Analisis Pengaruh Kalibrasi dan Penentuan Threshold Sensor terhadap Akurasi Deteksi Garis pada Sistem Sensor Infrared 8 Channel Robot Line Follower

Muhammad Akil[1], Sutarsih Suhaeb[2]

[1] Pendidikan Vokasional Mekatronika, Universitas Negeri Makassar
[2] Pendidikan Teknik Elektronika, Universitas Negeri Makassar

Coprespondent Author: muhammadakil@unm.ac.id

***Abstrak* — Robot *line follower* merupakan salah satu sistem robotika yang banyak digunakan dalam penelitian dan pembelajaran karena memiliki kemampuan mengikuti jalur berdasarkan informasi dari sensor pendeteksi garis. Salah satu komponen penting yang menentukan kinerja sistem tersebut adalah sensor infrared, khususnya dalam proses klasifikasi antara garis dan permukaan lintasan. Namun, perbedaan karakteristik respons setiap sensor menyebabkan penggunaan nilai *threshold* yang sama dapat menurunkan akurasi deteksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh metode kalibrasi dan penentuan *threshold* terhadap akurasi deteksi garis pada sistem sensor infrared delapan kanal. Metode pengujian dilakukan menggunakan lintasan garis hitam dengan lebar 2 cm pada permukaan putih, dengan tiga skenario pengaturan *threshold*, yaitu *threshold default*, *threshold global*, dan *threshold individual* hasil kalibrasi masing-masing sensor. Pengujian dilakukan pada empat posisi pasangan sensor, yaitu S0-S1, S2-S3, S4-S5, dan S6-S7, dengan total 360 data pengamatan. Analisis data dilakukan secara deskriptif melalui perhitungan tingkat keberhasilan deteksi dan dilanjutkan menggunakan uji statistik nonparametrik Kruskal–Wallis untuk mengetahui perbedaan performa antar metode. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *threshold default* menghasilkan akurasi 0%, metode *threshold global* menghasilkan akurasi 25%, sedangkan metode *threshold individual* menghasilkan akurasi 100%. Hasil uji Kruskal–Wallis menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar metode dengan nilai H = 266,686 dan p < 0,001. Berdasarkan hasil tersebut, metode kalibrasi *threshold individual* terbukti mampu meningkatkan kestabilan dan akurasi deteksi garis karena mampu menyesuaikan karakteristik pembacaan ADC pada setiap sensor infrared.**

***Kata Kunci* — Sensor Infrared; Robot Line Follower; Kalibrasi Sensor; Threshold Individual; Kruskal–Wallis.**

***Abstract* —** *A line follower robot is one of the robotic systems widely used in research and education because it has the ability to follow a path based on information from line-detection sensors. One of the important components that determines the performance of such a system is the infrared sensor, particularly in the process of classifying between the line and the track surface. However, differences in the response characteristics of each sensor mean that using the same threshold value can reduce detection accuracy. This study aims to analyze the effect of calibration methods and threshold determination on line detection accuracy in an eight-channel infrared sensor system. The testing method was carried out using a black line track with a width of 2 cm on a white surface, with three threshold-setting scenarios, namely the default threshold, the global threshold, and the individual threshold resulting from the calibration of each sensor. Testing was conducted on four sensor pair positions, namely S0-S1, S2-S3, S4-S5, and S6-S7, with a total of 360 observation data. Data analysis was carried out descriptively by calculating the detection success rate and continued using the nonparametric Kruskal–Wallis statistical test to determine performance differences between methods. The results showed that the default threshold method produced an accuracy of 0%, the global threshold method produced an accuracy of 25%, while the individual threshold method produced an accuracy of 100%. The Kruskal–Wallis test results showed a significant difference between methods with a value of H = 266.686 and p < 0.001. Based on these results, the individual threshold calibration method is proven to improve the stability and accuracy of line detection because it is able to adjust the ADC reading characteristics of each infrared sensor.*

Keyword — Infrared Sensor; Line Follower Robot; Sensor Calibration; Individual Threshold; Kruskal–Wallis.

I. PENDAHULUAN

Robot Line Follower merupakan robot beroda yang dapat berjalan secara otomatis dengan cara mendeteksi dan mengikuti jalur tertentu. Robot ini dilengkapi dengan sensor inframerah (IR) untuk melakukan pembacaan jalur dengan warna yang berbeda dengan warna permukaan. Penggunaan teknologi sensor IR ini banyak digunakan dalam pengembangan robotika, karena kemampuannya dalam membaca perbedaan karakteristik permukaan dan mengubah informasi tersebut menjadi sinyal Listrik untuk menggerakkan robot [1][2]. Robot Line Follower ini bekerja berdasarkan kualitas / kepekaan dalam pendeteksian, algoritma program yang sesuai, dan sistem mekanik yang ringan dan kuat. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimalisasi terhadap semua komponen untuk meningkatkan ketepatan dan stabilitas pembacaan jalur [3]. Prinsip kerja Sensor IR adalah membedakan garis dan permukaan dengan memancarkan cahaya inframerah dan mengukur intensitas cahaya yang dipantulkan dari permukaan. Kontras dalam reflektivitas garis hitam dan permukaan putih menghasilkan sinyal yang dapat digunakan untuk menentukan posisi robot relatif terhadap jalur yang sedang diikuti [4].

Jenis Sensor IR TCRT5000 dapat menghasilkan keluaran analog berdasarkan banyaknya cahaya yang dipantulkan dari permukaan suatu objek. Pantulan cahaya

inframerah pada permukaan putih cenderung lebih tinggi, sedangkan garis hitam menghasilkan pantulan yang lebih rendah sehingga perbedaan ini dapat digunakan sebagai dasar pendeteksian garis [4]. Namun, kualitas pembacaan sensor sangat bergantung pada jarak antara sensor dan permukaan yang diamati. Kontras sinyal yang lebih besar memberikan dasar yang lebih kuat untuk menghasilkan deteksi garis yang andal [4]. Oleh karena itu, penentuan ketinggian pemasangan sensor merupakan salah satu aspek penting dalam proses kalibrasi sistem sensor robot pengikut garis.

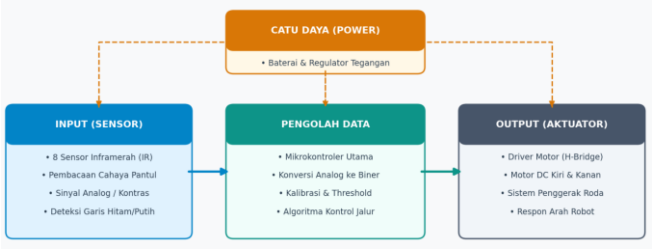
Selain pengaturan posisi dan ketinggian sensor, sistem konversi pembacaan sensor berupa sinyal analog yang akan diubah menjadi bilangan biner juga merupakan bagian penting dari hasil deteksi garis [5]. Salah satu cara untuk membedakan antara kondisi sensor saat berada di atas garis hitam dan saat berada di atas permukaan putih adalah dengan mengatur nilai ambang batas (threshold). Nilai ambang batas dapat ditentukan dengan mengukur nilai rata-rata keluaran analog pada permukaan putih dan hitam, kemudian menentukan nilai batas di antara kedua kondisi tersebut. Namun, penggunaan ambang batas memiliki keterbatasan, karena karakteristik pembacaan sensor dapat berubah akibat variasi intensitas cahaya, perbedaan reflektivitas permukaan, dan perubahan sensitivitas komponen sensor. Tantangan penggunaan nilai ambang batas tetap pada sistem robot pengikut garis serta pendekatan kalibrasi otomatis menggunakan Adaptive Machine Learning (AML) mampu meningkatkan akurasi dalam kisaran 85–96% [6]. Sementara itu, pendekatan ambang batas per saluran dan nilai yang menyesuaikan sendiri juga diteliti untuk meningkatkan kepekaan sensor terhadap perubahan cahaya sekitar dan mengurangi kebutuhan perhitungan manual [7][8].

Variasi karakteristik antar-sensor dan kondisi lingkungan menjadi faktor lain yang perlu diperhatikan dalam proses kalibrasi. Setiap sensor IR dapat menghasilkan pembacaan yang berbeda akibat ketidaktepatan pemasangan, gangguan tegangan, sensitivitas terhadap cahaya ambient, serta perbedaan karakteristik permukaan yang dideteksi [4][9]. Dengan demikian, kalibrasi tidak hanya mencakup penentuan nilai threshold saja, tetapi juga pengaturan mekanis dan elektrikal untuk memastikan sensor beroperasi pada kondisi yang optimal. Otomatisasi proses kalibrasi juga menjadi salah satu arah pengembangan untuk meningkatkan kemudahan penggunaan dan sensitivitas sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan [3][8].

Berdasarkan uraian tersebut, kalibrasi sensor IR dan penentuan threshold merupakan aspek fundamental dalam pengembangan robot line follower, khususnya pada sistem yang menggunakan array delapan sensor IR. Kalibrasi yang dilakukan secara tepat diperlukan untuk mengatasi variasi karakteristik sensor, mengoptimalkan jarak pemasangan, meningkatkan kontras pembacaan antara garis dan latar belakang, serta menghasilkan keputusan deteksi yang konsisten.

II. METODE

1. Arsitektur Sistem



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Robot Line Follower 8 Sensor IR

Diagram blok sistem ini menggambarkan alur kerja dan hubungan antar komponen utama, yang terdiri dari input, pengolah data, output, dan catu daya. Pada bagian input, digunakan 8 sensor inframerah (IR) untuk membaca intensitas pantulan cahaya dari permukaan sehingga dapat membedakan garis hitam dan area putih berdasarkan perbedaan kontras sinyal. Sinyal analog yang dihasilkan sensor kemudian diteruskan ke mikrokontroler sebagai pengolah data untuk dikonversi menjadi data biner, menentukan nilai threshold, serta menerapkan proses kalibrasi dan algoritma kontrol jalur. Selanjutnya, hasil pengolahan data dikirimkan ke driver motor sebagai pengendali aktuator yang mengatur pergerakan motor DC pada roda kiri dan kanan sesuai dengan posisi jalur yang terdeteksi. Sementara itu, catu daya (power supply) berfungsi menyediakan dan mendistribusikan energi listrik secara teratur ke seluruh komponen sistem, meliputi sensor inframerah, mikrokontroler, dan driver motor, sehingga sistem dapat beroperasi secara terintegrasi dalam menjalankan fungsi robot line follower.

2. Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan dapat dilihat dalam tabel 1 berikut.

TABEL I
KOMPONEN ROBOT

No.	Komponen robot		
	Nama	Spesifikasi	Jumlah
1	Arduino Nano	ATmega328P, tegangan operasi 5 V, 14 pin digital, 8 pin analog	1
2	Sensor	8 sensor inframerah	8
3	Driver Motor	L298N dual H-Bridge	1
4	Motor DC Gearbox	N20	2
5	Baterai	12V/1Ah	1

Tabel I menunjukkan komponen utama robot line follower, yaitu Arduino Nano sebagai pengendali sistem,

sensor IR array 8 channel untuk mendeteksi garis, driver motor L298N untuk mengatur pergerakan motor, dua motor DC sebagai penggerak roda, dan baterai sebagai sumber catu daya. Seluruh komponen bekerja secara terintegrasi untuk mendeteksi jalur dan mengendalikan pergerakan robot secara otomatis.

3. Karakterisasi Sensor

Karakterisasi sensor IR dilakukan untuk mengetahui respons sensor terhadap permukaan garis dan latar belakang. Pengujian dilakukan dengan membaca nilai analog dari delapan sensor IR secara bergantian pada kondisi garis dan background. Data hasil pembacaan digunakan untuk menentukan karakteristik sensor, seperti nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan standar deviasi. Selanjutnya, nilai tersebut digunakan sebagai dasar penentuan fixed threshold untuk mengubah sinyal analog menjadi data biner. Karakterisasi ini bertujuan untuk memastikan sensor mampu membedakan garis dan latar belakang secara konsisten sehingga dapat mendukung pengendalian robot line follower.

4. Metode Kalibrasi

Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan keluaran masing-masing sensor terhadap kondisi aktual lintasan. Prosedur kalibrasi diawali dengan pengambilan data keluaran sensor pada permukaan terang dan permukaan gelap. Nilai minimum dan maksimum yang diperoleh dari masing-masing sensor digunakan sebagai acuan untuk membentuk rentang kerja sensor. Dalam penelitian ini, proses kalibrasi bertujuan untuk mengurangi variasi respons antarsensor sehingga pembacaan yang dihasilkan menjadi lebih konsisten. Apabila digunakan proses normalisasi, nilai keluaran sensor dapat dipetakan ke rentang tertentu agar lebih mudah dibandingkan antar channel sensor.

5. Penentuan Threshold

Threshold ditetapkan sebagai batas pengambilan keputusan untuk membedakan permukaan garis dan permukaan latar. Penentuan threshold dilakukan berdasarkan hasil karakterisasi dan kalibrasi sensor, yaitu dengan memanfaatkan nilai representatif keluaran sensor pada kedua kondisi permukaan. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah menentukan threshold sensor ke-(i) sebagai nilai tengah antara rata-rata pembacaan pada permukaan gelap dan permukaan terang, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$T_i = \frac{S_{gelap,i} + S_{terang,i}}{2}$$

dengan (T_i) menyatakan threshold sensor ke-(i), (S_{gelap,i}) menyatakan rata-rata keluaran sensor ke-(i) pada permukaan gelap, dan (S_{terang,i}) menyatakan rata-rata keluaran sensor ke-(i) pada permukaan terang. Nilai threshold yang diperoleh kemudian digunakan pada tahap pengujian untuk mengevaluasi ketepatan klasifikasi sensor. Jika diperlukan, threshold dapat disesuaikan lebih lanjut berdasarkan hasil pengamatan eksperimental untuk memperoleh performa deteksi yang optimal.

6. Metode Pengujian

Metode pengujian dilakukan dengan menempatkan delapan sensor IR pada permukaan background dan garis secara bergantian dalam kondisi sensor dan robot diam. Data pembacaan nilai analog dan biner dari setiap sensor direkam melalui Serial Monitor Arduino. Pengujian dilakukan menggunakan metode fixed threshold dengan nilai ambang batas yang telah ditentukan, rata-rata threshold dan nilai individual treshold. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membedakan garis dan background, serta mengevaluasi konsistensi hasil pembacaan sensor berdasarkan nilai threshold yang digunakan.

7. Variabel Penelitian

Variable penelitian ditentukan berdasarkan skenario perlakuan penentuan treshold sensor IR. Variabel bebas ditentukan berdasarkan metode treshold yang terdiri dari 3 kondisi yaitu:

a. T0 (Threshold tanpa kalibrasi (nilai default))
b. T1 (Threshold rata-rata (satu nilai untuk semua sensor))
c. T2 (Threshold hasil kalibrasi individu sensor)

Sedangkan variabel bebas ditentukan berdasarkan akurasi deteksi garis sensor. Pada percobaan ini, robot tidak bergerak sehingga akurasi dihitung dari kemampuan sensor mengklasifikasi garis hitam = 1, dan bukan garis (permukaan putih) = 0.

8. Perhitungan Akurasi

Akurasi deteksi garis dihitung dengan membandingkan hasil klasifikasi sensor terhadap kondisi aktual permukaan lintasan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung akurasi adalah sebagai berikut:

$$Akurasi = \frac{Jumlah\ deteksi\ benar}{Jumlah\ seluruh\ pengujian} \times 100\%$$

Pada penelitian ini, deteksi benar didefinisikan sebagai kondisi ketika hasil klasifikasi sensor sesuai dengan keadaan sebenarnya, baik saat sensor berada di atas garis maupun saat berada di atas latar. Nilai akurasi dihitung pada setiap skenario pengujian untuk menilai pengaruh kalibrasi dan penentuan threshold terhadap peningkatan performa sistem. Selain akurasi total, evaluasi juga dapat dilakukan pada masing-masing sensor untuk mengidentifikasi sensor yang memiliki kontribusi kesalahan terbesar.

9. Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui pengaruh metode kalibrasi dan penentuan threshold terhadap tingkat keberhasilan deteksi garis pada sensor infrared delapan channel. Tahap awal analisis dilakukan secara deskriptif dengan menghitung nilai persentase keberhasilan deteksi (*detection accuracy*) pada setiap skenario pengujian. Nilai akurasi diperoleh berdasarkan perbandingan antara jumlah pembacaan sensor yang sesuai dengan kondisi garis sebenarnya terhadap total jumlah pengujian yang dilakukan.

Selanjutnya, dilakukan analisis statistik inferensial menggunakan metode *Kruskal–Wallis Test* sebagai uji nonparametrik untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada tingkat keberhasilan deteksi antara beberapa metode threshold yang diuji. Metode ini dipilih karena data hasil pengujian sensor berbentuk data diskrit/biner, yaitu kondisi berhasil mendeteksi garis (1) dan tidak berhasil mendeteksi garis (0), serta tidak memenuhi asumsi distribusi normal berdasarkan hasil pengujian normalitas.

Pada penelitian ini, metode threshold yang dibandingkan terdiri dari tiga skenario, yaitu threshold default, threshold global, dan threshold individual hasil kalibrasi sensor. Hipotesis pengujian dirumuskan sebagai berikut:

H0: Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada tingkat keberhasilan deteksi garis antara metode threshold yang digunakan.

H1: Terdapat perbedaan yang signifikan pada tingkat keberhasilan deteksi garis antara metode threshold yang digunakan.

Apabila nilai signifikansi (*p-value*) hasil uji Kruskal–Wallis lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05, maka H0 ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa metode kalibrasi dan penentuan threshold memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan sensor dalam mendeteksi garis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

1. Hasil Kalibrasi Sensor

Berdasarkan konfigurasi pengambilan data pada penelitian ini, proses kalibrasi sensor dilakukan dengan menempatkan sensor IR robot pada permukaan putih dan garis hitam untuk mendapatkan nilai minimum dan maksimum dari setiap sensor kemudian berdasarkan data tersebut dapat dihitung berapa nilai threshold pada masing-masing sensor. Proses kalibrasi ini dilakukan selama 10 detik untuk memastikan bahwa semua sensor telah mendapatkan 2 kondisi yang berbeda yaitu berada pada permukaan garis dan latar permukaan.

Pengambilan data threshold dengan memberikan perlakuan langsung pada sensor di atas permukaan putih dan hitam selama 10 detik dapat digunakan untuk memperoleh data pembacaan sensor pada kedua kondisi secara lebih terstruktur. Namun, durasi 10 detik tidak secara otomatis menjamin hasil sempurna. Pengambilan data sensor memperhatikan kestabilan posisi sensor, jarak sensor terhadap permukaan, kondisi pencahayaan, dan perbedaan nilai pembacaan antara permukaan putih dan hitam.

TABEL II
HASIL NILAI TRESHOLD SAAT KALIBRASI

Sensor	Kalibrasi Sensor		
	Permukaan Putih	Permukaan Hitam	Nilai Treshold
S0	644	935	789
S1	481	919	700
S2	478	923	700
S3	305	900	602
S4	299	905	602
S5	164	877	520
S6	400	911	655
S7	502	914	708

Berdasarkan table II hasil kalibrasi sensor sebanyak 8 buah diperlihatkan nilai minimum pada saat sensor berada diatas permukaan putih sedangkan nilai maksimum didapatkan ketika sensor berada pada permukaan garis atau hitam. Nilai threshold didapatkan langsung dari data yang terekam saat proses kalibrasi menggunakan mikrokontroller.

2. Statistik Hasil Pembacaan Analog pada Sensor

Setelah proses kalibrasi sensor, selanjutnya proses pengambilan data sensor dengan melakukan pembacaan garis secara dinamis pada permukaan sensor. Kondisi robot pada saat pengambilan data ini berada dalam keadaan diam, sehingga proses pemberian permukaan garis hitam dilakukan secara manual oleh peneliti dengan kombinasi yang berbeda-beda dengan memastikan bahwa semua sensor mendapatkan garis hitam. Percobaan dilakukan dan direkam secara serial selama 57 detik dan berhasil mendapatkan 570 baris data dari delapan sensor IR. Berdasarkan hasil pengukuran seluruh sensor didapatkan nilai statistic dan threshold pada table III berikut ini.

TABEL III
STATISTIK PEMBACAAN ANALOG SENSOR

Sensor	Min.	Max	Mean	Median	SD	Rentang	Treshold
S0	635	968	730,56	700	78,62	333	789
S1	499	965	595,47	545	120,35	466	700
S2	512	923	589,93	548	104,86	411	700
S3	338	900	430,05	376	144,84	562	602
S4	346	906	430,49	371	150,27	560	602
S5	222	876	332,	255	186,	654	520

			11		35		
S6	456	921	554, 87	494	139, 26	465	655
S7	533	941	636, 64	593	109, 20	408	708

Tabel III menunjukkan bahwa setiap sensor memiliki karakteristik pembacaan analog yang berbeda, baik dari segi nilai minimum, maksimum, rata-rata, median, standar deviasi, maupun rentang pembacaan. Nilai rata-rata tertinggi diperoleh sensor S0 sebesar 730,56, sedangkan nilai rata-rata terendah diperoleh sensor S5 sebesar 332,11.

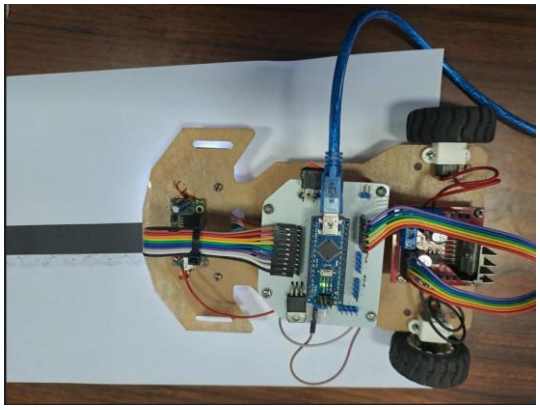
Rentang pembacaan terbesar terdapat pada sensor S5, yaitu 654, dengan nilai minimum 222 dan maksimum 876. Sementara itu, sensor S0 memiliki rentang pembacaan terkecil, yaitu 333. Perbedaan rentang tersebut menunjukkan bahwa perubahan nilai keluaran setiap sensor selama proses pengujian tidak sama. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh respons sensor terhadap permukaan yang diamati dan perubahan sinyal selama proses perekaman.

Berdasarkan parameter standar deviasi, sensor S5 memiliki nilai terbesar, yaitu 186,35, sedangkan sensor S0 memiliki nilai terkecil, yaitu 78,62. Nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi pembacaan sensor S5 lebih besar dibandingkan sensor lainnya, sementara sensor S0 memiliki penyebaran data yang relatif lebih rendah. Namun, variasi pembacaan tersebut tidak dapat langsung digunakan untuk menyimpulkan tingkat akurasi sensor karena data yang dianalisis belum dipisahkan berdasarkan kondisi permukaan putih dan hitam.

Nilai threshold ditentukan secara individual untuk setiap sensor, dengan nilai berkisar antara 520 hingga 789. Sensor S5 memiliki threshold sebesar 520, sedangkan S0 memiliki threshold sebesar 789. Nilai threshold individual digunakan sebagai batas konversi nilai analog menjadi sinyal biner. Hasil statistik ini menjadi dasar untuk menganalisis karakteristik sinyal sensor dan mengevaluasi proses deteksi garis pada tahap pengujian berikutnya.

3. Ujicoba Di atas Lintasan Garis pada Sensor

Lintasan garis yang menjadi pengujian pembacaan sensor ini berupa garis warna hitam dengan lebar 2cm dan berada diatas permukaan warna putih. Pengujian dilakukan dengan memastikan semua sensor mendapatkan garis hitam, sehingga perlu dilakukan pergerakan secara acak pada garis yang tersedia diatas kertas. Metode pengujian dilakukan berdasarkan pasangan sensor yang berdekatan, yaitu S0-S1, S2-S3, S4-S5, dan S6-S7 dengan asumsi dalam satu garis terdapat 2 buah sensor yang terdeteksi. Pengujian berbasis pasangan sensor ini dipilih agar evaluasi kinerja sensor lebih merepresentasikan kondisi operasional robot line follower dibandingkan pengujian satu sensor secara individual.



Gambar 2. Ujicoba Sensor Robot Line Follower

Berdasarkan hasil deskriptif, diperoleh nilai rata-rata keberhasilan deteksi garis pada masing-masing metode threshold sebagai berikut:

Descriptives - Hasil ▼

Metode	N	Mean	SD	SE	Coefficient of variation
0	120	0.000	0.000	0.000	NaN
1	120	0.250	0.435	0.040	1.739
2	120	1.000	0.000	0.000	0.000

Nilai Mean pada variabel Hasil menunjukkan tingkat keberhasilan deteksi karena data dikodekan:

0 = deteksi gagal
1 = deteksi berhasil

Sehingga nilai mean dapat dikonversikan menjadi persentase akurasi:

TABEL IV
AKURASI HASIL PEMBACAAN SENSOR BERDASARKAN TRESHOLD

Metode	**Akurasi**
Default	0%
Global	25%
Individual	100%

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan threshold individual hasil kalibrasi memberikan peningkatan kemampuan deteksi dibandingkan threshold default dan global.

Sedangkan hasil pengujian menggunakan Kruskal–Wallis memperoleh nilai $p<0,05$ sehingga sehingga H0 ditolak dan dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada tingkat keberhasilan deteksi garis berdasarkan metode threshold yang digunakan.

Kruskal-Wallis Test

Factor	Statistic	df	p
Metode	266.686	2	< .001

Untuk analisis Perbandingan Antar Metode (Post Hoc), berdasarkan hasil Dunn Post Hoc Test, seluruh pasangan metode menunjukkan nilai p<0,001 dengan penjelasan table sebagai berikut:

a. Default vs Global

Terdapat perbedaan signifikan antara threshold default dan threshold global. Threshold global meningkatkan kemampuan deteksi dibandingkan nilai threshold awal, meskipun peningkatannya masih terbatas.

b. Default vs Individual

Terdapat perbedaan signifikan antara threshold default dan threshold individual. Metode threshold individual memberikan peningkatan performa paling besar karena nilai ambang disesuaikan berdasarkan karakteristik masing-masing sensor.

c. Global vs Individual

Terdapat perbedaan signifikan antara threshold global dan threshold individual. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan satu nilai threshold untuk seluruh sensor belum mampu mengakomodasi perbedaan karakteristik setiap sensor infrared.

Dunn's Post Hoc Comparisons - Metode

Comparison	z	W_i	W_j	p	P_{bonf}	P_{holm}
0 - 1	−3.922	105.500	150.500	< .001	< .001	< .001
0 - 2	−15.690	105.500	285.500	< .001	< .001	< .001
1 - 2	−11.767	150.500	285.500	< .001	< .001	< .001

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian statistik menggunakan uji Kruskal–Wallis, diperoleh nilai statistik sebesar 266,686 dengan derajat kebebasan (df) sebesar 2 dan nilai signifikansi p < 0,001. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan terhadap tingkat keberhasilan deteksi garis pada tiga metode threshold yang diuji, yaitu threshold default, threshold global, dan threshold individual hasil kalibrasi sensor. Dengan demikian, perubahan metode penentuan threshold terbukti memberikan pengaruh terhadap performa pembacaan sensor infrared dalam mendeteksi garis hitam pada permukaan putih.

Berdasarkan hasil analisis deskriptif, metode threshold default menghasilkan akurasi deteksi sebesar 0%, yang menunjukkan bahwa nilai ambang awal belum mampu mengklasifikasikan garis hitam dan permukaan putih secara tepat akibat adanya perbedaan karakteristik respons ADC antar sensor. Penggunaan threshold global meningkatkan kemampuan deteksi dengan akurasi 25%, tetapi masih memiliki keterbatasan karena seluruh sensor menggunakan satu nilai ambang yang sama meskipun memiliki tingkat sensitivitas berbeda. Sementara itu, metode threshold individual hasil kalibrasi mampu mencapai akurasi 100%, yang menunjukkan bahwa penyesuaian nilai threshold berdasarkan karakteristik masing-masing sensor dapat meningkatkan kestabilan dan ketepatan deteksi garis. Hasil tersebut membuktikan bahwa kalibrasi individual mampu mengatasi variasi respons antar sensor sehingga sistem infrared delapan channel dapat melakukan klasifikasi garis secara lebih optimal.

Hasil pengujian lanjutan menggunakan Dunn Post Hoc Test menunjukkan bahwa seluruh pasangan metode threshold memiliki perbedaan yang signifikan dengan nilai p < 0,001. Perbandingan antara threshold default dan threshold global menunjukkan adanya peningkatan kemampuan deteksi setelah dilakukan penyesuaian nilai threshold. Selanjutnya, perbandingan antara threshold default dan threshold individual menunjukkan perbedaan performa yang lebih besar, karena metode individual mampu meningkatkan akurasi dari 0% menjadi 100%. Selain itu, perbandingan antara threshold global dan threshold individual juga menunjukkan perbedaan signifikan, yang membuktikan bahwa kalibrasi setiap sensor secara individual memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan satu threshold untuk seluruh sensor.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode kalibrasi threshold individual merupakan pendekatan yang paling sesuai untuk sistem sensor infrared pada robot line follower. Penggunaan threshold yang disesuaikan untuk setiap sensor mampu mengatasi perbedaan karakteristik pembacaan antar sensor dan meningkatkan konsistensi deteksi garis. Temuan ini memperlihatkan bahwa sebelum sensor infrared digunakan sebagai sistem navigasi robot line follower, proses kalibrasi individual perlu dilakukan agar setiap sensor memiliki parameter keputusan yang sesuai dengan kondisi lingkungan pengujian.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis statistik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode kalibrasi dan penentuan threshold memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan deteksi garis pada sistem sensor infrared delapan channel. Hasil uji Kruskal–Wallis menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar metode threshold dengan nilai statistik H = 266,686 dan p < 0,001, yang menunjukkan bahwa perubahan metode threshold berpengaruh terhadap tingkat keberhasilan deteksi. Metode threshold default menghasilkan akurasi deteksi sebesar 0%, sedangkan metode threshold global meningkatkan akurasi menjadi 25%. Sementara itu, metode threshold individual hasil kalibrasi masing-masing sensor menghasilkan akurasi tertinggi sebesar 100% pada seluruh skenario pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kalibrasi threshold secara individual mampu mengatasi perbedaan karakteristik respons ADC antar sensor, meningkatkan kestabilan pembacaan, serta menghasilkan klasifikasi garis yang lebih akurat dibandingkan penggunaan threshold default maupun threshold global. Dengan demikian, penerapan kalibrasi individual menjadi pendekatan yang efektif untuk meningkatkan performa

sensor infrared pada sistem robot line follower berbasis delapan sensor.

DAFTAR ACUAN

[1] M. Pakdaman and M. Sanaatiyan, "Design and Implementation of Line Follower Robot," in *2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering*, 2009, vol. 2, pp. 585–590. doi: 10.1109/iccee.2009.43.

[2] A. Bendimrad, A. Amrani, and B. El Amrani, "Design and implementation of line follower and obstacle detection robot," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 160–168, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp160-168.

[3] W. J. Brigido and J. Oliveira, "The line follower robot: a meta-analytic approach," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 11, no. e2744, 2025, doi: 10.7717/peerj-cs.2744.

[4] C. Pradhana, M. Zamzami, and M. Zamzami, "Development of Line Follower and Ultrasonic NodeMCU ESP8266 Motor Shield," in *ICoBITS*, 2026, pp. 607–615. doi: 10.32664/icobits.v1.121.

[5] S. Suhaeb, A. Risal, and A. R. Baharuddin, "High-Precision Object Detection Using 8 Proximity Sensors: Integration of Switching Algorithm and Visual Display," *J. Embed. Syst. Secur. Intell. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 84–93, 2025, doi: 10.59562/jessi.v6i2.8133.

[6] Methunvijay.S, Monesh.R.U, S. S, M. Prasad.V.S, and Dhanush.S, "Self-Adaptive Line Follower Using AML," in *2026 International Conference on Data Science and Business Systems (ICDSBS)*, 2026, vol. 3, pp. 1–6. doi: 10.1109/icdsbs69077.2026.11634911.

[7] S. Patil, A. Wagh, M. Sawant, S. Panda, and A. Bhopale, "Design and implementation of advanced auto calibrating line following sensor for coloured surfaces with a white line," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/icpeices.2016.7853535.

[8] K. Khade, R. Naik, and A. Patil, "Design of all color line follower sensor with auto calibration ability," in *2017 7th International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED)*, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ised.2017.8303912.

[9] C. Nguyen, M.-T. Nguyen, D.-H. Vo, T.-T. Huynh, H.-P. Tran, and D.-T. Nguyen, "A Vision-Based Line-Following Mobile Robot Utilizing Fuzzy Logic Control and Automatic Gamma Correction," *Acta Mech. Autom.*, vol. 20, no. 2, pp. 489–497, 2026, doi: 10.65731/ama/2026-0049.