



Optimasi Performansi Pengendalian Robot *Swarm* menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2-Particle Swarm Optimazation

Gita Fadila Fitriana

¹Prodi Rekayasa Perangkat Lunak, Fakultas Informatika, Institut Teknologi Telkom Purwokerto
gita@ittelkom-pwt.ac.id

Abstract

Robot control is currently very helpful for human work to be more effective and efficient both in completion time and in mitigating the risk of work accidents that may occur. This study determines the direction of the robot so that it does not collide with each other and reach the target. Controlling the swarm robot with the leader-follower approach uses Fuzzy Logic Type 2-Particle Swarm Optimization (PSO) to optimise the performance of the swarm robot. The Fuzzy Logic Method Type 2 measures the direction decisions of the leader robot and follower robot using a rule base of 8 rules; the leader-follower robot is given a target. Achieving targets using PSO, the PSO process looks for potential solutions with quality references to reach the target as the optimal solution. The leader-follower modelling has been modelled using kinematic equations and controlling the movement of the robot's trajectory in the form of a simulation that has been carried out. The measurement results based on robot data in an open environment are 110 data, and a square environment is 1342. The measurement results based on robot time in a four-obstacle environment have the fastest time of 10.83 seconds and the longest time environment in an oval environment of 134.9 seconds. The measurement results are based on resources in a free environment of 10.6 kb and a square environment of 49.1 kb. Fuzzy Logic Type 2-PSO has a higher time indicating a stable speed result and judging from the trajectory in avoiding obstacles, and the leader-follower robot has a faster response.

Keywords: swarm robot, leader-follower approach, Type 2 Fuzzy Logic, Particle Swarm Optimization

Abstrak

Kendali robot saat ini sangat membantu pekerjaan manusia agar lebih efektif dan efisien baik dalam waktu penyelesaian maupun dalam mitigasi resiko kecelakaan kerja yang mungkin terjadi. Penelitian ini menentukan arah robot agar tidak saling bertabrakan dan mencapai target. Pengendalian robot *swarm* dengan pendekatan *leader follower* menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2-Particle Swarm Optimization (PSO) sebagai optimasi pengendalian performansi robot *swarm*. Metode Logika Fuzzy Tipe 2 mengukur keputusan arah robot *leader* dan robot *follower* dengan menggunakan *rule base* sebanyak 8 aturan, robot *leader follower* diberikan target. Pencapaian target menggunakan PSO, proses PSO mencari calon solusi dengan acuan kualitas untuk menuju target sebagai solusi optimal. Pemodelan *leader follower* telah dimodelkan dengan menggunakan persamaan kinematik dan pengendalian pergerakan trajektori robot dalam bentuk simulasi yang telah dilakukan. Hasil pengukuran berdasarkan data robot pada lingkungan tanpa halangan sejumlah 110 data dan lingkungan persegi sejumlah 1342. Hasil pengukuran berdasarkan waktu robot pada lingkungan empat halangan memiliki waktu tercepat sebesar 10,83 detik dan lingkungan waktu terlama pada lingkungan oval sebesar 134,9 detik. Hasil pengukuran berdasarkan *resource* pada lingkungan tanpa halangan sebesar 10,6 kb dan lingkungan persegi sebesar 49,1 kb. Logika Fuzzy Tipe 2-PSO memiliki waktu lebih tinggi menandakan hasil kecepatan yang stabil serta dilihat dari trajektori dalam menghindari halangan, robot *leader follower* memiliki respon yang lebih cepat.

Kata kunci: robot *swarm*, pendekatan *leader follower*, Logika Fuzzy Tipe 2, Particle Swarm Optimization

1. Pendahuluan

Robot adalah sebuah alat mekanik yang dapat melakukan tugas fisik, baik menggunakan pengawasan dan kendali manusia [1]. Penggunaan sistem robot saat ini sudah digunakan sebagai sistem yang mempunyai

otomatisasi yang sangat tinggi dan dapat membantu pekerjaan/kegiatan manusia agar lebih efektif dan efisien baik dalam waktu penyelesaian maupun dalam mitigasi risiko kecelakaan kerja [2]. Terdapat 3 (tiga) tipe robot, yaitu *single* robot, *multiple* robot dan *swarm* robot. Sistem beberapa robot (*swarm* robot) dapat

berpotensi memberikan keunggulan dibandingkan sistem single robot yaitu kecepatan, ketepatan dan toleransi kesalahan [3].

Beberapa pendekatan untuk pengendalian pergerakan pada robot yaitu *behaviour based*, *virtual structure*, *leader follower*. Pendekatan *leader follower* merupakan metode yang diterapkan pada sistem multi robot yang mana terdapat robot yang menjadi pemimpin (*leader*) yang berfungsi untuk memandu semua pergerakan robot, dan robot pengikut (*follower*) bertugas sebagai pengontrol posisi agar tetap bertahan dan berada dalam suatu formasi yang benar [4]. Hal terpenting dalam pendekatan *leader follower* yaitu robot *follower* bergerak mengikuti robot *leader* untuk mencapai keteraturan. Integrasi antara komunikasi, pengukuran dan pengontrolan pergerakan robot dalam waktu relatif singkat merupakan tantangan pada penelitian ini.

Penelitian ini menggunakan robot *swarm* dengan pendekatan *leader follower*. Dalam pergerakan robot *swarm* ini memerlukan sistem kendali agar dapat berpindah posisi sesuai dengan yang diinginkan. Untuk pemodelan mobile robot kinematik beroda bersifat nonlinier, sehingga metode logika fuzzy umumnya digunakan untuk memfasilitasi desain kontrol [5].

Teknik logika fuzzy dalam kontrol pergerakan mobile robot berguna dalam mengurai error pergerakan dengan menghasilkan algoritma dan pengambilan keputusan yang lebih sederhana yang mana dapat mengubah nilai linguistik menjadi kontrol otomatis, sehingga penggunaan logika fuzzy sebagai pengendali modern sangat berguna karena dapat dengan baik berkerja untuk sistem-sistem yang tidak dilinierisasi [6].

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) memiliki prinsip pada tiap individu yang disebut partikel akan bergerak dengan kumpulannya yang disebut *swarm* menuju partikel dengan kinerja terbaik saat masing-masing partikel mencari posisi maksimalnya. Selama iterasi setiap partikel dalam *swarm* selalu memperbarui kecepatan partikel dan posisinya [7].

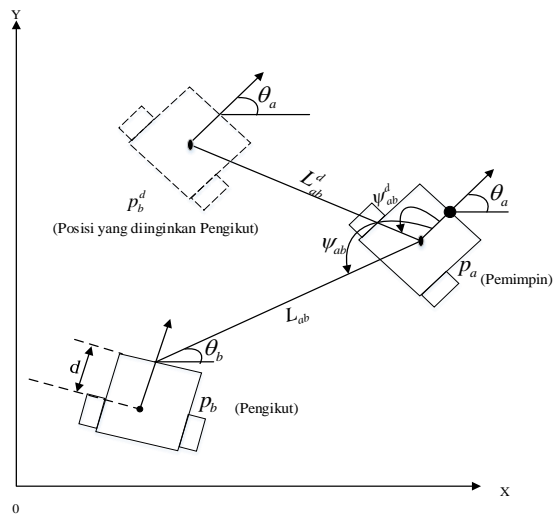
Penelitian menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk klasifikasi penyakit gula darah hasil yang dicapai sebesar 95%, sehingga algoritma PSO meningkatkan nilai akurasi [8]. Penggunaan metode Fuzzy digunakan pada penelitian pemantauan volume tangki air, metode Fuzzy ini mendeteksi sensor ultrasonic yang mengetahui posisi air dalam water tank sudah penuh [9].

Berdasarkan beberapa hal diatas, maka penelitian ini akan melakukan peningkatan performansi robot *swarm* menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2-Particle *Swarm Optimization*.

2. Metode Penelitian

2.1. Mobile Robot

Mobile Robot adalah jenis robot yang dapat bergerak berpindah posisi tanpa bantuan dari operator manusia (eksternal). Berbeda dengan mayoritas industri robot yang dapat bergerak hanya diruang tertentu, mobile robot memiliki fitur khusus sehingga dapat bergerak dengan bebas dalam ruang kerja yang telah ditetapkan untuk mencapai tujuan yang diinginkan [10]. *Mobile robot* yang berkelompok (*swarm*) dengan pendekatan *leader follower*, stabilitas gerak robot *leader follower* pembentukan strategi kontrol [11].



Gambar 1. Skema Formasi *leader follower*

Bentuk persamaan kinematik robot *leader follower* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\dot{p}_a = \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -d \cos \theta_a \\ \sin \theta_a & -d \sin \theta_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ \omega_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dimana v_a sebagai kecepatan linier dan ω_a sebagai kecepatan sudut pada robot. Kinematik robot pemimpin (*leader*) dan pengikut (*follower*) pada formasi dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\dot{L}_{ab} = -v_a \cos \psi_{ab} + v_b \cos \gamma_{ab} + d\omega_b \sin \gamma_{ab} \quad (2)$$

$$\dot{\psi}_{ab} =$$

$$\frac{1}{L_{ab}} [v_a \sin \psi_{ab} - v_b \sin \gamma_{ab} + d\omega_b \cos \gamma_{ab}] - \omega_a \quad (3)$$

Dengan menggunakan *leader follower* menggunakan metode Logika Fuzzy Tipe 2-Particle *Swarm Optimization* untuk pencarian target. Partikel dapat mewakili robot kecil menjelajahi beberapa ruang pencarian dan mencoba untuk menemukan target berdasarkan pembacaan robot sensor, jumlah iterasi dan kecepatan waktu untuk menuju lokasi yang diinginkan. Penggunaan metode PSO ini didasarkan pada penggunaan algoritma dan operasi matematika yang

sederhana dan penggunaan memori yang sedikit serta kecepatan pemrosesan dan paradigma [12].

2.2. Logika Fuzzy Tipe 2 – Particle Swarm Optimization

Logika Fuzzy Tipe 2 merupakan sebuah logika yang memiliki *value* yang bernilai keabuan yaitu salah dan benar [1]. Logika Fuzzy mengolah data input dengan nilai perkiraan yang terletak diantar 0 dan 1 [13]. Sistem Logika Fuzzy Tipe 2 terdiri dari empat proses yakni fuzzifikasi, inferensi, reduksi dan defuzzifikasi [14]. Pada tahapan fuzzifikasi mengubah masukan himpunan *crisp* ke himpunan *fuzzy*, bertujuan untuk tingkatan linguistiknya yang dikelompokkan dalam suatu variable *fuzzy* [15]. Logika Fuzzy Tipe 2 digunakan untuk menentukan keputusan pergerakan robot dalam mengatur jarak antara robot *leader* dan robot *follower* [16]. Tahapan yang hampir sama dengan Logika Fuzzy Tipe 1, perbedaan adalah setelah mendapatkan hasil dari keluaran inferensi, dilanjutkan dengan mereduksi untuk mengubah himpunan Logika Fuzzy Tipe 1 menjadi Logika Fuzzy Tipe 1, sehingga Logika Fuzzy Tipe 1 dilakukan defuzzifikasi menjadi nilai tegas pada keluaran.

Hasil keluaran Logika Fuzzy Tipe 2 menjadi sistem kendali robot swarm, kemudian untuk pencapaian target menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO adalah algoritma yang menggunakan populasi [17]. PSO merupakan sebuah algoritma yang mampu meniru kemampuan hewan yang hidup secara berkelompok, setiap individu pada PSO dianggap sebagai partikel [18]. Algoritma PSO digunakan untuk teknik optimasi dengan perhitungan calon solusi dengan acuan kualitas untuk menuju target [19]. Konsep PSO merupakan metode optimasi untuk mencari solusi optimal dari suatu masalah dengan menginisialisasi populasi partikel secara random. Metode PSO ini akan melakukan iterasi sampai mencapai kondisi optimal. Metode optimasi yang digunakan pada sistem optimasi pergerakan robot *leader follower* dengan konsep *gbest* (*globally oriented*) yaitu orientasi secara global. Setiap robot memiliki pergerakan yang mempunyai koordinat pada jalur masing-masing, koordinat tersebut akan dikirimkan melalui data serial sehingga dapat ditentukan oleh robot *leader*. Ketika robot *leader* telah ditentukan maka robot *follower* lainnya akan mengikuti *leader*.

Ketika robot tidak mendeteksi halangan (*obstacle*) dan robot mendeteksi adanya target, maka metode PSO akan dimulai diproses. PSO menggunakan perhitungan yang menggunakan jarak setiap posisi robot [20]. Berikut *pseudo code* Algoritma PSO.

Algoritma PSO

Input: *pbest*, *gbest*

Output:

```

Initialization i, xi
for → i
if  $f(x_i) > f(pbest)$  then
   $pbest \leftarrow x_i$ 

```

```

end if
if  $f(x_i) > f(gbest)$  then
   $gbest \leftarrow x_i$ 
end if
end for
 $w \leftarrow \text{rand} \{0-1\}$ 
for → i
   $v_i^{k+1} \leftarrow v_i^k + c_1 * \text{rand} * (p_i^k - x_i^k) + c_2 * \text{rand} * (p_g^k - x_i^k)$ 
end for

```

3. Hasil dan Pembahasan

Pada hasil penelitian ini, robot *leader follower* dilakukan pemodelan matematika yang kemudian persamaan tersebut digunakan untuk pengendalian robot *swarm* untuk mencapai suatu target dan tidak terjadi tabrakan antar robot *leader* dan robot *follower*.

3.1. Pemodelan Robot Swarm Leader Follower

Hubungan geometris antar robot didapatkan dari posisi robot *follower* p_b^d yang diharapkan kemudian diimplementasikan dalam bentuk persamaan berikut:

$$p_b^d = [x_b^d, y_b^d, \theta_b^d]^T$$

$$= \begin{bmatrix} x_a - d \cos \theta_a + L_{ab}^d \cos(\psi_{ab}^d + \theta_a) \\ y_a - d \sin \theta_a + L_{ab}^d \sin(\psi_{ab}^d + \theta_a) \\ \theta_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

Posisi aktual p_b pada robot *follower* R_b dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$p_b = [x_b, y_b, \theta_b]^T$$

$$= \begin{bmatrix} x_b - d \cos \theta_b + L_{ab}^d \cos(\psi_{ab}^d + \theta_b) \\ y_b - d \sin \theta_b + L_{ab}^d \sin(\psi_{ab}^d + \theta_b) \\ \theta_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

Jarak aktual antar robot L_{ab} di sumbu x dan y pada koordinat cartesian berikut:

$$L_{ab} = \sqrt{L_{abx}^2 + L_{aby}^2} \quad (6)$$

Dimana L_{abx} dan L_{aby} dinotasikan sebagai jarak relatif aktual antara *leader* dan *follower* terhadap koordinat cartesian sumbu x dan y masing-masing sebagai berikut:

$$L_{abx}$$

$$= x_a - x_b - d \cos \theta_a = -L_{ab} \cos(\psi_{ab} + \theta_a) \quad (7)$$

$$L_{aby}$$

$$= y_a - y_b - d \sin \theta_a = -L_{ab} \sin(\psi_{ab} + \theta_a) \quad (8)$$

Hasil turunan pertama dari Persamaan (7) dan Persamaan (8) disubsitusikan pada Persamaan (1) menjadi

$$\dot{L}_{abx} = \dot{x}_a - \dot{x}_b - d\dot{\theta}_a \sin \theta_a$$

$$= v_a \cos \theta_a - v_b \cos \theta_b + d\omega_b \sin \theta_b \quad (9)$$

$$\dot{L}_{aby} = \dot{y}_a - \dot{y}_b - d\dot{\theta}_a \sin \theta_a$$

$$= v_a \sin \theta_a - v_b \sin \theta_b - d\omega_b \cos \theta_b \quad (10)$$

Dimana v_a dan ω_a merupakan kecepatan linier dan kecepatan sudut robot *leader* R_a , v_b dan ω_b merupakan kecepatan linier dan kecepatan sudut robot *follower* R_b . Hasil turunan dari Persamaan (6) disubstitusikan ke Persamaan (1) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{L}_{ab} &= \frac{1}{\sqrt{L_{abx}^2 + L_{aby}^2}} (L_{abx} \cdot \dot{L}_{abx} + L_{aby} \cdot \dot{L}_{aby}) \\ &= \frac{1}{L_{ab}} [v_a (L_{abx} \cos \theta_a + L_{aby} \sin \theta_a)] \\ &\quad - \frac{1}{L_{ab}} [v_b (L_{abx} \cos \theta_b + L_{aby} \sin \theta_b)] \\ &\quad + \frac{1}{L_{ab}} [-d\omega_b (-L_{abx} \sin \theta_b + L_{aby} \cos \theta_b)] \\ &= -v_a \cos \psi_{ab} + v_b \cos \gamma_{ab} + d\omega_b \sin \gamma_{ab} \quad (11) \end{aligned}$$

Dimana $\gamma_{ab} = \psi_{ab} + \theta_a - \theta_b$ sehingga menjadi persamaan berikut:

$$\begin{aligned} L_{abx} \cos \theta_a + L_{aby} \sin \theta_a &= -L_{ab} \cos \psi_{ab}, \\ -L_{abx} \sin \theta_a + L_{aby} \cos \theta_a &= -L_{ab} \sin \psi_{ab}, \\ L_{abx} \cos \theta_b + L_{aby} \sin \theta_b &= -L_{ab} \cos \gamma_{ab}, \\ -L_{abx} \sin \theta_b + L_{aby} \cos \theta_b &= -L_{ab} \sin \gamma_{ab}. \end{aligned}$$

Dari Gambar (3.11), $\psi_{ab} = \arctan\left(\frac{L_{aby}}{L_{abx}}\right) - \theta_a + \pi$. Sehingga turunan pada persamaan sudut pergerakan roda sebagai berikut:

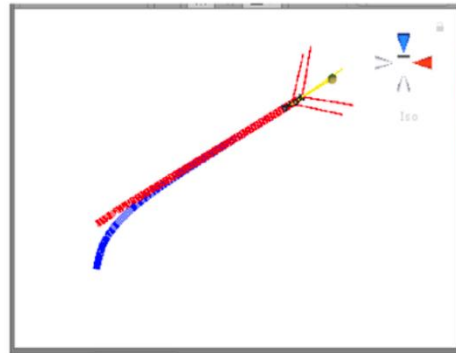
$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{ab} &= \left[\arctan\left(\frac{L_{aby}}{L_{abx}}\right) - \theta_a + \pi \right]' \\ &= \frac{1}{L_{ab}} [v_a \sin \psi_{ab} - v_b \sin \gamma_{ab} + \\ &\quad d\omega_b \cos \gamma_{ab}] - \omega_a \quad (12) \end{aligned}$$

Dari persamaan tersebut didapatkan model kinematik pada *leader follower* dapat dilihat pada Persamaan (2) dan Persamaan (3).

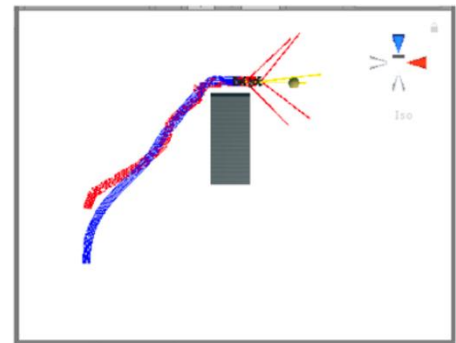
3.2. Pengujian Pengendalian Robot *Swarm Leader Follower*

Percobaan robot *leader follower* dilakukan pada delapan jenis halangan lingkungan, dari hasil percobaan berupa trajektori, kecepatan, perubahan sudut dan performansi. Hasil trajektori dari pengujian pertama robot *leader follower* diletakkan pada lingkungan tanpa halangan sampai empat halangan, lingkungan berbentuk

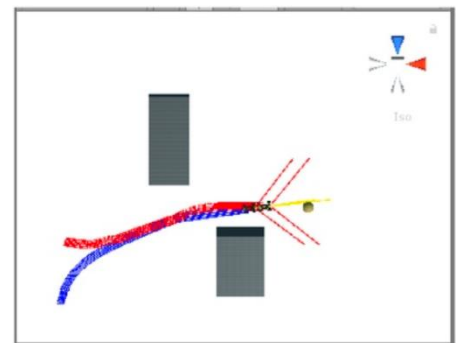
(9) lingkaran, lingkungan berbentuk persegi panjang dan lingkungan berbentuk oval yang ditunjukkan pada Gambar 2.



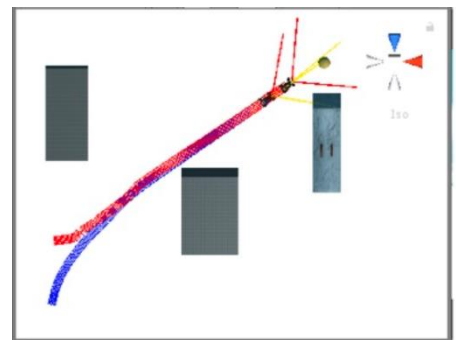
(a)



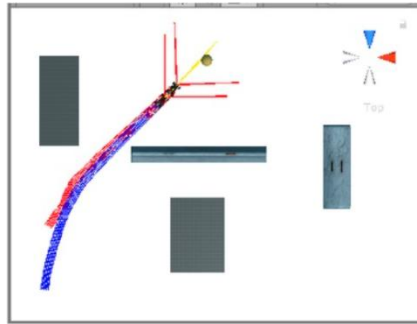
(b)



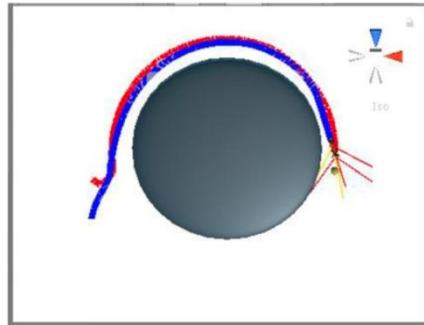
(c)



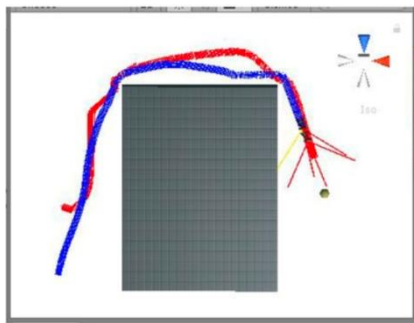
(d)



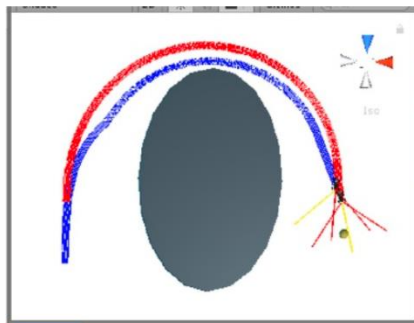
(e)



(f)



(g)



(h)

Gambar 2. Lingkungan Pengujian Logika Fuzzy Tipe 2-PSO : (a) tanpa halangan, (b) satu halangan, (c) dua halangan, (d) tiga halangan, (e) empat halangan, (f) lingkungan lingkaran, (g) lingkungan persegi dan (h) lingkungan oval

Pengendalian robot *leader follower* menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2 dengan 8 (delapan) rule base dengan 2 variabel linguistik pada Tabel 1.

Tabel 1. Rule Base 2 Variabel Linguistik

Sensor0	Sensor1	Sensor2	Kecepatan	Perubahan Sudut
Dekat	Dekat	Dekat	Lambat	Lurus
Dekat	Dekat	Jauh	Lambat	Kanan
Dekat	Jauh	Dekat	Lambat	Lurus
Dekat	Jauh	Jauh	Sedang	Kanan
Jauh	Dekat	Dekat	Lambat	Kiri
Jauh	Dekat	Jauh	Sedang	Kiri
Jauh	Jauh	Dekat	Sedang	Kiri
Jauh	Jauh	Jauh	Cepat	Lurus

Berdasarkan Gambar 2, menunjukkan bahwa robot tersebut dapat menghindari halangan, terlihat dari robot yang dapat menjaga jarak terjauh dari halangan. Robot *leader* dapat menjaga jarak dari halangan dan robot *follower* dapat menjaga jarak dari *leader*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2 (a) sampai 2 (f) terdapat penumpukan garis biru yang merupakan trajektori robot *follower* dan garis merah merupakan trajektori robot *leader*. Dari Gambar 2 dapat disimpulkan bahwa robot *follower* selalu mengikuti robot *leader* dengan posisi dibelakang robot *leader*, dan antara robot leader dan follower dapat menjaga jaraknya. Hal ini dikarenakan kecepatan yang dikendalikan oleh Logika Fuzzy Tipe 2 mempengaruhi perubahan kecepatan dengan selisih yang tidak drastis berubah jauh sehingga gerak antar robot *leader* dan *follower* dapat dikendalikan dengan sangat baik dalam menghindari tabrakan.

Pada Gambar 2 (a), (b), dan (c) robot *leader follower* menjauhi halangan sehingga memiliki respon yang tinggi terhadap halangan pada lingkungan tersebut. Berdasarkan trajektori tersebut, maka sistem kendali menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2 dapat diimplementasikan dengan respon yang baik dalam menghindari halangan, serta dapat menjaga jarak posisi antar robot *leader* dan *follower* sehingga tidak terjadi tabrakan.

3.3. Data Hasil Percobaan Logika Fuzzy Tipe 1 – PSO dengan Logika Fuzzy Tipe 2 – PSO

Hasil dari perbandingan kriteria berdasarkan data, waktu dan resource dari percobaan tanpa halangan sampai halangan berbentuk oval dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2 berikut adalah hasil perbandingan data iterasi atau pengulangan antara Logika Fuzzy Tipe 1-PSO dengan Logika Fuzzy Tipe 2-PSO pada masing-masing lingkungan pengujian.

Tabel 2. Perbandingan Data masing-masing Pengujian

Halangan (Obstacle)	Data Iterasi			
	Fuzzy Tipe 1-PSO		Fuzzy Tipe 2-PSO	
	Leader	Follower	Leader	Follower
Tanpa Halangan	336	336	110	110
Satu Halangan	279	379	164	164

Dua Halangan	318	318	258	258
Tiga Halangan	259	259	222	222
Empat Halangan	319	319	270	270
Lingkaran	596	596	562	562
Persegi	1680	1680	1342	1342
	(Gagal)	(Gagal)		
Oval	2435	2435	1108	1108
	(Gagal)	(Gagal)		

Tabel 3 berikut adalah hasil perbandingan waktu antara Logika Fuzzy Tipe 1-PSO dengan Logika Fuzzy Tipe 2-PSO pada masing-masing lingkungan pengujian.

Tabel 3. Perbandingan Waktu masing-masing Pengujian

Halangan (Obstacle)	Waktu (detik)			
	Fuzzy Tipe 1-PSO		Fuzzy Tipe 2-PSO	
	Leader	Follower	Leader	Follower
Tanpa Halangan	14,84	14,85	16,17	16,18
Satu Halangan	16,97	16,97	14,42	14,43
Dua Halangan	14,70	14,71	14,58	14,59
Tiga Halangan	16,86	16,89	12,69	12,72
Empat Halangan	15,15	15,15	10,83	10,83
Lingkaran	39,37	39,38	25,34	25,37
Persegi	213,03	213,05	34,42	34,43
Oval	83,52	83,53	134,9	134,92

Tabel 4 berikut adalah hasil perbandingan *resource* antara Logika Fuzzy Tipe 1-PSO dengan Logika Fuzzy Tipe 2-PSO pada masing-masing lingkungan pengujian.

Tabel 4. Perbandingan Resource masing-masing Pengujian

Halangan (Obstacle)	Resource (kb)			
	Fuzzy Tipe 1-PSO		Fuzzy Tipe 2-PSO	
	Leader	Follower	Leader	Follower
Tanpa Halangan	15,4	15,6	10,6	10,7
Satu Halangan	19,4	20,2	12,8	12,5
Dua Halangan	16,1	18,9	14,5	16,9
Tiga Halangan	15,1	15,9	15	15,4
Empat Halangan	16,3	17,3	15,8	16
Lingkaran	24,3	27,3	23,5	24
Persegi	50,4	46,2	49,1	40,3
Oval	49,7	68,1	38,7	41,2

Tabel 2 menunjukkan data iterasi dari masing-masing pengujian pada robot *leader* dan robot *follower*. Pada pengujian Logika Fuzzy Tipe 1-PSO, robot *leader follower* data iterasi lebih besar dibandingkan dengan pengujian Logika Fuzzy Tipe 2-PSO. Hal ini mengartikan bahwa robot bergerak dengan Logika Fuzzy Tipe 1-PSO membutuhkan data *resource* yang besar pada masing-masing lingkungan pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Pada Tabel 3, menunjukkan bahwa pengujian Logika Fuzzy Tipe 1-PSO membutuhkan lebih banyak waktu dalam mencapai target dibandingkan dengan Logika Fuzzy Tipe 2-PSO pada masing-masing pengujian. Pengujian halangan persegi dan oval, robot *leader follower* yang menggunakan Logika Fuzzy Tipe 1-PSO gagal dalam mencapai target. Karena kondisi

lingkungan pengujian tersebut merupakan halangan yang memiliki sudut siku-siku, sehingga Logika Fuzzy Tipe 1-PSO terjebak dalam lokal optima dan tidak dapat melanjutkan pencarian target.

Berdasarkan perbandingan performansi dari kedua metode Logika Fuzzy Tipe 1-PSO dan Logika Fuzzy Tipe 2-PSO tersebut dalam lingkungan yang lebih kompleks, dapat dilihat bahwa Logika Fuzzy Tipe 2-PSO untuk robot *leader* dan *follower* dalam menghindari halangan dan mencapai target dan memiliki performansi yang lebih baik berdasarkan hasil data iterasi, waktu dan *resource*.

4. Kesimpulan

Penelitian robot *swarm* dengan pendekatan *leader follower* menggunakan Logika Fuzzy Tipe 2-PSO menggunakan 8 *rule base* aturan yang berjalan sesuaru target dengan menggunakan PSO. Pemodelan *leader follower* telah dimodelkan dengan menggunakan persamaan kinematik dan pengendalian pergerakan trajektori robot dalam bentuk simulasi yang telah dilakukan. Logika Fuzzy Tipe 2-PSO memiliki waktu lebih tinggi menandakan hasil kecepatan yang stabil serta dilihat dari trajektori dalam menghindari halangan, robot *leader follower* memiliki respon yang lebih cepat.

Daftar Rujukan

- [1] L. Hakim and V. Yonatan, "Deteksi Kebocoran Gas LPG menggunakan Detektor Arduino dengan algoritma Fuzzy Logic Mandani," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 1, no. 2, p. 114, 2017, doi: 10.29207/resti.v1i2.35.
- [2] I. Ikhsan and A. A. Putra, "Autonomous Sales Robot untuk Pengenal Produk Berbasis Barcode dan Arduino ATmega328," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 2, no. 1, pp. 397–402, 2018, doi: 10.29207/resti.v2i1.264.
- [3] G. Li and W. Chou, "Path planning for mobile robot using self-adaptive learning particle swarm optimization," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 61, no. 5, p. 52204, 2017, doi: 10.1007/s11432-016-9115-2.
- [4] W. O. Quesada *et al.*, "Leader-Follower Formation for UAV Robot Swarm Based on Fuzzy Logic Theory," in *Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2018, pp. 740–751.
- [5] W. He and Y. Dong, "Adaptive Fuzzy Neural Network Control for a Constrained Robot Using Impedance Learning," *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1174–1186, 2018, doi: 10.1109/TNNLS.2017.2665581.
- [6] W. Sun, S.-F. Su, J. Xia, and V.-T. Nguyen, "Adaptive Fuzzy Tracking Control of Flexible-Joint Robots With Full-State Constraints," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 49, no. 11, pp. 2201–2209, 2019, doi: 10.1109/TSMC.2018.2870642.
- [7] T. Yifei, Z. Meng, L. Jingwei, L. Dongbo, and W. Yulin, "Research on Intelligent Welding Robot Path Optimization Based on GA and PSO Algorithms," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 65397–65404, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2878615.
- [8] D. M. B. Tarigan, D. P. Rini, and Samsuryadi, "Seleksi Fitur pada Klasifikasi Penyakit Gula Darah Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) pada Algoritma C4.5," vol. 4, no. 3, pp. 569–575, 2020.
- [9] Ipriadi, G. W. Nurcahyo, and J. Santony, "Pendeteksi Volume Air Pendeteksi Volume Air Secara Otomatis Menggunakan Fuzzy," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 3, no. 1, pp. 11–16, 2019, doi: 10.29207/resti.v3i1.738.

- [10] B. K. Patle, G. Babu L, A. Pandey, D. R. K. Parhi, and A. Jagadeesh, "A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot," *Def. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 582–606, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.011>.
- [11] Z. Li, Y. Yuan, F. Ke, W. He, and C.-Y. Su, "Robust Vision-Based Tube Model Predictive Control of Multiple Mobile Robots for Leader-Follower Formation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 4, pp. 3096–3106, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2913813.
- [12] J. Campos, S. Jaramillo, L. Morales, O. Camacho, D. Chávez, and D. Pozo, "PSO Tuning for Fuzzy PD + I Controller Applied to a Mobile Robot Trajectory Control," in *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, 2018, pp. 62–68, doi: 10.1109/INCISCOS.2018.00017.
- [13] K. Putriyani, T. Wahyuningrum, and Y. D. Prasetyo, "Prediksi Jumlah Produksi Akibat Penyebaran Covid-19 Menggunakan Metode Fuzzy Takagi-Sugeno," vol. 1, no. 10, pp. 220–230, 2021.
- [14] B. AL-Madani, F. Orujov, R. Maskeliūnas, R. Damaševičius, and A. Venčkauskas, "Fuzzy Logic Type-2 Based Wireless Indoor Localization System for Navigation of Visually Impaired People in Buildings," *Sensors*, vol. 19, no. 9, 2019, doi: 10.3390/s19092114.
- [15] K. Hamdi, "Analisis Data Sistem Informasi Geografis Rumah Tidak Layak Huni (RTLH) menggunakan Metode Fuzzy Logic," vol. 1, no. 1, pp. 19–25, 2017.
- [16] Fitriana, Gita Fadila and R. Adhitama, "Performansi Navigasi Robot Leader-Follower menggunakan Algoritma Logika Fuzzy Interval Tipe 2," *Rekayasa Sist. dan Teknol. Inf.*, vol. 3, no. 3, pp. 371–376, 2019.
- [17] S. D. Anggita and Ikmal, "Komparasi Algoritma Klasifikasi berbasis Particle Swarm Optimization pada Analisis Sentimen Ekspedisi Barang," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 4, no. 2, pp. 362–369, 2020, doi: 10.29207/resti.v4i2.1840.
- [18] N. Hafidz and D. Y. Liliana, "Klasifikasi Sentimen pada Twitter Terhadap WHO Terkait Covid-19 menggunakan SVM, N-Gram, PSO," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 1, no. 10, pp. 3–4, 2021.
- [19] I. Romli, F. Kharida, and C. Naya, "Penentuan Kepuasan Pelanggan Terhadap Pelayanan Menggunakan C4.5 dan PSO," vol. 1, no. 10, 2021.
- [20] M. Bakhale, V. Hemalatha, S. Dhanalakshmi, R. Kumar, and M. Siddharth Jain, "A Dynamic Inertial Weight Strategy in Micro PSO for Swarm Robots," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 110, no. 2, pp. 573–592, 2020, doi: 10.1007/s11277-019-06743-x.