi Masing-masing Pengujian	124
Tabel 4.53. Perbandingan Waktu Masing-masing Pengujian	126
Tabel 4.54. Perbandingan <i>Resource</i> Masing-masing Pengujian	128

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi robot saat ini menjadi solusi alternatif di tengah keterbatasan manusia dalam mengerjakan aktivitas secara kontinyu dan tidak mampu bekerja selama 24 jam penuh (Asaro, 2012). Dalam pencapaian kinerja robot yang baik pada semua lingkungan yang tak terstruktur, maka robot memerlukan sistem untuk mengendalikan pergerakan robot (Benavidez, Jamshidi, & Chair, 2011).

Berbagai pendekatan untuk kendali dan strategi pada formasi multi robot dapat dirujuk pada literatur, seperti pendekatan optimasi iteratif untuk sistem multi-robot di lingkungan rintangan memperoleh parameter pola yang optimal, kemudian secara iteratif menetapkan tujuan dan merencanakan jalur bebas tabrakan untuk setiap robot untuk mencapai posisi tujuan (Fang, Wang, Qiyan and Li, 2020), kendali gerak menggunakan PID (Raditya, Alldino & Wahyu, 2018), Model formasi dari tiga mobile robot nonholonomic pada penelitian (Xiao, Hanzhen., Chen, C.L. Philip, 2017), pendekatan berbasis perilaku (Balch & Arkin, 1998) (Lawton, Beard, & Young, 2003) (Brunete, Hernando, Gambao, & Torres, 2012), pendekatan struktur virtual (Egerstedt & Hu, 2001) (Lewis & Tan, 1997), pendekatan *leader follower* (Mariottini, Morbidi, Prattichizzo, Pappas, & Daniilidis, 2007) (Wang & Wu, 2012).

Pendekatan berbasis perilaku menghasilkan kinerja yang baik dalam menghindari halangan, menuju target dan pengendalian formasi, namun pada pendekatan ini menghasilkan kompleksitas tinggi dengan ketidakstabilan pada lingkungan dinamis (He & LOU, 2013) (Rm, Singaperumal, & Nagarajan, 2012) (Zu, Yang, Chen, Zhang, & Tian, 2008). Lain hal pendekatan struktur virtual ditentukan berdasarkan model yang kaku, dan control terpusat, namun hasilnya menghasilkan stabilitas yang baik di lingkungan yang kompleks (Benzerrouk, Adouane, Lequievre, & Martinet, 2010).

Saat ini telah diusulkan penggunaan banyak robot dalam menyelesaikan masalah kompleks di area lingkungan yang luas untuk mempermudah pekerjaan, dan menyelesaikan tugas yang diberikan kepadanya (Mohan, and Ponnambalam, 2009; Sharkey, 2007; Brambilla et al., 2013). Sayangnya pencapaian kinerja yang baik dapat dengan mudah diselesaikan oleh robot individu, tetapi menjadi masalah pada sistem multi-robot (Benavidez et al., 2011). Hal tersebut dikarenakan sistem multi-robot memiliki jumlah robot yang banyak, harus saling berkomunikasi dan berkoordinasi dalam menyelesaikan tugasnya tepat waktu (Brambilla et al., 2013; Mohan and Ponnambalam, 2009). Padahal dalam sistem multi-robot, masing-masing robot juga harus berperilaku sebagai diri sendiri dan perilaku dalam kelompok (Sharkey, 2007). Untuk mengatasi kelemahan stabilitas waktu terbatas, teori stabilitas baru, yang disebut stabilitas waktu tetap, baru-baru ini dikembangkan di (xing, Peng, Wen & Rahmani, 2018).

Keunggulan sistem multi robot dibandingkan dengan sistem robot individu meliputi fleksibilitas dan ketahanan yang tinggi, sifat semacam itu menghasilkan daya adaptasi yang baik terhadap lingkungannya karena rintangan dapat diatur dimana saja dan perubahan lingkungan selalu ada (Gustavi & Hu, 2008) (Tanner & Piovesan, 2010) (Peng, Wen, Rahmani, & Yu, 2013). Namun, untuk mengendalikan formasi multi robot untuk mencari dan mengikuti target adalah masalah utama, karena harus menciptakan bentuk geometris yang dinamis menuju target (Peng, Wen, Rahmani, et al., 2013).

Pada saat ini teknik komputasi lunak pendekatan yang paling populer dan menjanjikan dalam menyelesaikan masalah sistem kontrol pergerakan robot adalah jaringan saraf tiruan (Gu and Hu, 2002; Park, et al, 2009), algoritma evolusi (Hoffmann 2001; Hagaras et al., 2004; Wagner and Hagaras, 2007), sistem logika *fuzzy* (Nurmaini, and Primanita, 2012; Castillo et al., 2016; Benigni et al., 2017), algoritma *bio-inspired* (Peng et al., 2013; Ni et al., 2016), serta dengan kombinasi beberapa metode kecerdasan buatan (Hagaras et al., 2004; Nurmaini and Tutuko, 2011; Juang et al., 2016; Rao et al., 2017). Sayangnya metode tersebut memiliki beberapa kelemahan yaitu: (i) perubahan lingkungan yang tidak menentu dapat menyebabkan kegagalan dalam proses pengendalian, diakibatkan oleh

ketidakpastian, ketidakakuratan dan ketidaktelitian (Hagras, 2004); (ii) kinerja sistem kontrol hanya optimal sebagian (Abdessemed, et al., 2004); (iii) system kontrol yang dipilih hanya cocok pada satu kondisi lingkungan, jika kondisi tersebut berubah maka sistem akan gagal (Abdessemed, et al., 2004).

Dalam pergerakannya memerlukan suatu sistem kendali agar dapat berpindah posisi sesuai dengan yang diinginkan. Untuk pemodelan kinematik mobile robot beroda bersifat nonlinear, sehingga metode logika Fuzzy umumnya digunakan untuk memfasilitasi desain kontroler.

Logika *fuzzy* telah banyak digunakan untuk menyelesaikan persoalan ketidakpastian, ketidakakuratan dan ketidaktelitian dalam sistem robotika berkelompok (Mendel, 2001; El-Desouky and Hagras, 2009). Namun sistem logika *fuzzy* type-1 (SLFT1) kurang menghasilkan respon yang baik pada kondisi lingkungan yang tidak terstruktur dan dinamik (Mendel, 2001; Nurmaini and Primanita, 2012). Pengembangan SLFT1 menjadi sistem logika *fuzzy* tipe-2 (SLFT2) meningkatkan kemampuan sistem kontrol pada robot *swarm* dalam hal pengontrolan formasi (Lei and Li, 2007; Hagras, 2012; Karimi, 2012). Hal itu dikarenakan adanya perbaikan kinerja pengendali dengan memasukkan interval ketidakpastian di dalam fungsi keanggotaan *fuzzy*, baik masukan maupun keluaran sistem logika *fuzzy*. Sayangnya komputasi menjadi meningkat dan robot *swarm* belum memiliki sistem pengontrol pencapaian target atau optimisasi rute.

Sistem kontrol pada multi robot harus memperhitungkan waktu yang singkat, proses yang cepat, algoritma yang sederhana, tetapi tetap mampu menjaga formasi dan dapat menghindari tabrakan pada saat yang bersamaan (Chen and Wang, 2005; Gazi et al., 2014; Mohan and Ponnambalam, 2009). Banyak metode yang telah digunakan untuk memenuhi parameter tersebut, antara lain metode *path planning*, *artificial potential function* and *potential field* (Barnes, 2007; Benbouabdallah and Qi, 2013; Kowdiki et al., 2012). Sayangnya metode ini sangat mengandalkan peta lingkungan yang dibangun, jika kondisi lingkungan berubah, maka robot akan gagal. Metode lainnya adalah penggunaan kecerdasan *swarm*, yang menunjukkan hasil yang memuaskan, karena menggunakan karakteristik hewan di alam dalam mencari makanan, antara lain *Particle Swarm Optimization*

(PSO) (Pimenta et al., 2013; Rigatos, 2008; Pugh and Martinoli, 2007). Sayangnya banyak penerapan metode PSO untuk optimisasi pencarian rute target, sering kali menghasilkan kinerja optimal sebagian, dan dapat menurunkan kinerja pengontrolan formasi. Sehingga perlunya suatu metode PSO yang dapat bereaksi secara dinamik dalam kondisi yang tidak menentu.

Dari berbagai latar belakang masalah yang telah dibahas, maka dalam penelitian ini yang di usulkan adalah bagaimana meningkatkan kinerja sistem kontrol formasi multi robot agar menghasilkan kinerja yang baik dalam hal pergerakan menghindari halangan dan optimisasi rute. Diharapkan dengan strategi dan mekanisme terbaru yang diusulkan tersebut dapat memberikan kontribusi bagi penelitian sistem kontrol robotika pada kasus pengontrolan formasi pada sistem multi robot.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana membuat pemodelan pada sistem multi robot ?
2. Bagaimana mengembangkan strategi kontrol untuk mengontrol formasi multi robot dengan kemampuan menghindari rintangan, mencapai target dan membentuk formasi dengan kinerja yang memuaskan?
3. Bagaimana menganalisa formasi gerak robot dalam hal bergerak dalam kelompok dan menghindari halangan ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dalam penelitian adalah :

1. Membuat pemodelan sistem multi-robot;
2. Perancangan pengendali gerakan robot dalam mencapai target menggunakan *Particle Swarm Optimization, Modified Particle Swarm Optimization, Dynamic Particle Swarm Optimization* dengan metode *Fuzzy logic type 2* ;
3. Menganalisa formasi gerak *multi robot* dalam hal bergerak dalam kelompok dan menghindari halangan.

1.4 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam tesis ini tidak meluas, maka diambil pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Robot yang dianalisa yaitu robot mobile berpengerak satu buah roda di masing-masing kanan dan kiri dua yang dikemudikan secara terpisah (DDMR).
2. Robot diasumsikan bergerak pada bidang horizontal dan berada dalam kawasan 2D pada koordinat XY.
3. Dianggap tidak ada hambatan pada lintasan dan robot mobil tidak pernah tergelincir / tidak mengalami *slip* dan bersifat nonholonomik.
4. Pada penelitian ini hanya sebatas simulasi program.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Penelitian bermanfaat untuk mengembangkan dan mengetahui pengendalian multi robot dengan menggunakan *Logika Fuzzy Tipe 2 – Particle Swarm Optimization*, *Logika Fuzzy Tipe 2 – Dynamic Particle Swarm Optimization* dan *Logika Fuzzy Tipe 2 – Modified Particle Swarm Optimization* dengan melihat kemampuan menghindari rintangan dalam waktu yang singkat, komputasi yang kecil dan kinerja pergerakan yang baik. Oleh karena itu penelitian akan sangat penting untuk dilakukan dalam memberikan kontribusi keilmuan dan kebaruan dari metode yang digunakan pada sistem kontrol robotika
2. Penelitian bermanfaat untuk menyelesaikan permasalahan yang sering terjadi dalam navigasi multi robot yang struktur kontrol formasi dari multi robot dalam menangani ketidakpastian lingkungan, ketidakakuratan sistem persepsi, dan ketidaktelitian sistem penggerak pada lingkungan dalam mengontrol pergerakan formasi dari titik awal ke titik sasaran dalam suatu lingkungan tidak diketahui.

1.6 Sistematika Pembahasan

Untuk lebih memudahkan dalam menyusun tugas akhir ini dan memperjelas isi dari setiap bab pada laporan ini, maka dibuatlah sistematika penulisan sebagai berikut:

1. BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang seluruh penjelasan mengenai tinjauan pustaka yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada penulisan tugas akhir ini.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi penjelasan tentang proses pemodelan kinematik DDMR sampai pembuatan perancangan kendali secara bertahap dan terperinci untuk membuat kerangka berfikir dan kerangka kerja dalam menyelesaikan tugas akhir.

4. BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menyajikan pemrograman simulasi system kendali yang telah dirancang, serta diberikan data hasil respon sistem, yang akan menggambarkan performansi sistem kendali yang telah dirancang.

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan tentang hasil yang telah diperoleh serta saran yang diambil setelah pengerjaan tugas akhir secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, T. Y., & Hamzah, M. I. (2013). Trajectory Tracking Control for Mobile Robot using Wavelet Network, *74*(3), 32–37.
- Asaro, P. (2012). On banning autonomous weapon systems: human rights, automation, and the dehumanization of lethal decision-making, *94*(886), 687–709. <http://doi.org/10.1017/S1816383112000768>
- Abdessemed, F., Benmahammed, K., and Monacelli, E. (2004). A fuzzy-based reactive controller for a non-holonomic mobile robot. *Robotics and autonomous Systems*, *47*(1), 31-46.
- Asaro, P. (2012). *On banning autonomous weapon systems: human rights, automation, and the dehumanization of lethal decision-making. International Review of the Red Cross*, *94*(886), 687–709. doi:10.1017/s1816383112000768
- Balch, T., & Arkin, R. C. (1998). Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, *14*(6), 926–939.
- Barnes, L., Fields, M., & Valavanis, K. (2007). Unmanned Ground Vehicle Swarm Formation Control Using Potential Fields. *Medierranean Conference Control and Automation*.
- Benbouabdallah, K., and Qi, Z. (2013). A Fuzzy Logic Behavior Architecture Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, *5*(14), 3835–3842.
- Benavidez, P., Jamshidi, M., & Chair, L. B. E. (2011). Mobile Robot Navigation and Target Tracking System, 299–304. Benbouabdallah, K., & Qi, Z. (2013). A Fuzzy Logic Behavior Architecture Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, *5*(14), 3835–3842.
- Begnini, M., Bertol, D. W., and Martins, N. A. (2017). A robust adaptive fuzzy variable structure tracking control for the wheeled mobile robot: Simulation and experimental results. *Control Engineering Practice*, *64*, 27-43.
- Benzerrouk, A., Adouane, L., Lequievre, L., & Martinet, P. (2010). Navigation of Multi-Robot Formation in Unstructured Environment Using Dynamical Virtual Structures, 5589–5594.

- Berg, J. Van Den, Ferguson, D., & Kuffner, J. (2006). Anytime Path Planning and Replanning in Dynamic Environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (May), 2366–2371.
- Brunete, A., Hernando, M., Gambao, E., & Torres, J. E. (2012). A behaviour-based control architecture for heterogeneous modular ., *Robotics and Autonomous Systems*, 60, 1607–1624. <http://doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.019>
- Calli, B., Caarls, W., Jonker, P., & Wisse, M. (2012). Comparison of Extremum Seeking Control Algorithms for Robotic Applications. *IEEE International Conference Robot System*, 3195 – 3202.
- Castillo, O, et al. (2016). A comparative study of type-1 fuzzy logic systems, interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems." *Information Sciences* 354: 257-274.
- Chandak, P. (2002). *Study and Implementation of ‘ Follow the Leader*.
- Chern, C., Paul, S., Jacques, J., & Slotine, E. (2009). Region-based shape control for a swarm of robots. *Automatica*, 45(10), 2406–2411. <http://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.06.026>
- Chen, Y.Q.C.Y.Q., and Wang, Z.W.Z. (2005). Formation control: a review and a new consideration. *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, no. 435, pp.3664–3669
- Consolini, L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., & Tosques, M. (2006). On the Control of a Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots. *Proceeding of The 45 Th IEEE Conference on Decision and Control*, 5992–5997.
- Consolini, L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., & Tosques, M. (2008). Leader – follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints. *Autonomous*, 44, 1343–1349.
- Coupland, S. (2003). *Type-2 Fuzzy Control of a Mobile Robot*.
- El-Desouky, and Hagrass, H. (2009). An Adaptive Type-2 Fuzzy based Agent for Multi Occupant Ambient Intelligent Environment. *In Proceeding of 5th International Conference on Intelligent Environment*.
- Fang W., Wang, T., Li, Q., & Xin, J. (2020). *An iterative optimization approach for multi-robot pattern formation in obstacle environment. Robotics and Autonomous Systems*, 133, 103645. doi:10.1016/j.robot.2020.103645
- Gazi, V., Marques, L., and Ordóñez, R. “Robot Swarms: Dynamics and Control,” pp. 1–32, 2014.

- Gu, D., and Hu, H., "Neural predictive control for a car-like mobile robot." *Robotics and Autonomous Systems* 39.2 (2002): 73-86.
- Hagras, H., Callaghan, V., and Colley, M. (2004). Learning and adaptation of an intelligent mobile robot navigator operating in unstructured environment based on a novel online Fuzzy–Genetic system. *Fuzzy Sets and Systems*, 141(1), 107-160.
- He, L.-L., and LOU, X.-C. (2013). Study on the Formation Control Methods for Multi-Agent Based on Geometric, (1), 699–701.
- Hoffmann, F. (2001). Evolutionary algorithms for fuzzy control system design. *Proceedings of the IEEE*, 89(9), 1318-1333.
- Issa, B. A., & Rashid, A. T. (2020). *Multi-Robot Control for a Static Polygon Formation using Neighbor- Leader Algorithm. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. doi:10.1016/j.jksuci.2020.08.001
- Juang, C-F, Jeng, T-L and Chang, Y-C. (2016). An Interpretable Fuzzy System Learned Through Online Rule Generation and Multi-objective ACO With a Mobile Robot Control Application." *IEEE transactions on cybernetics* 46.12: 2706-2718
- Kowdiki, K. H., Barai, R. K., and Bhattacharya, S. (2012). Leader-Follower Formation Control Using Artificial Potential Functions: A Kinematic Approach. *IEEE International Conference On Advances in Engineering, Science and Management*, 500 –505
- Lei, B., and Li, W. (2007). A Fuzzy Behaviours Fusion Algorithm for Mobile Robot Real-time Path Planning in Unknown Environment. *IEEE International Conference On Integration Technology*, 173–178.
- Mariottini, G. L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., Pappas, G. J., and Daniilidis, K. (2007). Leader-Follower Formations: Uncalibrated Vision-Based Localization and Control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (April), 10–14.
- Mohan, Y., and Ponnambalam, S. G. (2009). An Extensive Review of Research in Swarm Robotics. *IEEE*, 140–145.
- Nurmaini, S., and Primanita, A. (2012). Modeling of Mobile Robot System with Control Strategy Based on Type-2 Fuzzy Logic. *International Journal of Information and Communication Tehnology Research*, 2(3), 235–242.

- Tan, K., and Lewis, M. A. (1996). Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control *. *Proc IROS 96*, 132–139.
- Peng, Z., Wen, G., and Rahmani, A. (2013). Leader-Follower Formation Control of Multiple nonholonomic Robots Based on Backstepping, 211–216.
- Peng, Z., Wen, G., Rahmani, A., and Yu, Y. (2013). Leader – follower formation control of nonholonomic mobile robots based on a bioinspired neurodynamic based approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(9), 988–996.
- Pimenta, L. C. A., Pereira, G. A. S., Michael, N., Mesquita, R. C., Bosque, M. M., Chaimowicz, L., and Kumar, V. (2013). Swarm Coordination Based on Smoothed Particle Hydrodynamics Technique, 29(2), 383–399.
- Pugh, J., and Martinoli, A. (2007). Inspiring and modelling multi-robot search with particle swarm optimization. In *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE* (pp. 332-339). IEEE.
- Raditya I P., B Alldino AS., T Wahyu W.(2018). Implementasi Algoritma PSO Pada Multi Mobile Robot Dalam Penentuan Posisi Target Terdekat. *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems (IJEIS) Vol.8, No.1, April 2018, pp. 13~24 ISSN (print): 2088-3714, ISSN (online): 2460-7681*
- Rao, A. M., Ramji, K., Rao, B. S. S., Vasu, V., and Puneeth, C. (2017). Navigation of non-holonomic mobile robot using neuro-fuzzy logic with integrated safe boundary algorithm. *International Journal of Automation and Computing*, 14(3), 285-294.
- Rm, K. C., Singaperumal, M., and Nagarajan, T. (2012). Behavior Based Multi Robot Formations with Active Obstacle Avoidance based on Switching Control Strategy, 440, 6630–6635.
- Wang, J.-L., and Wu, H.-N. (2012). Leader-following formation control of multiagent systems under fixed and switching topologies. *International Journal of Control*, (March 2015), 37–41.
- Xing Chu, Zhaoxia Peng, Guoguang Wen and Ahmad Rahmani (2018). Distributed fixed-time formation tracking of multi-robot systems with nonholonomic constraints, *Neurocomputing Volume 313, 167-174*
- Zu, L., Yang, P., Chen, L., Zhang, X., and Tian, Y. (2008). Obstacle Avoidance of Multi Mobile Robots Based on Behavior Decomposition Reinforcement Learning, 1018–1023.