

Inter Aural Time Difference (ITD) : Optimizing Sound Source Localization through Robot Head Movement

Arif Budiman¹, Ary Ramadhan², Syerlie Annisa³, Angga Elpatsa⁴

¹ Universitas Negeri Padang, arifbudiman@fbs.unp.ac.id, Jl. Prof. Dr. Hamka, Padang, Indonesia

² Universitas Negeri Padang, aryramadhan@fbs.unp.ac.id, Jl. Prof. Dr. Hamka, Padang, Indonesia

³ Universitas Negeri Padang, syerlieannisa@fbs.unp.ac.id, Jl. Prof. Dr. Hamka, Padang, Indonesia

⁴ Universitas Negeri Padang, anggaelpatsa@fbs.unp.ac.id, Jl. Prof. Dr. Hamka, Padang, Indonesia

Informasi Makalah

Submit : November 13, 2023

Revisi : Desember 8, 2023

Diterima : Desember 21, 2023

Kata Kunci :

Inter Aural Time Difference

Lokalisasi

Robotik

Cross correlation

Frekuensi

Abstrak

Metode Inter Aural Time Difference (ITD) dapat diterapkan dalam konteks lokalisasi sumber suara yang terinspirasi oleh prinsip-prinsip mekanisme pendengaran manusia. Robot yang dikembangkan memiliki berbagai potensi aplikasi, seperti di sektor robotik layanan, robot bergerak, dan pengendalian kamera. Metode ITD digunakan untuk mengukur perbedaan waktu kedatangan suara yang diterima oleh dua mikrofon. Sinyal suara yang diterima oleh kedua mikrofon dianalisis melalui teknik cross-correlation, dimana nilai puncak cross-correlation digunakan sebagai parameter untuk mengukur sudut asal sumber suara. Arduino Uno digunakan sebagai komponen utama perancangan robot kemudian dibantu oleh sensor suara serta motor servo. Sumber suara yang digunakan adalah suara beberapa frekuensi dari generator Matlab. Frekuensi suara yang digunakan adalah 300 Hz dengan sudut datangnya sumber suara yang bervariasi antara 5o sampai 170o. Rentang suara yang mampu dibaca oleh robot antara 300 Hz hingga 10,000 Hz sehingga sistem lebih fleksibilitas dalam menangani berbagai situasi dan sumber suara yang karakteristik frekuensinya beragam. Hasil dari Penelitian menemukan bahwa robot mampu mengidentifikasi lokasi asal sumber suara dalam bidang setengah lingkaran (0°-180°) dengan tingkat kesalahan rata-rata sekitar 5,90%. Tingkat keberhasilan penelitian mencapai 94%, menunjukkan efektivitas metode ITD dalam lokalisasi sumber suara. Hal ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam mengoptimalkan robot dalam menemukan dan mengikuti sumber suara dengan akurasi yang tinggi.

Abstract

The Inter Aural Time Difference (ITD) method can be employed for sound source localization and it inspired by the principles of the human auditory system.. The developed robot holds various potential applications, particularly in the fields of service robotics, mobile robots, and camera

Syerlie Annisa,

Email: syerlieannisa@gmail.com

control. The ITD method is utilized to measure the time difference of sound arrival received by two microphones. The sound signals captured by both microphones are analyzed using cross-correlation techniques, with the peak cross-correlation value serving as a parameter to determine the angle of the sound source's origin. During the robot's design phase, the Arduino Uno serves as the primary component, complemented by sound sensors and servo motors. The sound source employed comprises multiple frequencies generated using Matlab. The sound frequency employed is 300 Hz, with the sound source's arrival angle varying from 5° to 170°. The robot can detect sound frequencies ranging from 300 Hz to 10,000 Hz, providing flexibility in handling diverse situations and sound sources with varying frequency characteristics. The research results indicate that the robot can accurately identify the sound source within a semi-circular field (0°-180°) with an average error rate of around 5.90%. The research achieves a success rate of 94%, demonstrating the effectiveness of the ITD method in sound source localization. These findings can serve as a solid foundation for further development to optimize the robot's ability to accurately locate and track sound sources in a high-accuracy manner.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi telah menciptakan beragam jenis robot yang bertujuan untuk mendukung dan mempermudah berbagai aktivitas manusia (Eldardeer et al., 2021). Seiring dengan peningkatan ketergantungan manusia pada teknologi robotik, terdapat tantangan yang semakin kompleks dalam hal antarmuka dan interaksi manusia dengan robot. Hal ini tercermin dalam seringnya terjadinya insiden dan kesulitan dalam berkomunikasi dengan robot, yang kadang-kadang mengarah pada kecelakaan (Rea et al., 2020).

Pengendalian robot secara umum dilakukan melalui operator, perangkat komputer, atau alat kendali jarak jauh (Firasanti & Sucipto, 2019). Oleh karena itu, kebutuhan untuk mengembangkan pendekatan yang memungkinkan robot berinteraksi secara lebih langsung dengan manusia sangat diperlukan (Meyer & Aquino-Junior, 2020). Manusia berkomunikasi melalui pendengaran sehingga mengintegrasikan kemampuan ini ke dalam desain robot merupakan langkah yang menarik (Rachavarapu et al., 2021).

Dalam konteks ini, penelitian ini merancang sebuah robot yang mampu

mendeteksi lokasi sumber suara. Robot ini memiliki bentuk yang menyerupai kepala manusia dan menggunakan mikrofon sebagai "telinga" untuk menangkap suara serta motor servo digunakan untuk menggerakkan kepala robot menuju sumber suara.

Proses pendeteksian sumber suara melibatkan beberapa tahapan, termasuk akuisisi sinyal suara yang kemudian diolah oleh robot sebagai data masukan untuk menggerakkan motor servo. Data yang diterima masih perlu diproses lebih lanjut karena robot belum memiliki informasi mengenai sumber suara mana yang pertama kali terdeteksi (Gutierrez-Parera et al., 2022). Oleh karena itu, perbandingan sinyal suara menjadi langkah selanjutnya. Salah satu metode yang digunakan untuk mengolah sinyal suara adalah metode *Interaural Time Difference* (ITD) (Pan et al., 2020).

Metode ITD adalah pendekatan yang menghitung perbedaan waktu (*delay*) antara sinyal suara yang diterima oleh kedua mikrofon (Otani et al., 2021). Hal ini memungkinkan robot untuk mendeteksi sinyal yang tiba lebih awal dan menggunakannya sebagai masukan untuk menggerakkan motor servo sehingga kepala robot dapat menghadap ke arah sumber suara. Dengan demikian, robot

memiliki kapabilitas untuk mendeteksi suara dalam rentang sudut 360°.

2. Metode Penelitian

2.1 Experimental Research

Penelitian yang dilakukan merupakan *experimental research* (penelitian percobaan). Penelitian jenis ini bertujuan untuk mempelajari sesuatu dengan memvariasikan beberapa kondisi dan mengamati efek yang terjadi (Calis et al., 2021). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan arah datangnya sumber suara pada robot yang ditunjang dengan penjelasan melalui studi literatur dan perancangan sistem sebagai berikut :

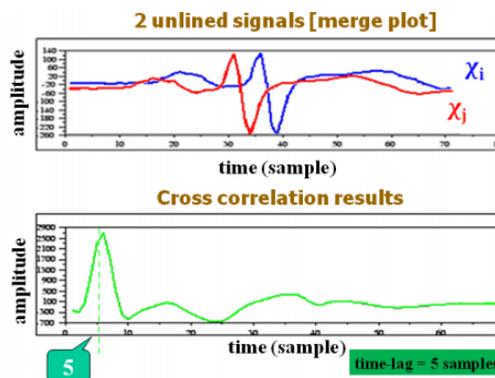
2.1.1 Robot

Robot adalah manipulator multi fungsi dan dapat diprogram ulang yang dirancang untuk menggerakkan material, alat, atau perangkat khusus melalui sejumlah gerakan terprogram untuk melakukan aktifitas tertentu (Hutagalung & Dahriansah, 2019). Penelitian ini menggunakan robot yang dirupai seperti kepala manusia untuk menentukan sumber suara melalui pergerakan kepalanya. Robot tersebut dilengkapi dengan sensor suara yang membantu menerima dan mengukur besar kecilnya suara yang masuk sebelum di proses. Kemudian terdapat motor servo yang membantu pergerakan kepala robot.

2.1.2 Interaural Time Difference

Interaural Time Difference (ITD) merupakan perbedaan waktu kedatangan suara antara kedua telinga yang akan mengidentifikasi lokasi atau asal suara dalam arah dan jarak (Johansson et al., 2022). Pada penelitian ini ITD diterapkan ke dalam dua buah microphone yang akan menggunakan *Cross Correlation* sebagai metodenya (Liaquat et al., 2021). *Cross Correlation* atau korelasi silang adalah sebuah metode untuk menghitung kesamaan antara dua sinyal (Marsalek et al., 2020). *Cross Correlation*

dihitung sebagai fungsi dari time delay dengan menggunakan metode perkalian product yang digeser yang dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Cross Correlation

Cross correlation antara sinyal dan dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Cross correlation} : \sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Dimana x_i adalah sinyal yang diterima oleh microphone kanan (sebagai sinyal referensi), y_i adalah sinyal yang diterima oleh microphone kiri serta \bar{x} dan \bar{y} merupakan rata-rata nilai sinyal microphone kanan dan microphone kiri (Elektro, 2020). Sedangkan N adalah jumlah sample per satuan waktu. Setelah nilai cross correlation didapatkan, selanjutnya dicari nilai perbedaan waktu antara microphone kiri dan kanan (t_{xy}) yang didapat dari persamaan berikut :

$$t_{xy} = \Delta \times \sigma \quad (2)$$

Dimana Δ adalah waktu saat suara disampling ($\Delta = 2.2676 \times 10^{-5}$ s) dan σ adalah parameter geser ($\sigma = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) yang didapat dari pergeseran puncak tertinggi hasil *Cross Correlation* (Schoepe et al., 2022). Hasil cross correlation antara sinyal x_i dan y_i akan menghasilkan ITD (Interaural Time Difference) antara microphone kanan dan microphone kiri. Puncak tertinggi hasil cross correlation antara sinyal x_i terhadap y_i menunjukkan selisih perbedaan waktu sinyal

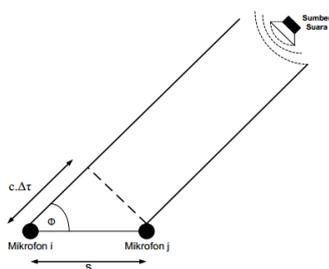
yang diterima oleh microphone kanan dan microphone kiri (Gonzalez-Billandon et al., 2020). Puncak dari hasil *Cross Correlation* akan bergeser kekiri, apabila sinyal y_i mendahului sinyal x_i (sebagai sinyal referensi) dan akan bergeser kekanan apabila sinyal x_i mendahului sinyal y_i . Pergeseran hasil puncak *Cross Correlation* dipengaruhi oleh sinyal referensi (microphone yang berfungsi menangkap sinyal referensi) dan arah lokasi sumber suara (Citation, 2020). Penentuan arah lokasi sumber suara dapat dilihat pada gambar 2, hasil puncak *Cross Correlation* akan berada sebelah kanan saat sinyal referensi yang digunakan sinyal yang ditangkap oleh microphone kanan (sesuai dengan gambar 2). Untuk mengetahui posisi sudut datang arah sumber suara dapat dihitung dengan persamaan:

$$\cos \theta = \left(\frac{c \cdot t_{xy}}{s} \right) \quad (3)$$

Maka sudut lokasi sumber suara :

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{c \cdot t_{xy}}{s} \right) \quad (4)$$

Dimana θ (theta) adalah sudut lokasi sumber suara, c adalah kecepatan suara diudara yang didapat dari persamaan 1, s adalah jarak antara 2 buah microphone dan t_{xy} adalah selisih perbedaan waktu yang diterima oleh masing-masing microphone (Rusli et al., 2018). Nilai t_{xy} diperoleh dari hasil puncak tertinggi *Cross Correlation*.

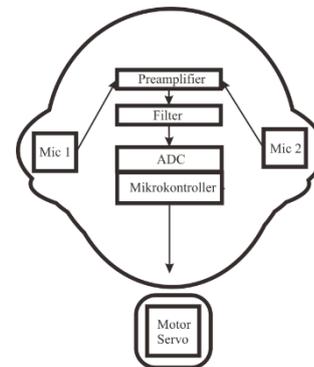


Gambar 2. Geometri Posisi Sumber Suara

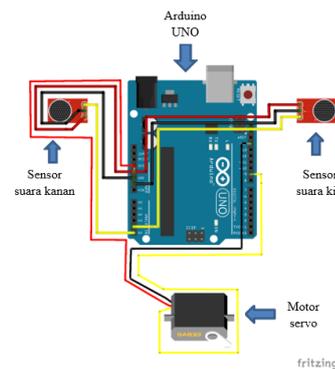
2.1.3 Rancangan Sistem

Rancangan sistem dimulai dari perancangan perangkat keras dengan mendesain bentuk

robot, perakitan kepala robot serta perancangan elektronika robot yang terdiri dari rangkaian mikrokontroler, motor servo dan dua buah microphone dengan diagram blok sistem pada gambar 3 dan rangkaian komponen perancangan sistem pada gambar 4.

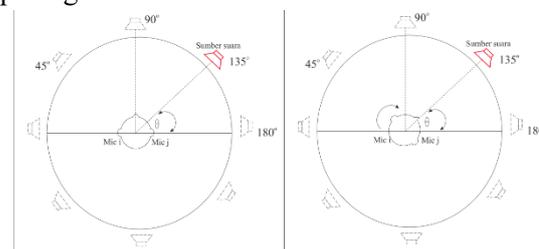


Gambar 3. Diagram Blok Sistem



Gambar 4. Perancangan rangkaian komponen

Secara mekanik, pergerakan kepala robot yang mengikuti sumber suara dapat dilihat pada gambar 5 berikut.



Gambar 5. Mekanik sistem kerja kepala robot

2.1.4 Kebutuhan Sistem

Alat penelitian yang dibutuhkan dalam penelitian ini berupa hardware dan software sebagai berikut :

- a. Hardware

PC/ Laptop, Arduino Uno, Sensor suara (microphone), Motor servo, Amplifier, Filter, Kepala Sintesis

- b. Software
Arduino IDE, Matlab

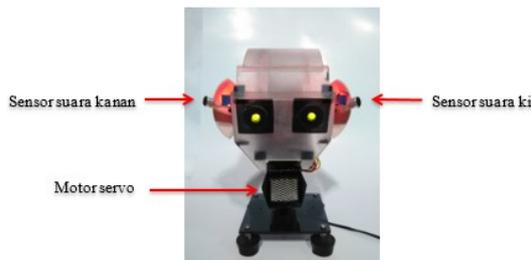
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Implementasi Sistem

Implementasi sistem mencakup keseluruhan sistem diantaranya implementasi perangkat keras dan implementasi perangkat lunak. Implementasi perangkat keras dilakukan untuk mengetahui antar komponen sistem saling terhubung dan memeriksa elemen-elemen sistem telah berjalan sesuai dengan fungsi yang diharapkan (Semnas & Ft Unila, 2018). Sedangkan pada tahap implementasi perangkat lunak, dirancang sebuah program yang dapat menerima, memproses dan mengeluarkan hasil data dengan baik dan sesuai dengan tujuan pembuatan sistem.

3.1.1 Implementasi Perangkat Keras

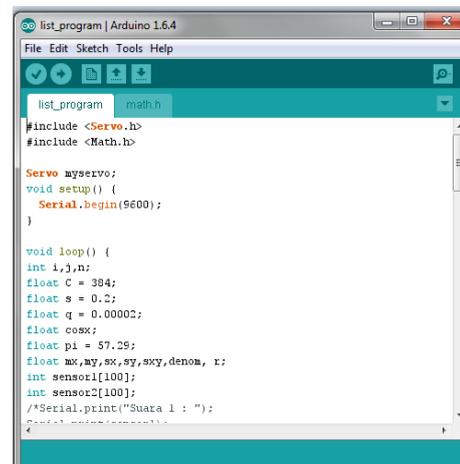
Implementasi perangkat keras merupakan proses perancangan komponen-komponen kepala robot yang sesuai dengan rancangan awal (Hujja, 2021). Kepala robot dirancang dengan menggunakan papan akrilik sebagai kerangka untuk meletakkan rangkaian dari komponen-komponen yang diperlukan. Papan akrilik disusun rapi dan dirancang menyerupai kepala manusia. Hasil dari perancangan kepala robot dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Tampak depan kepala robot

3.1.2 Implementasi Perangkat Lunak

Implementasi perangkat lunak merupakan proses pengkodean dari flowchart pada proses perancangan untuk menjalankan sistem dengan baik (Gutierrez-Parera et al., 2022). Pengkodean dilakukan pada mikrokontroler dengan menggunakan Arduino IDE untuk memproses data suara yang masuk dari kedua sensor suara untuk menghasilkan sudut yang akan menggerakkan motor servo (Muis & Thirafi, 2020). Tampilan aplikasi arduino dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Tampilan aplikasi Arduino IDE

3.2 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan 5 metode pengujian yang akan dijabarkan sebagai berikut :

3.2.1 Pengujian kalibrasi nilai ADC sensor

Untuk mengukur nilai ADC sensor, dilakukan dengan memberi tegangan input pada arduino uno dan menggunakan program untuk mengukur nilai ADC, sehingga nilai ADC sensor akan ditampilkan pada serial monitor (Wiener, 2021). Tegangan keluaran sensor suara kanan pada multimeter digital berkisar dari 2,39 V sampai 2,45 V dengan tegangan referensi 5 V. Sedangkan, pada sensor suara kiri, tegangan keluaran berkisar dari 2,07 V sampai 2,10 V saat mendengar suara, seperti tabel dibawah :

Tabel 1. Pengujian nilai ADC sensor suara kanan

No	V out (sensor)	V ref	Out ADC (serial monitor)	Out ADC manual (perhitungan)	Error (%)
1	2,455	5	505	502,29	0,54
2	2,394	5	496	489,81	1,26
3	2,397	5	495	490,42	0,93
4	2,495	5	511	510,47	0,10
5	2,394	5	487	489,81	0,57
6	2,395	5	475	493,49	3,75
7	2,396	5	450	490,22	8,20
8	2,397	5	471	490,42	3,96
9	2,397	5	480	490,42	2,12
10	2,395	5	471	493,49	4,56
11	2,396	5	494	490,22	0,77
12	2,396	5	502	490,22	2,40
13	2,397	5	467	490,42	4,78
14	2,397	5	484	490,42	1,31
15	2,394	5	480	489,81	2,00
16	2,396	5	462	490,22	5,76
17	2,395	5	506	493,49	2,54
18	2,395	5	516	493,49	4,56
19	2,394	5	495	489,81	1,06
20	2,395	5	498	493,49	0,91
Total Error Rata-Rata					2,60

Tabel 2. Pengujian nilai ADC sensor suara kiri

No	V out (sensor)	V ref	Out ADC (serial monitor)	Out ADC manual (perhitungan)	Error (%)
1	2,410	5	512	493,08	3,84
2	2,408	5	493	492,67	0,07
3	2,409	5	509	492,88	3,27
4	2,407	5	490	492,47	0,50
5	2,409	5	508	492,88	3,07
6	2,408	5	494	492,67	0,27
7	2,410	5	517	493,08	4,85
8	2,407	5	480	492,47	2,53
9	2,410	5	536	493,08	8,70
10	2,408	5	493	492,67	0,07
11	2,410	5	521	493,08	5,66
12	2,409	5	496	492,88	0,63
13	2,409	5	506	492,88	2,66
14	2,407	5	486	492,47	1,31

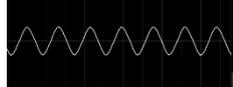
No	V out (sensor)	V ref	Out ADC (serial monitor)	Out ADC manual (perhitungan)	Error (%)
15	2,409	5	510	492,88	3,47
16	2,407	5	489	492,47	0,70
17	2,407	5	463	492,47	5,98
18	2,408	5	485	492,67	1,56
19	2,407	5	475	492,47	3,55
20	2,409	5	493	492,88	0,02
Total Error Rata-Rata					2,64

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan sebanyak 20 kali tersebut, didapat bahwa persentase error rata-rata pada sensor suara kanan 2,60%, sedangkan persentase error rata-rata pada sensor suara kiri sebesar 2,64%. Hal itu membuktikan, bahwa sensor suara 97% berfungsi dengan baik.

3.2.2 Pengujian Jenis Sumber Suara

Pengujian untuk menentukan jenis sumber suara yang mampu diterima baik oleh robot dilakukan dengan suara manusia, suara sirine ambulans, suara siulan orang dewasa dan frekuensi generator dari Matlab yang dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Pengujian jenis sumber suara

No	Sumber suara	Respon pergerakan robot	Gambar grafik
1	Suara manusia	Lambat	
2	Sirine ambulans	Sedang	
3	Siulan dewasa	Cepat	
4	Frekuensi generator Matlab	Cepat	

Berdasarkan pengujian empat jenis sumber suara tersebut, diambil kesimpulan bahwa suara yang cocok digunakan untuk pengujian robot adalah suara frekuensi generator dari

Matlab karena robot merespon dengan cepat dan grafik sinyalnya selalu stabil.

3.2.3 Pengujian Frekuensi Sumber Suara

Pengujian frekuensi sumber suara dilakukan untuk mengetahui frekuensi berapa saja yang mampu diterima oleh robot. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan rentang frekuensi yang berbeda-beda. Rincian pengujian terdapat pada tabel 4.

Tabel 4. Pengujian frekuensi sumber suara

No	Rentang Frekuensi	Respon
1	1Hz-200Hz	Tdk ada
2	200Hz-1000Hz	Ada
3	1000Hz-1500Hz	Ada
4	1500Hz-2000Hz	Ada
5	2000Hz-2500Hz	Ada
6	2500Hz-3000Hz	Ada
7	3000Hz-5000Hz	Ada
8	5000Hz-10000Hz	Ada
9	10000Hz-15000Hz	Tdk ada
10	15000Hz-20000Hz	Tdk ada

Berdasarkan tabel 3, dapat dilihat respon robot saat menerima berbagai macam frekuensi. Frekuensi suara yang digunakan merupakan hasil generated dari aplikasi Matlab. Frekuensi sumber suara yang mampu diterima robot antara 200 Hz sampai 10000 Hz karena pada saat diberikan frekuensi tersebut, robot merespon dan berputar ke arah sumber suara.

3.2.4 Pengujian jarak suara yang mampu diterima sensor

Pengujian jarak sensor ke sumber suara dilakukan untuk mengetahui sampai mana sensor suara dapat menerima sinyal suara. Pengujian ini dilakukan pada masing-masing sensor suara kiri dan kanan. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak dari

sensor suara dengan sumber suara. Sumber suara yang digunakan memiliki frekuensi 300 Hz dan hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Pengujian jarak yang mampu diterima sensor suara kanan

No	Frekuensi suara (Hz)	Jarak sensor suara ke sumber suara (cm)	Rata-Rata ADC
1	0	0	487,28
2	300	5	487,66
3	300	10	487,5
4	300	20	487,46
5	300	30	487,33
6	300	50	487,3
7	300	100	487,34
8	300	150	487,28

Tabel 6. Pengujian jarak yang mampu diterima sensor suara kiri

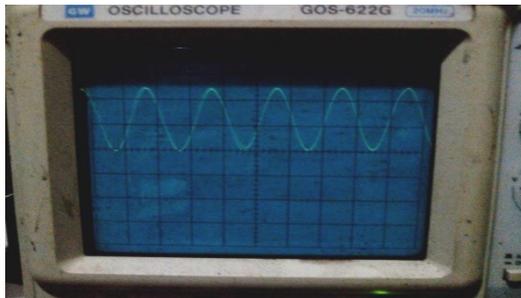
No	Frekuensi suara	Jarak sensor suara ke sumber suara (cm)	Rata-Rata ADC
1	0	0	486,05
2	300	5	487,64
3	300	10	487,56
4	300	20	487,42
5	300	30	487,53
6	300	50	486,43
7	300	100	486,13
8	300	150	486,19

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 5, jarak maksimum sumber suara yang mampu ditangkap sensor suara kanan adalah 150 cm. Hal itu dapat dilihat pada saat jarak sumber suara 150 cm, gambar grafik dan rata-rata adcnya mendekati nilai pada saat tidak ada suara. Begitupun halnya dengan hasil pengujian sensor suara kiri pada tabel 6. Jarak maksimum sumber suara yang mampu ditangkap sensor suara kiri juga 150 cm. Tetapi, jarak ideal yang mampu menggerakkan robot mengarah ke sumber suara adalah dari 0 cm sampai 20 cm. Karena

pada jarak 150 cm, nilai ADC tidak selalu berubah sedangkan pada jarak 0 cm sampai 20 cm, nilai ADC selalu berubah-ubah, sehingga dapat diperoleh nilai *Cross Correlation*. Semakin besar perubahan nilai ADC menunjukkan sumber suara diterima dengan baik.

3.2.5 Pengujian mekanik robot

Pengujian mekanik robot ini dilakukan dengan menggunakan frekuensi generator yaitu osiloskop untuk membangkitkan sinyal 300 Hz sebagai sumber suara yang dihubungkan ke speaker. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan sudut datangnya sumber suara berbeda-beda.



Gambar 8. Sinyal frekuensi 300 Hz pada osiloskop

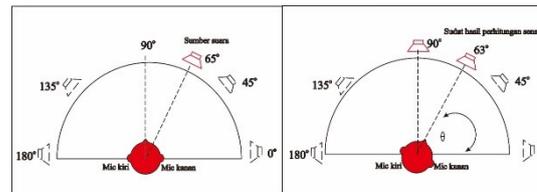
Tabel 7. Pengujian perputaran kepala robot secara mekanik

No	Sudut datangnya sumber suara (°)	Sudut perputaran kepala robot (°)	Error (%)
1	5	18	260
2	25	25	0
3	45	50	11,11
4	65	68	4,62
5	80	75	6,25
6	90	87	3,33
7	100	107	7
8	125	132	5,60
9	150	145	3,33
10	170	163	4,12
Error Rata-Rata			30,54

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 7, dapat dilihat bahwa persentase error rata-rata pada saat pembacaan sudut datangnya sumber suara masih cukup besar. Error rata-rata yang didapat dari 10 kali pengujian adalah 30,54%. Hal ini karena perbedaan sensitifitas dari kedua microphone.

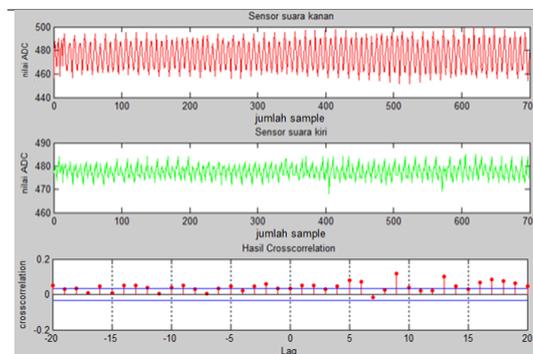
3.2.6 Pengujian Metode *Interaural Time Diffence* (ITD)

Pengujian metode *interaural time difference* bertujuan untuk mengetahui keberhasilan robot dalam menemukan lokasi sumber suara. Metode *interaural time difference* adalah metode yang membandingkan waktu kedatangan sumber suara pada dua buah sensor suara. Pengujian metode ini dilakukan sebanyak 10 kali dengan arah sudut datangnya sumber suara berbeda-beda.



Gambar 9. Hasil pengujian pergerakan kepala robot pada sumber suara 65°

Gambar 9, merupakan pengujian dengan meletakkan sumber suara pada sudut 65°. Hasil yang diperoleh, kepala robot bergerak ke arah 63°. Derajat sudut yang digunakan untuk pengujian merupakan derajat sudut pada motor servo.



Gambar 10. Grafik sinyal suara dan hasil *Cross Correlation*

Gambar 10 merupakan gambar yang ditangkap sensor suara pada saat sumber suara

berasal dari sudut 65°. Dari gambar dapat dilihat perbandingan sinyal suara yang didapat sensor suara kanan dan sensor suara kiri. Gambar dengan grafik warna merah adalah gambar sinyal yang ditangkap sensor suara kanan sedangkan gambar dengan grafik hijau merupakan gambar yang ditangkap sensor suara kiri. Gambar ketiga merupakan hasil dari *Cross Correlation* antara kedua sinyal. Pada gambar 10 tentang *Cross Correlation*, terlihat perbedaan waktu antara kedua sinyal.

Nilai *cross correlation* digunakan untuk mendapatkan besar sudut. Besar sudut perputaran kepala robot diperoleh berdasarkan perhitungan berikut :

Diketahui :

1. $C_{udara} = 384 \text{ m/s}$, (Cepat rambat suara di udara).
2. $s = 0,15 \text{ m}$, (Jarak antara kedua *microphone*)
3. $\Delta / \text{delta} = 2.2676 \times 10^{-5} \text{ s} = 0,00002 \text{ s}$, (Durasi penyamplingan suara)
4. $\sigma / \text{sigma} = 9$, (Pergeseran puncak tertinggi hasil *cross correlation* setelah dilakukan proses sampling saat sudut 65° yang bernilai 9.)
5. $t_{xy} = \Delta \times \sigma$, (Perbedaan waktu antara microphone kiri dan kanan).

Jawab :

$$\cos \theta = \left(\frac{c \cdot t_{xy}}{s} \right)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{c \cdot t_{xy}}{s} \right)$$

$$\cos \Theta = \frac{384 \times (9 \times 0,00002)}{0,15}$$

$$= 0,4608$$

$$\Theta = \cos^{-1} 0,4608$$

$$= 1,0918 \times 57,29 \left(\frac{180}{\pi}, \text{ nilai untuk menentukan sudut} \right) = 62,55^\circ$$

Tabel 8. Pengujian metode Interaural Time Difference

No	Sudut datangnya sumber suara	Sudut hasil pengukuran manual pada motor servo	Sudut perhitungan serial monitor	Perhitungan <i>Cross Correlation</i> serial monitor	Error sudut (%)	Waktu (detik)
1	5	20	23	18	15,00	2,95
2	25	25	29	17	16,00	2,73
3	45	56	59	10	5,36	2,78
4	65	60	63	9	5,00	2,61
5	80	65	66	8	1,54	2,53
6	90	80	78	4	2,50	1,87
7	100	115	111	7	3,48	2,67
8	125	130	124	11	4,62	3,13
9	150	137	132	13	3,65	3,09
10	170	160	157	18	1,88	3,25
Rata-Rata					5,90	2,67

Pada Tabel 8, dapat dilihat bahwa persentase error dalam pembacaan sudut datangnya sumber suara masih cukup besar. Error rata-rata pembacaan sudut sebesar 5,90%, sedangkan rata-rata waktu yang diperlukan robot bergerak ke sumber suara sebesar 2,67 detik. Besarnya persentase error rata-rata pembacaan sudut dipengaruhi oleh tingkat sensitifitas dari kedua sensor suara yang berbeda. Hal ini dapat dilihat pada saat sudut datangnya sumber suara 90°, robot bergerak ke arah sudut 78° dan ketika sumber suara datang dari arah 170°, robot bergerak ke sudut 157°.

4. Simpulan

Kemampuan prototype kepala robot dalam menangkap sinyal suara sudah cukup bagus dengan persentase error rata-rata pembacaan sudut sebesar 5,90% dengan tingkat keberhasilan rata-rata sebesar 94% yang dikuatkan dengan persentase fungsi sensor

suara baik sebesar 97% dengan persentase error rata-rata sensor suara kanan 2,60% dan sensor suara kiri sebesar 2,64% pada saat diberi suara dengan frekuensi 1894 Hz. Kemudian besar nilai frekuensi yang dapat diterima sensor suara adalah dari 300 Hz sampai 10000 Hz dan jarak ideal sensor suara berfungsi dengan baik adalah dari 0 cm sampai 20 cm dari kepala sensor suara dengan jarak maksimal penerimaan suara 150 cm.

5. Referensi

- Calis, M., Van De Par, S., Heusdens, R., & Hendriks, R. C. (2021). Localization Based On Enhanced Low Frequency Interaural Level Difference. *Ieee/Acm Transactions On Audio Speech And Language Processing*, 29, 3025–3039. <https://doi.org/10.1109/Taslp.2021.3111583>
- Citation, O. (2020). *Development Of A Perceptual Model For The Trade-Off Between Interaural Time And Level Differences For The Prediction Of Auditory Image Position*.
- Eldardeer, O., Sciutti, A., Tata, M. S., Rea, F., & Tata, M. (2021). Auditory Perception For Interactive Robots: A Cognitive Framework To Include Motor Commands And Working Memory In The Process Of Auditory Sound. In *Researchgate.Net* (Vol. 1, Issue 1). Association For Computing Machinery. https://www.researchgate.net/profile/Omar-Eldardeer-2/publication/356253294_Auditory_Perception_For_Interactive_Robots_A_Cognitive_Framework_To_Include_Motor_Commands_And_Working_Memory_In_The_Process_Of_Auditory_Sound_Localization/links/61937ba93068c54fa
- Elektro, D. T. (2020). *Lokalisasi Suara Pada Unmanned Aerial Vehicle Dengan Metode Interaural Time Difference Menggunakan Mikrokontroler Stm32f429*.
- Firasanti, A., & Sucipto, P. W. A. (2019). Penentuan Lokasi Sumber Suara Menggunakan Directional Microphone Array. *Telka - Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi Dan Kontrol*, 5(1), 65–73. <https://doi.org/10.15575/Telka.V5n1.65-73>
- Gonzalez-Billandon, J., Grasse, L., Tata, M., Sciutti, A., & Rea, F. (2020). *Self-Supervised Reinforcement Learning For Speaker Localisation With The Icube Humanoid Robot*. <http://arxiv.org/abs/2011.06544>
- Gutierrez-Parera, P., Lopez, J. J., Mora-Merchan, J. M., & Larios, D. F. (2022). Interaural Time Difference Individualization In Hrtf By Scaling Through Anthropometric Parameters. *Eurasip Journal On Audio, Speech, And Music Processing*, 2022(1). <https://doi.org/10.1186/S13636-022-00241-Y>
- Hujja, R. M. (2021). *Pengaruh Penempatan Posisi Multi-Mikrofon Dengan Sound Source Localization Terhadap Signal To Noise Ratio Harwanto Zidqi Putro, Roghib Muhammad Hujja, S.Si., M.Cs.* 68–70.
- Hutagalung, J. E., & Dahriansah. (2019). Sistem Pengendali Robot Pemotong Rumput Dengan Perintah Suara Berbasis Android. *Satin –Sains Dan Teknologi Informasi*, 5(1), 102–109. <http://jurnal.stmik-amik-riau.ac.id>
- Johansson, J., Mäkiavirta, A., Malinen, M., & Saari, V. (2022). Interaural Time Difference Prediction Using Anthropometric Interaural Distance. *Aes: Journal Of The Audio Engineering Society*, 70(10), 843–857. <https://doi.org/10.17743/Jaes.2022.0038>
- Liaquat, M. U., Munawar, H. S., Rahman, A., Qadir, Z., Kouzani, A. Z., & Mahmud, M. A. P. (2021). Sound Localization For Ad-Hoc Microphone Arrays. *Energies*, 14(12), 1–27. <https://doi.org/10.3390/En14123446>
- Marsalek, P., Sanda, P., & Bures, Z. (2020). *On The Precision Of Neural Computation With Interaural Time Differences In The Medial Superior Olive*. 1–16.

- [Http://Arxiv.Org/Abs/2007.00524](http://Arxiv.Org/Abs/2007.00524)
- Meyer, T. S. B., & Aquino-Junior, P. T. (2020). *Analysis Of Sound Source Localization And Tracking For The @Home Service Robot In Multiple Distances*. *January 2020*, 6–10. <https://doi.org/10.29327/118637.1-2>
- Muis, A., & Thirafi, M. I. (2020). Rancang Bangun Robot Pembersih Lantai Dengan Sensor Suara. *Sinusoida*, 22(4), 54–64.
- Otani, M., Hirahara, T., & Morikawa, D. (2021). Origin Of Frequency Dependence Of Interaural Time Difference. *Acoustical Science And Technology*, 42(4), 181–192. <https://doi.org/10.1250/Ast.42.181>
- Pan, Z., Zhang, M., Wu, J., & Li, H. (2020). *Multi-Tones' Phase Coding (Mtpc) Of Interaural Time Difference By Spiking Neural Network*. 14(8), 1–13. [Http://Arxiv.Org/Abs/2007.03274](http://Arxiv.Org/Abs/2007.03274)
- Rachavarapu, K. K., Aakanksha, Sundaresha, V., & Rajagopalan, A. N. (2021). Localize To Binauralize: Audio Spatialization From Visual Sound Source Localization. *Proceedings Of The Ieee International Conference On Computer Vision*, 1910–1919. <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00194>
- Rea, F., Kothig, A., Grasse, L., & Tata, M. (2020). Speech Envelope Dynamics For Noise-Robust Auditory Scene Analysis In Robotics. *International Journal Of Humanoid Robotics*, 17(6), 1–18. <https://doi.org/10.1142/S0219843620500231>
- Rusli, M., Silman, H., & Son, L. (2018). *Sound Source Position Estimation By Four Microphones Array For Machine Condition Monitoring*. 222–230.
- Schoepe, T., Gutierrez-Galan, D., Dominguez-Morales, J. P., Greatorex, H., Jimenez-Fernandez, A., Linares-Barranco, A., & Chicca, E. (2022). *Event-Based Sound Source Localization In Neuromorphic Event-Based Sound Source Localization In Neuromorphic Systems* *Ieee Transactions On Neural Networks And Learning Systems* 1 *Event-Based Sound Source Localization In Neuromorphic Systems*. 0–13. <https://doi.org/10.36227/Techrxiv.21493290.V1>
- Semnas, P., & Ft Unila, S. (2018). *Penentuan Sudut Datang Sumber Suara Menggunakan Directional Microphone Array*. 1(1), 2655–2914.
- Wiener, F. (2021). *Kata Kunci — Multi-Mikrofon, Ssl, Snr, Tdoa, Gcc-Phat, Filter Wiener*.