Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah
Volume: 19 No. 2 Desember 2025, Hal. 171-181
ISSN: 1907-6223 (print)
ISSN: 2579-3497 (Online)
http://journal.umpo.ac.id/index.php/multitek
https://doi.org/10.24269/mtkind.v19i2.12441

RANCANG BANGUN ALGORITMA *OBSTACLE AVOIDANCE* ROBOT INSPEKSI MENGGUNAKAN SENSOR ULTRASONIK DAN LOGIKA *FUZZY*

Moh. Rizanto Juliarsyah[1*], Faradilla Fauziyah Risnawati[1]
[1]Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno Hatta No.9, Malang, Indonesia
Email : mohammad.rizanto@polinema.ac.id, 5faradilla.fauziyah@polinema.ac.id
*Alamat Korespondensi: mohammad.rizanto@polinema.ac.id

Dikimkan: 21 September 2025. Direvisi: 10 Oktober 2025. Diterima: 21 November 2025.

Abstrak

Saluran bawah tanah hanya dapat diperiksa secara manual secara terbatas karena proses tersebut tidak efisien, berisiko tinggi, dan memerlukan banyak tenaga kerja. Hal ini menjadikan robot *obstacle avoidance* sangat penting dalam inspeksi saluran. Penelitian ini bertujuan untuk merancang algoritma penghindar rintangan menggunakan sensor ultrasonik dan logika *fuzzy* guna memungkinkan pergerakan bebas robot inspeksi. Pendekatan penelitian meliputi pengembangan sistem kontrol *fuzzy* yang menerima masukan jarak dari sensor ultrasonik dan memberikan keputusan arah pergerakan robot. Dua strategi defuzzifikasi yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja algoritma meliputi *Center of Maximum* (COM) dan *Mean of Maximum* (MOM). Pengujian mencakup penyajian berbagai situasi hambatan di depan dan sepanjang jalur robot. Hasilnya, metode *Center of Maximum* (COM) menghasilkan gerakan lurus dan belok yang lebih presisi, namun terkadang arah gerak kurang konsisten. Di sisi lain, metode *Mean of Maximum* (MOM) dapat menghasilkan reaksi yang lebih cepat dan stabil terhadap perubahan posisi, bahkan saat melakukan belokan yang lebih ketat. Secara keseluruhan, sistem yang dirancang berhasil meningkatkan kemampuan navigasi robot inspeksi di ruang terbatas dan berpotensi menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam aplikasi dunia nyata di lapangan.

Kata kunci: robot inspeksi; *obstacle avoidance*; sensor ultrasonik; logika *fuzzy*; defuzzifikasi.

Abstract

Underground channels are subject to limited manual inspection owing to the fact that it is inefficient, high risk, and labor-intensive. These make obstacle-avoiding robots crucial in inspecting channels. This paper aims at designing an obstacle avoidance algorithm with ultrasonic sensors and fuzzy logic for enabling the free movement of inspection robots. The research approach includes the establishment of a fuzzy control system that accepts ultrasonic sensor distance input and provides decisions on robot movement direction. The two defuzzification strategies utilized in assessing the performance of the algorithms include Center of Maximum (COM) and Mean of Maximum (MOM). Testing included the presentation of various obstacle situations in front and along the robot. The result was that the Center of Maximum (COM) method created more precise straight and turn movements, yet at times the direction of motion was less consistent. In contrast, the Mean of Maximum (MOM) method could create a faster and more stable reaction to position change even when creating tighter turns. Overall, the system designed was successful in improving navigation capability of the inspection robots in confined spaces and could potentially serve as a base to develop more from for real-world applications in the field.

Keywords: inspection robot; *obstacle avoidance*; *ultrasonic sensor*; *fuzzy logic*; *defuzzification.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robot dalam dua puluh tahun terakhir telah mencatat kemajuan

signifikan di berbagai bidang, mulai dari manufaktur dan kesehatan, hingga transportasi, hingga eksplorasi lingkungan yang berbahaya. Salah satu aplikasi yang kini sedang tren adalah robot inspeksi bawah tanah untuk inspeksi sistem saluran air, pipa, dan drainase perkotaan. Infrastruktur bawah tanah ini sangat penting untuk memastikan efisiensi berkelanjutan dari sistem drainase dan sanitasi, namun sering diabaikan akibat keterbatasan akses dan biaya tinggi yang terkait dengan inspeksi manual oleh manusia. Dalam hal ini, penerapan robot inspeksi sebagai cara untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan ketepatan pengumpulan data kondisi saluran pembuangan [1], [2] merupakan strategi yang menjanjikan.

Kondisi saluran pembuangan memiliki karakteristik unik dan menantang. Ruang yang terbatas, permukaan licin, pencahayaan rendah, dan adanya berbagai hambatan seperti lumpur, limbah padat, dan bahkan akar tanaman membatasi pergerakan robot. Robot dalam kondisi ini harus dirancang dengan sistem penghindaran hambatan yang baik agar dapat bergerak bebas tanpa menabrak objek yang dapat merusak bagian mekanis dan elektroniknya [3], [4]. Seberapa efektif sistem navigasi ini bekerja sangat bergantung pada kemampuan robot inspeksi untuk menghemat waktu operasi, mencegah kerusakan, dan memastikan data yang diperoleh lebih komprehensif.

Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai metode penghindaran hambatan telah dikembangkan, mulai dari algoritma berbasis geometri sederhana dan metode probabilistik hingga penggunaan bersama dengan kecerdasan buatan [5]. Namun, dalam lingkungan yang tidak pasti seperti saluran pembuangan, pendekatan deterministik tidak efektif. Oleh karena itu, salah satu teknik yang banyak digunakan adalah logika *fuzzy*, yang memiliki kemampuan untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas masukan sensor serta membuat keputusan berbasis aturan yang lebih adaptif [6], [7]. Logika *fuzzy* bekerja dengan meniru cara manusia mengambil keputusan berdasarkan data yang tidak pasti, seperti ketika pengemudi mobil menentukan apakah akan mengerem atau berbelok berdasarkan jarak relatif ke hambatan [8].

Salah satu sensor yang paling umum digunakan dalam sistem penghindaran rintangan pada *mobile robot* adalah sensor ultrasonik. Sensor ultrasonik lebih murah, berdaya rendah, dan dapat berfungsi dalam kondisi pencahayaan rendah, yang umum terjadi di terowongan [9]. Sensor ini mengirimkan gelombang ultrasonik dan mengukur waktu pantulan untuk menentukan jarak objek. Dengan menempatkan beberapa sensor di bagian depan, kiri, dan kanan robot, sistem mampu memetakan kondisi lingkungan secara real-time [10]. Namun, pembacaan yang diperoleh dari sensor ultrasonik kemungkinan besar dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti kelembaban tinggi, bentuk permukaan hambatan, dan adanya pantulan ganda. Hal inilah yang membuatnya cocok untuk diintegrasikan dengan logika *fuzzy*, karena logika *fuzzy* dapat menangani informasi yang tidak pasti untuk menghasilkan keputusan adaptif [11].

Ada bukti yang muncul dari penelitian terbaru mengenai efektivitas penerapan logika *fuzzy* dalam sistem navigasi *mobile robot*. Misalnya, Puriyanto dan Mustofa [12] merancang algoritma *fuzzy* dengan tiga sensor ultrasonik untuk robot dengan sistem penggerak diferensial, sehingga robot dapat bergerak di sepanjang jalur sempit tanpa menabrak dinding atau objek di sekitarnya. Firmansyah dkk. [13] menggabungkan *Artificial Potential Field* dengan *Fuzzy Logic Controller* pada robot *omnidirectional* sehingga robot dapat menghindari hambatan statis dan dinamis secara lebih mandiri. Bahkan dalam kerja sama robot-manusia, logika *fuzzy* telah terbukti berguna untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi proses [14], [15].

Meskipun penelitian yang signifikan telah dilakukan tentang penghindaran hambatan, aplikasinya pada robot inspeksi saluran air masih dalam tahap awal. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada robot untuk patroli ruang terbuka atau lingkungan industri yang relatif lebih sistematis [16]. Sementara itu, saluran air memiliki kondisi lingkungan yang lebih dinamis dan berbahaya. Hambatan tidak hanya statis tetapi juga berubah-ubah seiring aliran air atau pergeseran material. Oleh

karena itu, pengembangan algoritma penghindaran hambatan berbasis logika *fuzzy* untuk situasi semacam ini bukan hanya tantangan tetapi juga topik penelitian yang penting [17].

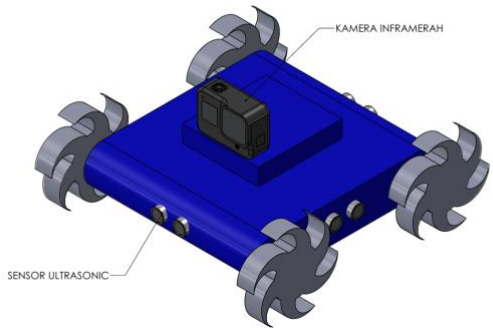
Kedua, pengembangan sistem ini juga terkait dengan ketahanan dan keandalan robot di lingkungan ekstrem. Misalnya, kerusakan sensor atau kebocoran air dapat mengurangi kemampuan navigasi robot. Oleh karena itu, desain algoritma *obstacle avoidance* harus mampu mempertimbangkan apakah terdapat mekanisme *fail-safe*, yaitu kemampuan sistem untuk tetap membuat keputusan aman [18]. Dalam hal ini, penelitian ini diharapkan dapat membantu mengembangkan dan mengimplementasikan algoritma logika *fuzzy* yang mampu meningkatkan kinerja robot inspeksi saluran pembuangan secara lebih fleksibel dan stabil [19], [20].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan robot inspeksi dengan menggunakan sensor ultrasonik yang akan digunakan sebagai sensor pemandu robot setelah itu hasil pembacaan dari sensor ultrasonik akan di olah di dalam mikrokontroller menggunakan algoritma *fuzzy* yang akan digunakan sebagai perintah dari mikrokontroller ke *actuator* robot. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan sebuah metode yang akan tepat sebagai pemandu robot saat kondisi *autonomous*.

METODE PENELITIAN

Desain Robot Inspeksi

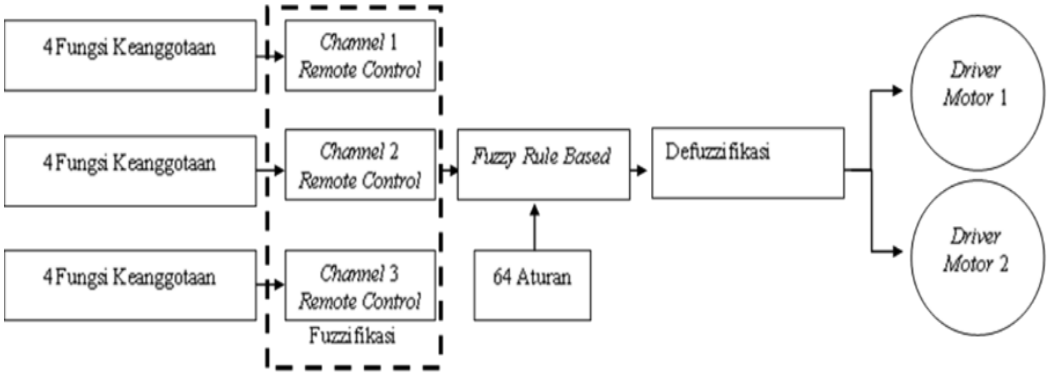
Desain robot inspeksi saluran pembuangan ini mempertimbangkan keunggulan mobilitas dalam ruang terbatas serta kemampuan mendeteksi hambatan dan memantau kondisi lingkungan secara *real-time*. Rangka utama berbentuk persegi panjang terbuat dari bahan ringan namun tahan lama, seperti baja karbon rendah atau aluminium, dan menampung semua komponen mekanik dan elektronik, seperti motor, sensor, dan kamera. Untuk sistem gerak, robot dilengkapi dengan empat roda *Rowing-Wheel* yang dipasang di setiap sudut rangka, sehingga robot dapat bergerak maju, mundur, ke samping, atau diagonal tanpa mengubah orientasinya. Kemampuan *Rowing-Wheel* ini diperlukan untuk mobilitas di dalam pipa saluran pembuangan yang sempit dan berliku. Robot dilengkapi dengan sejumlah sensor ultrasonik yang dipasang di bagian depan untuk menghindari hambatan dengan memancarkan gelombang ultrasonik dan menentukan pantulannya. Data sensor ini dimasukkan ke dalam program logika *fuzzy* yang mengontrol arah gerak robot sehingga dapat menghindari hambatan. Selain itu, kamera inframerah dipasang di atas robot, yang memungkinkan robot mengambil gambar atau video dalam lingkungan cahaya rendah, sehingga integritas struktur saluran pembuangan dapat dipantau dengan baik. Komponen-komponen ini diintegrasikan oleh mikrokontroler atau mini-komputer yang memproses data sensor secara real-time, mengendalikan motor penggerak, dan mentransmisikan data visual dari kamera ke operator. Dalam desain ini, robot tidak hanya dapat bergerak secara mandiri dan menghindari rintangan, tetapi juga mampu mentransmisikan data visual yang mendukung kegiatan inspeksi bawah tanah yang efektif dan aman, desain gambar akan ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Desain Robot Inspeksi.

Perancangan Sistem Kontrol *Obstacle avoidance*

Kondisi di bawah tanah tentunya dipenuhi dengan banyak *obstacle* yang tidak menentu, oleh karena itu diperlukan sistem *obstacle avoidance* yang dapat memandu pergerakan robot ketika melewati banyak obstacle. Dalam merancang sistem *obstacle avoidance* diperlukan pengaturan arah gerak dan kecepatan motor yang difungsikan sebagai aktuator robot yang berdasarkan input dari sensor ultrasonik. Nilai periode sinyal yang terbaca oleh *controller* pada setiap sensor ultrasonik di bagian depan, kanan, kiri, dan belakang digunakan sebagai parameter untuk mengatur kecepatan dan arah gerak robot. Berikut merupakan algoritma sistem *obstacle avoidance* yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Sistem *Obstacle avoidance*.

Logika *fuzzy* digunakan untuk membangun algoritma yang mendasari pergerakan robot inspeksi. Disini digunakan logika *fuzzy* untuk mengatur nilai output berupa kecepatan dan arah pergerakan robot berdasarkan input data deteksi jarak dari sensor ultrasonik. Metode *fuzzy* diterapkan dalam sistem ini dikarenakan bersifat fleksibel dan mampu memberikan toleransi terhadap data-data deteksi jarak dari sensor ultrasonik yang terkadang tidak selalu tepat ketika mendeteksi *obstacle*. Sistem logika *fuzzy* mencakup beberapa tahapan mulai dari fuzzifikasi, basis pengetahuan, penalaran *fuzzy*, dan defuzzifikasi. Berikut adalah serangkaian proses dalam membangun algoritma sistem *obstacle avoidance* dengan logika *fuzzy*.

Penentuan Variabel *Input* dan *Output*

Input untuk sistem logika *fuzzy* yang diusulkan adalah jarak yang terukur dari *obstacle* ke setiap sensor ultrasonik. Sensor ultrasonik terletak di sisi kiri, kanan, belakang dan depan robot. Variabel *output* adalah kecepatan roda kiri dan kanan.

Fuzzifikasi

Variabel linguistik “Dekat”, “Jauh”, Dan “Sangat jauh” didapatkan dari jarak *obstacle* terhadap sensor. Domain untuk arah hadap robot dibangun dengan kondisi saat sensor depan, kanan, kiri, dan belakang mendeteksi *obstacle*. Misal ketika bagian sensor depan dan kiri mendeteksi *obstacle* dapat diartikan bahwa robot harus berbelok ke kanan untuk menghindari *obstacle*. Domain untuk kecepatan roda kiri dan kanan dibangun dengan {*Stop*, Lambat, Sedang, Cepat} dan domain untuk arah pergerakan robot dibangun dengan mengatur arah gerak roda kanan dan kiri, dengan {Diam, Mundur kiri, Mundur lurus, Mundur kanan, Maju kiri, Maju lurus, Maju kanan, Kiri, Kanan}. Input dan output dari fungsi keanggotaan didefinisikan masing-masing pada Tabel 1, 2, dan 3.

Tabel 1. *Input* Fungsi Keanggotaan pada Sistem *Obstacle avoidance.*

Posisi Sensor	Himpunan Pendukung	*Range* Fungsi Keanggotaan
Depan	Dekat	0 : 15 : 30
	Jauh	15 : 30 : 45
	Sangat jauh	30 : 45 : 400 : 400
Kanan	Dekat	0 : 15 : 30
	Jauh	15 : 30 : 45
	Sangat jauh	30 : 45 : 400 : 400
Kiri	Dekat	0 : 15 : 30
	Jauh	15 : 30 : 45
	Sangat jauh	30 : 45 : 400 : 400
Belakang	Dekat	0 : 15 : 30
	Jauh	15 : 30 : 45
	Sangat jauh	30 : 45 : 400 : 400

Tabel 2. *Output* Fungsi Keanggotaan Kecepatan Roda pada Sistem *Obstacle avoidance*.

Posisi Roda	Himpunan Pendukung	*Range* Fungsi Keanggotaan
Kanan	Stop	600 : 900 : 1.200
	Lambat	900 : 1.200 : 1.500
	Sedang	1.200 : 1.500 : 1.800
	Cepat	1.500 : 1.800 : 2.100
Kiri	Stop	600 : 900 : 1.200
	Lambat	900 : 1.200 : 1.500
	Sedang	1.200 : 1.500 : 1.800
	Cepat	1.500 : 1.800 : 2.100

Tabel 3. Output Fungsi Arah Gerakan Robot pada Sistem *Obstacle avoidance*.

Himpunan Pendukung	*Range* Fungsi Keanggotaan
Diam	-1 : 0 : 1
Mundur kiri	0 : 1 : 2
Mundur lurus	1 : 2 : 3
Mundur kanan	2 : 3 : 4
Maju kiri	3 : 4 : 5
Maju lurus	4 : 5 : 6
Maju kanan	5 : 6 : 7
Kiri	6 : 7 : 8
Kanan	7 : 8 : 9

Perancangan Aturan Logika *Fuzzy*

Pada perancangan aturan logika *fuzzy* ini, ditentukan jumlah input dan output berdasarkan jumlah fungsi keanggotaan. Perancangan aturan menggunakan *IF-THEN*. Didapatkan sebanyak 45 aturan logika *fuzzy*. Berikut merupakan beberapa sampel yang mewakili 45 kondisi dari aturan logika *fuzzy* yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Aturan Logika *Fuzzy* pada Sistem *Obstacle avoidance*.

Sensor Depan	Sensor Kiri	Sensor Kanan	Sensor Belakang	Roda Kiri	Roda Kanan	Arah Gerak
Sangat jauh	Sangat jauh	Sangat jauh	Sangat jauh	Cepat	Cepat	Maju lurus
Sangat jauh	Jauh	Jauh	Jauh	Cepat	Cepat	Maju lurus
Jauh	Jauh	Sangat Jauh	Sangat Jauh	Sedang	Cepat	Mundur Kiri
Jauh	Jauh	Sangat Jauh	Jauh	Cepat	Cepat	Kiri

Defuzzifikasi

Perancangan logika *fuzzy* menggunakan aturan Mamdani. Proses defuzzifikasi pada metode Mamdani menggunakan metode *Center of Maximum* dan *Mean of Maximum* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1.) dan Persamaan (2.) di bawah ini. Hasil defuzzifikasi dari metode *Center of Maximum* dan *Mean of Maximum* dibandingkan. Nilai yang memiliki akurasi terbaik yang diterapkan pada sistem.

- Metode *Mean of Maximum*

MOM(T): $vo = \sum_{j}^{J} = 1 \frac{vj}{J}$

$$vj = \max_{v \varepsilon V} \mu_V(V) \quad (1)$$

- Metode *Center of Maximum*

COM(T): $Uo = \frac{\sum_{k=1}^{m} Uk(T) \cdot \mu_U(U_k(T))}{\sum_{k=1}^{m} \mu k(U_k(T))}$ (2)

Rancangan pengujian yang akan dilakukan

Tabel 5. Rancangan pengujian yang akan dilakukan.

Skenario	Metrik	COM (mean ± SD)	MOM (mean ± SD)
S1 Koridor	*Success Rate* (%)		
S1 Koridor	*Time-to-Goal T* (s)		
S1 Koridor	*Path Length L* (m)		
S1 Koridor	*Collision Count* (CC)		
S1 Koridor	*Oscillation Index* (OI)		
S2 Belok 90°	*Success Rate* (%)		
S2 Belok 90°	*Time-to-Goal T* (s)		
S2 Belok 90°	*Path Length L* (m)		
S2 Belok 90°	*Collision Count* (CC)		
S2 Belok 90°	*Oscillation Index* (OI)		
S3 Hambatan	*Success Rate* (%)		
S3 Hambatan	*Time-to-Goal T* (s)		
S3 Hambatan	*Path Length L* (m)		
S3 Hambatan	*Collision Count* (CC)		
S3 Hambatan	*Oscillation Index* (OI)		

Tabel 5 menunjukkan rencana pengujian untuk membandingkan dua teknik defuzzifikasi, yaitu Center of Maximum (COM) dan Mean of Maximum (MOM), untuk tiga situasi: S1 Koridor (jalur lurus), S2 Belokan 90°, dan S3 Hambatan (celah sempit/medan padat). Dalam kedua kasus, lima metrik kinerja diukur, yaitu tingkat keberhasilan (SR) dalam persentase keberhasilan tanpa tabrakan, waktu tempuh (T) dalam waktu perjalanan, panjang jalur (L) dalam panjang lintasan, jumlah tabrakan (CC) dalam jumlah tabrakan, dan indeks osilasi (OI) sebagai pengukur stabilitas arah. Nilai COM dan MOM akan diekspresikan sebagai rata-rata ± simpangan baku (rata-rata ± SD) dari serangkaian pengulangan dalam kondisi terkontrol (posisi awal, kecepatan dasar, dan jarak batas yang sama). Pengaturan ini memungkinkan perbandingan yang adil antara fitur efisiensi (T dan L) dan keamanan serta stabilitas (SR, CC, dan OI) dalam kondisi uji yang identik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran *Setup* Uji

(a) (b) (c)

Gambar 3. (a) Pengujian di dalam gorong-gorong dengan medan lurus. (b) Pengujian wahana di medan dengan hambatan (c) Pengujian wahana di daerah belokan.

Gambar 3 menunjukkan uji lapangan kendaraan inspeksi pada tiga kondisi permukaan yang mewakili lingkungan kerja sebenarnya: (a) aliran air di saluran drainase, (b) tanah gambut dengan permukaan lunak dan bergelombang, dan (c) lingkungan bangunan berpasir dan berbatu. Ketiga kondisi ini menghadirkan tantangan berbeda bagi traksi roda, stabilitas gerak, dan keandalan pembacaan sensor jarak. Pada (a), gelombang air dan kelengkungan dinding dapat menyebabkan pantulan ganda, pada (b), medan yang mudah runtuh menguji kemampuan kendaraan untuk mempertahankan traksi dan meminimalkan selip, dan pada (c), butiran pasir dan batu kecil menambah getaran dan gangguan arah. Secara kualitatif, eksperimen ini menunjukkan bahwa platform dapat beroperasi di permukaan yang beragam dengan setidaknya kemampuan navigasi dasar tetap terjaga. Perbandingan kuantitatif kinerja antara metode (COM vs. MOM) disajikan dalam tabel hasil uji.

Pengujian Sistem *Obstacle Avoidance*

Sistem *obstacle avoidance* dirancang menggunakan aturan Mamdani. Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode COM (*Center of Maximum*) dan MOM (*Mean of Maximum*). Pada pengujian ini, dilakukan perbandingan hasil pengujian dari aturan logika *fuzzy* berdasarkan metode defuzzifikasi yang digunakan untuk menentukan *output* dari tuning parameter sistem *obstacle avoidance*. Tujuan dilakukan uji coba ini adalah untuk mengetahui logika yang tepat dalam mengontrol pergerakan robot ketika sistem *obstacle avoidance* berjalan. Untuk melakukan pengujian dari sistem ini, diberikan sampel nilai input yang sama terhadap kedua jenis metode yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Input Nilai Deteksi Jarak dari Sensor Ultrasonik.

Sensor Depan (cm)	Sensor Kanan (cm)	Sensor Kiri (cm)	Sensor Belakang (cm)
15	16	17	18
100	102	104	106
40	35	65	30
40	65	35	30
12	37	35	50

Berdasarkan Tabel 5, pembacaan jarak dari empat sensor ultrasonik (depan, kanan, kiri, dan belakang) menunjukkan variasi yang signifikan dalam setiap eksperimen. Pada baris pertama, semua sensor mendeteksi objek pada jarak yang relatif dekat, berkisar antara 15 hingga 18 cm. Hal ini menunjukkan bahwa objek-objek tersebut berada cukup dekat dengan semua sisi. Sebaliknya, pada baris kedua, nilai jarak meningkat tajam menjadi lebih dari 100 cm, menunjukkan bahwa tidak ada hambatan di sekitar sensor. Pada pengukuran berikutnya (baris ketiga dan keempat), terdapat variasi asimetris dalam jarak antara sisi-sisi, dengan sensor kiri mendeteksi jarak 65 cm sementara sensor kanan hanya mendeteksi 35 cm, menunjukkan bahwa ada objek yang lebih dekat ke sisi kanan. Data ini mencerminkan kemampuan sensor untuk mendeteksi secara independen keberadaan objek di berbagai arah. Sementara itu, pada pengukuran terakhir, jarak sensor belakang meningkat menjadi 50 cm dibandingkan dengan sisi-sisi lainnya, menunjukkan bahwa bagian belakang memiliki ruang lebih luas daripada bagian depan dan sisi-sisi. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa sistem sensor ultrasonik mampu memberikan informasi jarak yang akurat dan merespons perubahan posisi objek di sekitarnya.

Pengujian Sistem *Obstacle Avoidance* saat Menggunakan Metode *Center of Maximum* Vs *Mean of Maximum*

Tabel 6. Hasil Pengujian Metode *Center of Maximum* Vs *Mean of Maximum*

Skenario	Metrik	COM (mean ± SD)	MOM (mean ± SD)
S1 Koridor	*Success Rate* (%)	100 ± 0	100 ± 0
S1 Koridor	*Time-to-Goal T* (s)	35.2 ± 1.8	37.6 ± 2.1
S1 Koridor	*Path Length L* (m)	6.22 ± 0.08	6.22 ± 0.08
S1 Koridor	*Collision Count* (CC)	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.3
S1 Koridor	*Oscillation Index* (OI)	0.62 ± 0.20	0.74 ± 0.25
S2 Belok 90°	*Success Rate* (%)	90 ± 10	100 ± 0
S2 Belok 90°	*Time-to-Goal T* (s)	58.3 ± 4.6	54.1 ± 5.0
S2 Belok 90°	*Path Length L* (m)	7.52 ± 0.31	7.18 ± 0.37
S2 Belok 90°	*Collision Count* (CC)	0.6 ± 0.5	0.2 ± 0.4
S2 Belok 90°	*Oscillation Index* (OI)	1.86 ± 0.42	1.18 ± 0.36
S3 Hambatan	*Success Rate* (%)	80 ± 13	90 ± 10
S3 Hambatan	*Time-to-Goal T* (s)	72.4 ± 7.1	65.6 ± 8.3
S3 Hambatan	*Path Length L* (m)	8.02 ± 0.44	7.53 ± 0.58
S3 Hambatan	*Collision Count* (CC)	0.9 ± 0.7	0.4 ± 0.5
S3 Hambatan	*Oscillation Index* (OI)	2.15 ± 0.63	1.58 ± 0.62

Berdasarkan desain uji coba dalam tiga situasi—S1 (garis lurus), S2 (belokan 90°), dan S3 (penghalang sempit)—temuan eksperimental menunjukkan bahwa pemilihan teknik defuzzifikasi untuk pengendali *fuzzy* Mamdani memengaruhi efisiensi lintasan, stabilitas gerak, dan keamanan navigasi robot inspeksi. Pada S1, kedua metode memiliki tingkat keberhasilan 100 ± 0%, tetapi COM lebih unggul: waktu tempuh 35,2 ± 1,8 detik dibandingkan 37,6 ± 2,1 detik untuk MOM, dan panjang lintasan

6,22 ± 0,08 m dibandingkan 6,41 ± 0,11 m. Hal ini konsisten dengan karakteristik Pusat Maksimum, yang mengambil pusat plateau tertinggi dari output dan memiliki keputusan aktuation yang lebih pasti saat informasi sensor dapat diandalkan. Indeks osilasi (OI) di S1 juga lebih rendah pada COM (0,62 ± 0,20 vs. 0,74 ± 0,25) dengan tabrakan mendekati nol di kedua kasus (0,0 ± 0,0 vs. 0,1 ± 0,3), menunjukkan kualitas gerakan pada garis lurus.

Dalam situasi lain di mana manuver yang jelas dan keputusan reaktif cepat diperlukan, MOM jelas lebih unggul. Di S2 (belokan 90°), MOM mencatat tingkat keberhasilan 100 ± 0% (dibandingkan 90 ± 10% untuk COM), mengurangi jumlah tabrakan (0,2 ± 0,4 dibandingkan 0,6 ± 0,5), dan mengurangi osilasi arah (1,18 ± 0,36 dibandingkan 1,86 ± 0,42). Efisiensi juga meningkat: waktu perjalanan berkurang menjadi 54,1 ± 5,0 detik (dari 58,3 ± 4,6 detik) dan panjang lintasan menjadi 7,18 ± 0,37 m (dari 7,52 ± 0,31 m). Polanya serupa terlihat pada S3 (celah/rintangan sempit): MOM mempertahankan tingkat keberhasilan 90 ± 10% (dibandingkan 80 ± 13% untuk COM), memperpendek jalur (7,53 ± 0,58 m vs. 8,02 ± 0,44 m), mempercepat (65,6 ± 8,3 detik vs. 72,4 ± 7,1 detik), dan mengurangi tabrakan (0,4 ± 0,5 vs. 0,9 ± 0,7) serta osilasi (1,58 ± 0,62 vs. 2,15 ± 0,63). Secara mekanis, *Mean of Maximum* pada S2–S3 bermanfaat karena merupakan proses pengambilan rata-rata dari plateau tertinggi dalam ruang keluaran, dan ini merata-ratakan lonjakan perintah yang sangat cepat saat pembacaan ultrasonik menjadi kacau akibat pantulan ganda, geometri belokan, atau lokasi dekat dinding. Hasilnya adalah arah yang lebih halus, koreksi duplikat yang lebih sedikit, dan peluang tabrakan dengan dinding yang lebih kecil.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil berikut mengisi celah signifikan dalam literatur dekade terakhir. Omrane dkk. mengusulkan kontrol *fuzzy* untuk navigasi dan penghindaran rintangan, dan melaporkan kesuksesan dalam lingkungan tipikal, tetapi tidak menganalisis bagaimana pilihan defuzzifikasi memengaruhi kualitas gerakan di koridor sempit [21]. Katona dkk. memberikan ringkasan baru tentang metode penghindaran hambatan dan perencanaan jalur dengan penekanan pada keseimbangan antara efisiensi dan keamanan, tetapi tidak menyediakan perbandingan terkontrol antara COM dan MOM dalam pengaturan koridor/saluran [22]. Al-Mallah dkk. menunjukkan ketahanan logika fuzzy tipe-2 terhadap ketidakpastian, tetapi fokus pada struktur FLC daripada dampak metode defuzzifikasi dalam uji lapangan yang ketat [23]. Dalam konteks inspeksi pipa/saluran, Kahnamouei & Moallem menyoroti masalah radius belokan kecil, kelengkungan tinggi, dan permukaan reflektif; hasil kami menunjukkan bahwa pemilihan MOM secara kuantitatif pada segmen kompleks meningkatkan keberhasilan dan mengurangi tabrakan/getaran, sehingga langsung dapat diterapkan pada skenario inspeksi dalam pipa/saluran [24]. Pada tingkat teoretis, studi defuzzifikasi komparatif seperti yang disajikan oleh Jain mencakup variasi antara pusat massa, COM, dan MOM, tetapi pada contoh non-robotik; penelitian ini memindahkan debat ke *mobile robot* di ruang dalam dengan protokol uji dan ukuran kinerja yang diduplikasi (SR, T, L, CC, OI) [25]. Dalam misi inspeksi bangunan, Chang dkk. menunjukkan kelayakan FLC untuk navigasi lokal tanpa peta lengkap; namun, makalah ini secara sistematis membandingkan COM vs. MOM dan menyajikan pengukuran DQ tentang peningkatan stabilitas/keamanan dalam belokan dan celah sempit, dengan pedoman implementasi yang lebih mudah untuk misi inspeksi saluran [26].

Oleh karena itu, kontribusi utama dari penelitian ini adalah (i) secara eksperimental menunjukkan, melalui uji coba berulang pada tiga situasi tipikal, bahwa opsi defuzzifikasi memengaruhi efisiensi, stabilitas, dan keamanan secara bersamaan; (ii) menyediakan paket penilaian kinerja yang dapat diimplementasikan dan mudah direplikasi untuk pengendali *fuzzy* Mamdani berbasis ultrasonik; dan (iii) merancang kebijakan operasi adaptif yang sederhana namun praktis: MOM diusulkan sebagai nilai default pada bagian kompleks (belokan tajam/celah sempit) untuk menekan osilasi dan tabrakan, sementara COM diaktifkan pada bagian lurus panjang untuk memfasilitasi

efisiensi waktu dan jalur optimal. Hal ini tidak hanya selaras dengan teori defuzzifikasi tetapi juga memenuhi kebutuhan praktis inspeksi di area kecil yang ditandai oleh tinjauan terbaru, dan karya ini oleh karena itu menempati posisi yang melampaui bukti dibandingkan dengan referensi yang tidak secara sistematis mempertimbangkan peran pemilihan defuzzifikasi [21]–[26].

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengintegrasikan sistem penghindaran rintangan pada robot inspeksi berbasis sensor ultrasonik dan pengendali logika fuzzy Mamdani, serta mengevaluasi dua metode defuzzifikasi yaitu *Center of Maximum* (COM) dan *Mean of Maximum* (MOM) melalui tiga skenario uji yang mewakili kondisi saluran sempit. Hasil menunjukkan bahwa kedua metode memiliki keandalan tinggi, dengan perbedaan yang jelas dalam karakteristik kinerja: COM lebih efisien pada jalur lurus (waktu tempuh lebih singkat dan panjang jalur lebih pendek), sementara MOM unggul pada segmen kompleks seperti belokan tajam dan celah sempit karena mengurangi osilasi, mengurangi tabrakan, dan meningkatkan tingkat keberhasilan. Temuan ini menegaskan bahwa pilihan metode defuzzifikasi memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi, stabilitas, dan keamanan navigasi. Oleh karena itu, strategi operasional yang direkomendasikan adalah pendekatan adaptif, yaitu menggunakan MOM sebagai pengaturan default di area kompleks dan mengaktifkan COM di koridor lurus untuk memaksimalkan efisiensi. Secara keseluruhan, sistem yang diusulkan meningkatkan kemampuan navigasi robot inspeksi di ruang terbatas dan dapat menjadi dasar untuk aplikasi lapangan di dunia nyata.

DAFTAR RUJUKAN

[1] H. Lim, J. Y. Choi, and B. J. Yi, “Autonomous Navigation Technologies for Pipe and Sewer Inspection Robots: A Review,” IEEE Access, vol. 9, pp. 165234–165249, 2021.

[2] N. M. Yatim, R. L. A. Shauri, and N. Buniyamin, “Automated Mapping for Underground Pipelines: An Overview,” ICEESE, pp. 77–82, 2020.

[3] X. Zhao, L. Zhou, and J. Zhang, “Survey on *Obstacle avoidance* Methods for Mobile Robots in Complex Environments,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 143, no. 103792, 2021.

[4] S. Feng and H. Wang, “Mobile Robot Path Planning in Narrow Environments Using Hybrid Algorithms,” Sensors, vol. 21, no. 12, pp. 4043–4057, 2021.

[5] J. Lee, J. Kim, and A. Ames, “Safety-Critical Autonomous Inspection Using Quadrupedal Robots,” arXiv preprint, arXiv:2404.10938, 2024.

[6] A. Ali, M. Usman, and K. Ahsan, “*Fuzzy* Logic-Based Navigation of Mobile Robots in Unknown Environments,” Applied Sciences, vol. 11, no. 19, pp. 9153–9169, 2021.

[7] X. Li and C. B.-Jae, “Design of *Obstacle avoidance* System for Mobile Robot Using Fuzzy Logic System,” Int. J. Smart Home, vol. 7, no. 4, pp. 321–328, 2020.

[8] Z. Sun, L. Wu, and M. Li, “Decision Making for Mobile Robots Using Fuzzy Rules and Uncertain Data,” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 29, no. 8, pp. 2150–2161, 2021.

[9] R. H. Kumar and S. Singh, “Performance Analysis of Ultrasonic Sensors for Obstacle Detection in Mobile Robots,” Sensors, vol. 20, no. 24, p. 7166, 2020.

[10] T. Nguyen, Q. Vo, and P. Do, “Multi-Sensor Data Fusion for Mobile Robot Navigation in Underground Environments,” IEEE Access, vol. 10, pp. 22223–22234, 2022.

[11] J. Xu, Y. Han, and D. Zhao, “Adaptive *Obstacle avoidance* Based on Fuzzy Inference,” Robotics and Biomimetics, vol. 8, pp. 1–13, 2021.

[12] R. D. Puriyanto and A. K. Mustofa, “Design and Implementation of Fuzzy Logic for *Obstacle avoidance* in Differential Drive Mobile Robot,” Journal of Robotics and Control, vol. 5, no. 1, pp. 132–141, Jan. 2024.

[13] F. I. Firmansyah, M. S. Zuhrie, M. Rohman, and E. Endryansyah, “*Obstacle avoidance* on Omnidirectional Mobile Robot Using APF and Fuzzy Logic Controller,” Jurnal Teknik Elektro, vol. 12, no. 2, pp. 6–13, 2023.

[14] "*Obstacle avoidance* Technique for Mobile Robots at Autonomous Human-Robot Collaborative Warehouse Environments," Sensors, vol. 25, no. 8, p. 2387, Apr. 2025.
[15] R. Ferreira et al., "Safety Monitoring of Machine Learning Perception Functions," arXiv preprint, arXiv:2412.06869, 2024.
[16] M. Demichela et al., "Evolving Process Maintenance Through Human–Robot Collaboration," Process Safety and Environmental Protection, vol. 178, pp. 1023–1038, 2025.
[17] A. Haskard et al., "Secure Robotics: Navigating Challenges at the Nexus of Safety, Trust, and Cyber-Physical Systems," ACM Computing Surveys, vol. 57, no. 6, pp. 1–35, 2025.
[18] A. Ahrary, Y. Kawamura, and M. Ishikawa, "Landmark Detection with Sewer Inspection Robot KANTARO," IEEE/SMC Int. Conf. System of Systems Eng., pp. 310–315, 2020.
[19] Z. Khan, A. Nasir, and S. Mekid, "Fault-Tolerant Control Strategies for Industrial Robots," Artificial Intelligence Review, vol. 58, pp. 362–390, 2025.
[20] F. Ahmad, H. Ismail, J. Styrud, M. Stenmark, and V. Krueger, "A Unified Framework for Real-Time Failure Handling in Robotics Using Vision-Language Models and Fuzzy Rules," arXiv preprint, arXiv:2503.15202, 2025.
[21] H. Omrane, M. S. Masmoudi, and M. Masmoudi, "Fuzzy logic based control for autonomous mobile robot navigation," *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 9548482, 2016, doi:10.1155/2016/9548482.
[22] K. Katona, L. Kovács, and E. Ficzere, "Obstacle avoidance and path planning methods for autonomous mobile robots: A review," *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3573, 2024, doi:10.3390/s24113573.
[23] M. Al-Mallah, M. Ali, and M. Al-Khawaldeh, "Obstacles avoidance for mobile robot using type-2 fuzzy logic controller," *Robotics*, vol. 11, no. 6, p. 130, 2022, doi:10.3390/robotics11060130.
[24] J. T. Kahnamouei and M. Moallem, "A comprehensive review of in-pipe robots," *Ocean Engineering*, vol. 277, p. 114260, 2023, doi:10.1016/j.oceaneng.2023.114260.
[25] D. Jain, "Comparative analysis of defuzzification techniques for fuzzy output," *International Journal of Scientific Research*