

PREDIKSI ARAH SUMBER SUARA UNTUK PERAWATAN PREDIKTIF

Meifal Rusli, Jhon Malta, dan Irsyad

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang 25163
Sumatera Barat, Indonesia
Telp: 0751-72586, FAX: 0751-72566, E-mail: meifal@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Teknologi perawatan prediktif untuk mesin dan peralatan mekanik di industri terus mengalami perkembangan. Salah satu aplikasinya adalah penggunaan sensor getaran untuk mendeteksi kerusakan di setiap elemen mesin yang dimonitor. Dalam kondisi tertentu, metode ini membutuhkan biaya yang cukup besar untuk penyediaan sensor dalam memenuhi semua keperluan tersebut. Untuk itu perawatan prediktif berbasis sinyal suara mulai dikembangkan. Pengembangan dilakukan dengan mendeteksi jenis dan posisi kerusakan pada mesin. Pada umumnya mesin yang mengalami kerusakan akan membangkitkan sinyal getaran dan suara dalam bentuk sinyal impuls dan harmonik, tergantung kepada jenis kerusakan yang dialami.

Pada penelitian ini dilakukan prediksi arah sumber suara impuls dan sinusoidal yang menjadi model sederhana sumber kerusakan mesin. Sumber suara yang diamati merupakan sumber suara buatan yang berasal dari sebuah speaker. Arah sumber suara dapat diketahui dengan menggunakan sepasang mikrofon melalui perbedaan waktu yang dibutuhkan oleh sinyal suara untuk sampai pada kedua mikrofon (Time Difference Of Arrival Estimation). Sinyal suara dalam domain waktu dan korelasi silang dari masing-masing sinyal yang ditangkap oleh mikrofon menunjukkan nilai TDOA dan dapat dijadikan acuan untuk menentukan posisi sumber suara. Pergeseran puncak dari korelasi silang dipengaruhi oleh perbedaan jarak sumber suara dengan kedua mikrofon yang dianggap berada pada sebuah bidang. Hasil yang diperoleh menunjukkan posisi mikrofon yang paling baik untuk menentukan posisi sumber suara adalah pada selang -60 sampai dengan 60 derajat dari hadapan kedua mikrofon yang dipasang paralel, sedangkan untuk menentukan posisi sumber suara sinusoidal dipengaruhi oleh frekuensi sumber suara.

Keywords: perawatan prediktif, estimasi TDOA, Time Delay Estimation

1. Pendahuluan

Setiap komponen mesin yang berputar dapat membangkitkan getaran dan suara pada frekuensi dan level tertentu. Ketika salah satu komponen dari mesin tersebut mengalami kerusakan, kerusakan akan membangkitkan getaran dan suara dengan sinyal yang khas. Pada umumnya suara yang ditimbulkan adalah dalam bentuk impuls dan harmonik. Dalam perawatan mesin pendeteksian dengan melakukan pembongkaran pada mesin akan membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang cukup besar. Oleh karena itu dibutuhkan metode pendeteksian tanpa harus menghentikan operasi mesin yang lebih dikenal dengan perawatan prediktif.

Salah satu metode perawatan prediktif yang berkembang saat ini adalah penggunaan akselerometer untuk mendeteksi kerusakan melalui sinyal getaran.

Penggunaan metode ini menjadi sulit jika pendeteksian dilakukan di daerah yang berbahaya, dan membutuhkan banyak akselerometer untuk mengukur getaran pada setiap objek yang diamati. Untuk itu dalam penelitian ini, penggunaan sinyal suara untuk mendeteksi kerusakan pada mesin dilakukan. Untuk menentukan arah sumber suara, metode yang dikembangkan dengan memanfaatkan Perbedaan waktu kedatangan sinyal suara pada sepasang mikrofon (Time Difference Of Arrival - TDOA) [1,2,3].

Perbedaan waktu sinyal suara yang diterima oleh sepasang mikrofon dapat dijadikan acuan untuk menentukan arah sumber suara dari kedua mikrofon yang dipasang sejajar. Analisis TDOA pada penelitian ini dilakukan untuk menentukan posisi sumber suara impuls dan sumber suara harmonik.



2. Sinyal Suara

Suara adalah fenomena fisik yang diakibatkan oleh getaran benda. Suara dapat merambat di udara disebabkan terjadinya perubahan tekanan di udara dan sekitarnya. Fenomena terjadinya suara sangat erat kaitannya dengan frekuensi, amplitudo dan kecepatan rambat suara di udara. Kecepatan udara yang merambat melalui udara dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [2] :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}} \quad (2.1)$$

Dimana T adalah temperature udara ($^{\circ}\text{K}$), g adalah berat molekul udara (kg/mol), yaitu sebesar $2.88 \cdot 10^{-2}$ kg/mol. $R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{kg}$ dan γ adalah konstanta ($\gamma = 1.4$). Pada temperature ruangan 27°C kecepatan suara di udara adalah sebesar 347 m/s.

Waktu yang dibutuhkan suara untuk sampai pada sebuah sensor penerima dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\tau_{ik} = c^{-1}D(r_i - m_k) = c^{-1} \|r_i - m_k\| \quad (2.2)$$

Dimana r_i adalah posisi sumber suara, m_k adalah posisi sensor penerima dan c adalah kecepatan rambat suara di udara. Pada kasus sederhana sinyal suara dapat dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$x_k(t) = s(t - \tau_{ik}) + w_k(t) \quad (2.3)$$

Dimana $x_k(t)$ adalah sinyal yang diterima oleh suatu sensor penerima, $s(t - \tau_{ik})$ adalah sinyal dari sumber, suara dan $w_k(t)$ adalah noise.

2.2 Estimasi waktu tunda (*Time Delay Estimation*)

Lokalisasi sumber suara dapat dilakukan dengan menghitung waktu keterlambatan sinyal untuk sampai pada suatu titik (*Time Delay Estimation – TDE*). Sumber suara diasumsikan sebagai sebuah titik dalam suatu ruang atau bidang. Arah sumber suara dihitung melalui perbedaan waktu antara sinyal suara yang diterima oleh dua atau beberapa mikrofon yang terletak pada jarak berbeda terhadap sumber suara. Salah satu metoda yang paling sering digunakan adalah *TDOA estimation*.

2.1.1 Estimasi TDOA

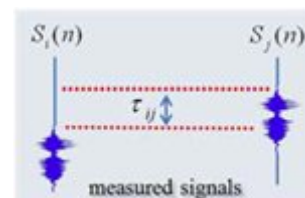
Sumber suara dapat ditentukan arahnya dengan menggunakan dua buah mikrofon. Yaitu dengan memanfaatkan perbedaan waktu yang dibutuhkan sinyal suara untuk sampai pada masing-masing mikrofon.

Metoda ini dikenal dengan *Time Difference Of Arrival (TDOA)* [2]. Apabila dua buah mikrofon memiliki jarak yang berbeda terhadap sumber suara, maka kedua mikrofon tersebut akan menerima sinyal suara dengan waktu yang berbeda. Dalam hal ini salah satu mikrofon dianggap sebagai referensi. Perbedaan waktu yang terjadi bisa bernilai positif dan bernilai negatif tergantung kepada arah dari sumber suara.

Untuk menentukan perbedaan waktu tersebut maka diperlukan koherensi dari kedua sinyal tersebut. Koherensi yang paling umum digunakan adalah korelasi silang dari kedua sinyal yang diterima oleh masing-masing mikrofon [1]. Korelasi tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

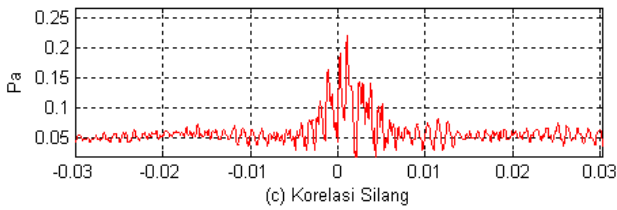
$$R_{ij}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x_i(n) x_j(n - \tau) \quad (2.4)$$

Dimana $x_i(n)$ adalah sinyal yang diterima oleh mikrofon i dengan n detik waktu sampai, dan $x_j(n - \tau)$ adalah sinyal yang diterima oleh mikrofon j. Sinyal suara yang sampai pada masing-masing mikrofon akan tertinggal selama τ detik. Dalam hal ini mikrofon i dianggap sebagai referensi. Sedangkan mikrofon j akan tertinggal atau lebih cepat menerima sinyal suara. Gambar 1 menunjukkan model sinyal yang diterima oleh masing-masing mikrofon.



Gambar 1. Selisih waktu sinyal yang diterima mikrofon [4].

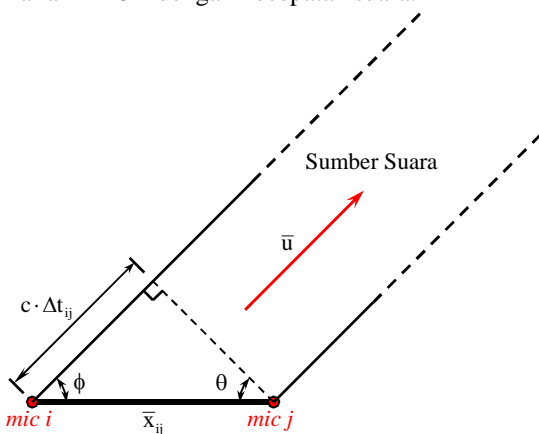
Puncak dari korelasi silang menunjukkan perbedaan waktu dari kedua sinyal (*TDOA*) [2]. Puncak korelasi silang akan bergeser ke kanan atau ke kiri sebesar perbedaan waktu tersebut yang di pengaruhi oleh arah dari sumber suara. Gambar 1 menunjukkan sinyal yang diterima oleh dua buah mikrofon. τ_{ij} adalah selisih waktu kedua kedua sinyal. Apabila mikrofon kedua dijadikan sebagai referensi maka perbedaan waktu dari kedua sinyal akan bernilai positif. Nilai positif menandakan bahwa mikrofon kedua terletak pada jarak yang lebih dekat terhadap sumber suara. Pada Gambar 2 dapat terlihat pergeseran puncak korelasi silang yang sekaligus menunjukkan nilai dari *TDOA*.



Gambar 2. Pergeseran waktu yang menunjukkan nilai TDOA

2.1.2 Estimasi Posisi Sumber Suara

Estimasi posisi dilakukan setelah estimasi TDOA, yaitu dengan menghitung geometri dari posisi masing-masing mikrofon terhadap posisi sumber suara. Salah satu cara yang digunakan untuk menentukan posisi tersebut dapat diturunkan dengan suatu system persamaan linier [1]. Secara sederhana penentuan posisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3. Arah sumber suara yang datang dianggap berada pada jarak yang sangat jauh dari kedua mikrofon sehingga perubahan sudut datang sinyal suara dapat diabaikan. Posisi mikrofon i diasumsikan terletak lebih jauh dari mikrofon j terhadap sumber suara. Ketika mikrofon j dianggap sebagai titik perpotongan tegak lurus dari garis yang ditempuh sinyal menuju mikrofon, maka posisi kedua mikrofon dan garis perpotongan tersebut akan membentuk sebuah bidang berbentuk segitiga. Dan salah satu sisinya merupakan perkalian TDOA dengan kecepatan suara.



Gambar 3. Geometri posisi suara berdasarkan TDOA

Pada kondisi tersebut dua buah mikrofon sebagai penangkap sinyal suara berada pada posisi yang telah diketahui yaitu pada (x_i, y_i) dan (x_j, y_j) , sedangkan suatu sumber suara berada pada posisi yang tidak diketahui (x, y) . Sehingga terdapat perbedaan waktu kedatangan sinyal yang diterima oleh kedua mikrofon.

Dengan dimisalkan arah sumber suara dari mikrofon i membentuk sudut ϕ terhadap mikrofon j (x_{ij}), maka dengan menggunakan aturan *cosinus* dapat

diperoleh persamaan berikut

$$\cos \phi = \frac{\bar{u} \cdot \bar{x}_{ij}}{\|\bar{u}\| \|\bar{x}_{ij}\|} = \frac{\bar{u} \cdot \bar{x}_{ij}}{\|\bar{x}_{ij}\|} \quad (2.5)$$

Dimana \bar{u} adalah suatu vector satuan dengan arah menuju sumber suara. Dari gambar yang sama dapat ditentukan besar $\sin \theta$ dengan cara sebagai berikut :

$$\cos \phi = \sin \theta = \frac{c \cdot \Delta t_{ij}}{\|\bar{x}_{ij}\|} \quad (2.6)$$

Kemudian dengan menggabungkan persamaan 2.5 dengan persamaan 2.6 diperoleh persamaan seagai berikut :

$$\bar{u} \cdot \bar{x}_{ij} = c \cdot \Delta t_{ij} \quad (2.7)$$

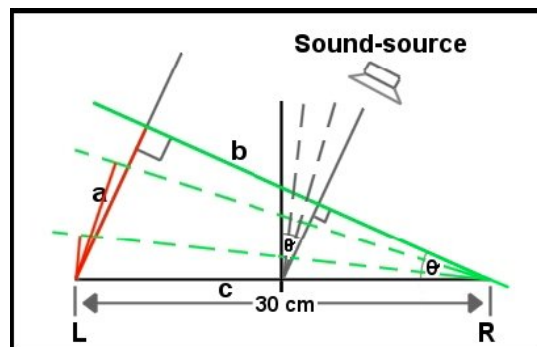
Karena \bar{u} dan \bar{x}_{ij} merupakan suatu vektor dalam bidang kartesian, maka persamaan 2.7 dapat ditulis menjadi :

$$u(x_j - x_i) + v(y_j - y_i) = c \cdot \Delta t_{ij} \quad (2.8)$$

Dimana $\bar{u} = (u, v)$ dan $\bar{x}_{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i)$, posisi mikrofon i adalah (x_i, y_i) . Sehingga untuk N posisi mikrofon dapat dinyatakan dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ (x_N - x_1) & (y_N - y_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c \cdot \Delta t_{12} \\ c \cdot \Delta t_{13} \\ \vdots \\ c \cdot \Delta t_{1N} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

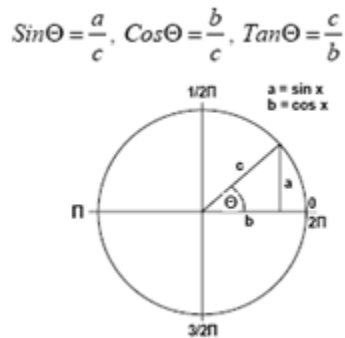
Untuk menentukan arah sumber suara maka dilakukan perhitungan sudut kedatangan sinyal suara. Perhitungan sudut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Perhitungan sudut sumber suara [3].

Dengan asumsi bahwa suara datang secara paralel seperti yang terlihat pada Gambar 4. Dengan menggunakan persamaan geometri dasar segitiga siku-siku, sudut datang sumber suara dapat ditentukan dengan

mudah. Dari persamaan trigonometri diperoleh persamaan berikut (Gambar 5):



Gambar 5. Diagram geometri sin(x) dan cos(x) [3]

Dari $\sin \theta = \frac{a}{c}$ maka diperoleh $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a}{c} \right)$ dimana a adalah $c_{\text{sound}} \cdot \Delta t_{ij}$ dan c adalah $\|\bar{x}_{ij}\|$. Maka diperoleh persamaan sudut datang sinyal suara.

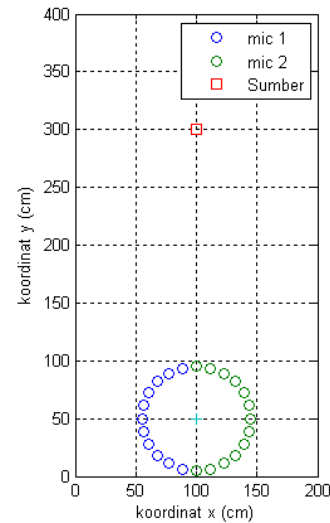
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{c_{\text{sound}} \cdot \Delta t_{ij}}{\|\bar{x}_{ij}\|} \right) \quad (2.10)$$

3. Simulasi Arah Sumber Suara

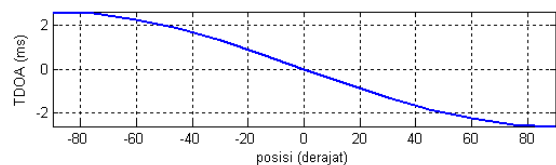
Pada simulasi posisi, sumber suara dan mikrofon dianggap berada pada posisi yang telah diketahui sehingga berdasarkan posisi tersebut TDOA dapat ditentukan. Pada simulasi, suara yang merambat melalui udara dianggap bergerak linier menuju sebuah titik yang menerima sinyal suara tersebut. Dalam hal ini penerima sinyal suara adalah mikrofon.

Pada kondisi pertama sumber suara dianggap terletak pada sebuah titik yang telah diketahui posisinya yaitu pada koordinat (100,300). Kemudian kedua mikrofon diputar sejauh 180° dengan selang 15° dengan jari-jari 45 cm. Untuk simulasi kondisi pertama dapat dilihat pada Gambar 6.

Pada simulasi, mikrofon diputar mulai dari posisi -90° sampai dengan 90°, supaya tiap posisi mikrofon tidak berlawanan arah dengan posisi sumber suara. TDOA hasil simulasi untuk posisi sumber suara tetap dapat dilihat pada Gambar 7, yang menunjukkan hubungan antara posisi mikrofon dan TDOA.

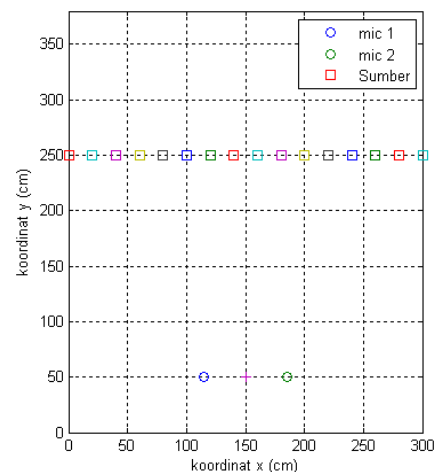


Gambar 6. Posisi mikrofon sumber suara tetap untuk simulasi



Gambar 7. TDOA hasil simulasi sumber suara tetap

Pada kondisi kedua sumber suara dianggap dapat berpindah dalam arah sumbu x sepanjang 300 cm, dan mikrofon terletak pada sudut 0° terhadap sumbu x. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 8.

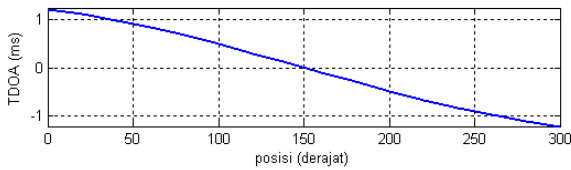


Gambar 8. Posisi mikrofon tetap dengan sumber suara bergeser untuk simulasi

Pada simulasi *mic stand* dengan dua buah mikrofon dipasang pada koordinat (150,50), dan sumber suara berpindah dalam arah x dengan jarak 20 cm sampai pada



$x = 300$ cm.

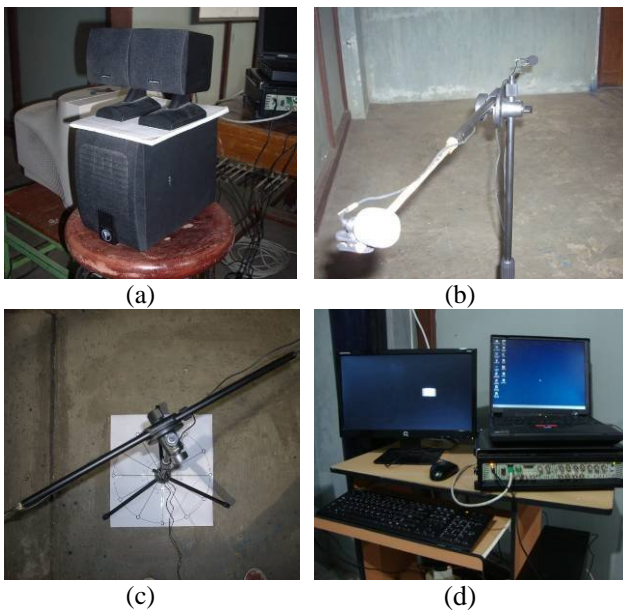


Gambar 9. TDOA hasil simulasi sumber suara berpindah

4. Hasil Eksperimen

TDOA hasil pengujian ditentukan dengan menentukan korelasi silang antara kedua sinyal yang diterima oleh masing-masing mikrofon. Dimana puncak dari grafik korelasi silang menunjukkan pergeseran waktu dari posisi nol untuk mikrofon yang terletak pada dua titik yang memiliki jarak yang berbeda dari sumber suara. Pergeseran tersebut merupakan nilai TDOA untuk tiap posisi mikrofon.

Peralatan uji yang digunakan terdiri dari speaker sebagai sumber suara, mikrofon sebagai sensor penerima sinyal suara, amplifier, *mic stand*, komputer, *Portable Pulse Analyzer* dan *NoteBook*. Peralatan uji dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Peralatan uji. (a) speaker. (b) mikrofon. (c) *mic stand* (d) komputer, *Portable Pulse Analyzer* dan *NoteBook*

Pengujian dilakukan dengan mengukur suara impuls dan sinusoidal dengan variasi jarak mikrofon, Sumber suara dengan posisi tetap dan sumber suara berpindah tempat. Peralat uji dipasang seperti yang terlihat pada gambar 11. Untuk pengujian sumber suara pada posisi tetap mikrofon dipasang pada jarak 2,5 meter dan untuk sumber suara berpindah tempat mikrofon

dipasang pada jarak 2 meter dari jalur pergerakan sumber suara.

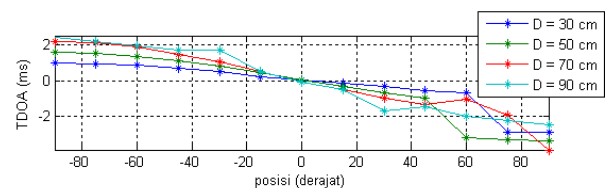


Gambar 11. Peralatan uji dalam kondisi terpasang

4.1. Pengujian Sumber Suara Impuls

Pada pengujian pertama sumber suara yang digunakan adalah sumber suara impuls. Pengujian dilakukan pada sebuah ruangan yang cukup besar sehingga refleksi sinyal suara dari dinding ruangan dapat diabaikan. Sumber suara impuls pada pengujian ini berasal dari sebuah speaker. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak mikrofon yaitu $D = 30$ cm, $D = 50$ cm, $D = 70$ cm dan $D = 90$ cm yang dipasang pada posisi -90° sampai dengan 90° dengan selang 15° .

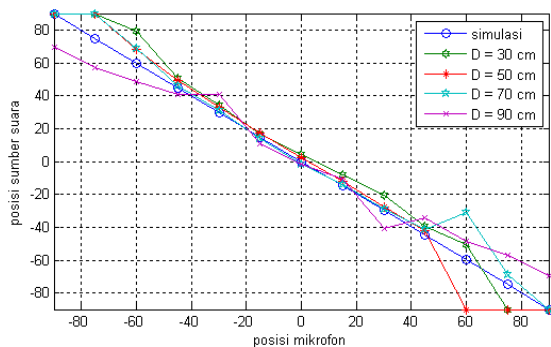
Dari pengujian diperoleh nilai TDOA untuk tiap posisi mikrofon, sehingga posisi sumber suara dapat ditentukan. Hasil pengujian TDOA untuk masing-masing jarak mikrofon dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. TDOA hasil pengujian suara dengan posisi tetap untuk variasi jarak mikrofon

Ketika mikrofon diputar searah dengan arah jarum jam maka posisi sumber suara yang dibaca adalah berlawanan dengan posisi mikrofon tersebut. Hubungan posisi mikrofon dengan posisi sumber suara tersebut dapat dilihat pada Gambar 13.



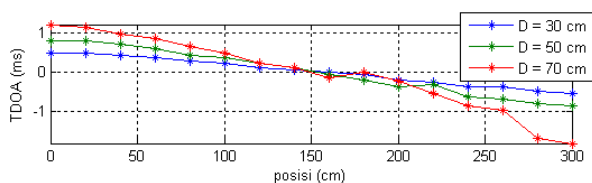


Gambar 13. Hubungan posisi mikrofon dengan posisi sumber suara

Dari Gambar 13 dapat dilihat bahwa hubungan posisi mikrofon terhadap posisi sumber suara adalah berbanding terbalik. Ketika mikrofon diputar berlawanan dengan arah jarum jam maka posisi sumber suara yang terbaca akan berpindah searah dengan arah jarum jam.

Selanjutnya pengujian TDOA untuk sumber suara berpindah dilakukan sesuai dengan simulasi sebelumnya dimana mikrofon dipasang pada posisi 0° terhadap sumbu x. Suara tersebut dipindahkan dalam arah x sejauh 300 cm dengan selang 20 cm. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak antara kedua mikrofon, yaitu pada $D = 30$ cm, $D = 50$ cm dan $D = 70$ cm.

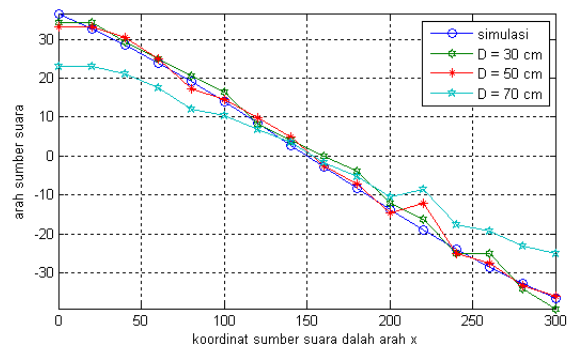
TDOA hasil pengujian untuk sumber suara berpindah dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Gambar TDOA hasil pengujian suara dengan posisi berpindah untuk variasi jarak mikrofon

Berdasarkan pengujian diperoleh hubungan antara koordinat sumber suara dalam arah sumbu x dengan estimasi arah sumber suara adalah berbanding terbalik. Ketika sumber suara dipindahkan searah sumbu x positif maka posisi sumber suara yang terbaca adalah searah dengan arah jarum jam. Hubungan koordinat sumber suara dengan estimasi arah sumber suara dapat dilihat pada Gambar 15.

Dari Gambar 15 dapat dilihat jarak kedua mikrofon yang paling optimum adalah ketika $D = 30$ cm dan $D = 50$ cm. Untuk $D = 70$ cm estimasi arah sumber suara yang diperoleh semakin menjauhi estimasi arah dengan menggunakan simulasi.

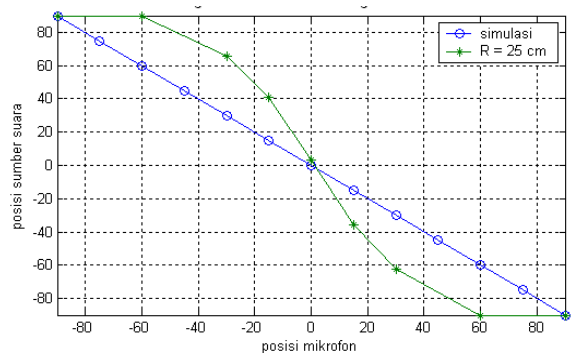


Gambar 15. Hubungan koordinat sumber suara dengan estimasi arah sumber suara

4.2. Pengujian Sumber Suara Sinusoidal

Pengujian kedua dilakukan pada sumber suara sinusoidal. Pengujian ini dilakukan sama seperti pengujian sumber suara impuls yaitu pada sebuah ruangan yang cukup besar sehingga refleksi sinyal suara dari dinding ruangan dapat diabaikan. Karena sumber suara yang digunakan adalah berada pada frekuensi 500 Hz, yaitu dengan perioda 0.002 s. Sehingga Jarak mikrofon yang digunakan harus lebih kecil dari $0.002s \times c$, yaitu harus lebih kecil dari 0.7 m. Pada pengujian jarak mikrofon yang digunakan hanya ketika $D = 50$ cm, yang dipasang pada posisi -90° sampai dengan -90° dengan selang 15° .

Berdasarkan data tersebut dapat dilihat hubungan antara posisi mikrofon dengan posisi sumber suara adalah berbanding terbalik. Ketika mikrofon diputar searah dengan arah jarum jam maka posisi sumber suara yang dibaca adalah berlawanan dengan posisi mikrofon tersebut. Hubungan posisi mikrofon dengan posisi sumber suara tersebut dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Hubungan posisi mikrofon dengan posisi sumber suara

Dari Gambar 16 dapat dilihat bahwa hubungan posisi mikrofon terhadap posisi sumber suara untuk sumber suara sinusoidal menunjukkan hal yang sama dengan sumber suara impuls, yaitu berbanding terbalik. Dan ketika posisi mikrofon berada pada posisi 60 sampai



dengan 90 derajat terdapat kesalahan yang cukup besar. Sehingga pada posisi tersebut tidak dapat ditentukan arah sumber suara.

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. TDOA dapat digunakan untuk memprediksi arah satu sumber suara dengan menggunakan sepasang mikrofon yang dipasang sejajar pada jarak tertentu.
2. Sejauh ini Posisi mikrofon yang paling baik untuk menentukan posisi sumber suara impuls adalah pada selang -60 sampai dengan 60 derajat untuk masing-masing jarak mikrofon.
3. Untuk estimasi posisi sumber suara sinusoidal mengalami sedikit kesulitan, posisi mikrofon yang paling baik adalah pada selang -30 sampai dengan 30 derajat.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai dari dana hibah penelitian I-MHERE Universitas Andalas, tahun 2009-2010. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih.

Daftar Pustaka

- [1] Valin, J. M., Michaud, F., Rouat, J., L'etourneau, D., *Robust Sound Source Localization Using a Microphone Array on a Mobile Robot*, Research Laboratory on Mobile Robotics and Intelligent Systems, Universit'e de Sherbrooke, 2003.
- [2] Pertilä, Pasi, *Acoustic Source Localization in a Room Environments and Moderate distance*, Doctoral Thesis, Tampere University of Technology, 2009.
- [3] Murray, J. C., Erwin, H., and Wermter, H., *Robotic Sound-Source Localization and Tracking Using Interaural Time Difference and Cross-Correlation*, University of Sunderland, Sunderland, SR6 0DD, 2004.
- [4] Ui-Hyun, K., Jinsung, K., Doik, K., Hyogon, K., and Bum, J. Y., *Speaker Localization on a Humanoid Robot's Head using the TDOA-based Feature Matrix*, <http://widen.korea.ac.kr>.
- [5] Shin, K., Hammond, J., *Fundamentals of Signal Processing*, John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [6] Moore, P. J., Glover, I. A., and Peck, C. H., *An Impulsive Noise Source Position Locator*, Final Report, University of Bath, 2002.
- [7] Voordouw, J., Yang, Z., Rothkrantz, Leon J. M., Mast, Charles., *A comparison of the ild and tdoa sound source Localization algorithms in a train environment*, Delft University of Technology, Mekelweg 4, 2628CD Delft, The Netherlands, 2007.
- [8] Aarabi, P., *The Fusion of Distributed Microphone Arrays for Sound Localization*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada M5S 3G4, 2002.
- [9] Tellakula, A. K., *Acoustic Source Localization Using Time Delay Estimation*, A Thesis Submitted for the Degree of Master of Science (Engineering), Indian Institute of Science, 2007.
- [10] Kim, H. D., Komatani, K., Ogata, T., and Okuno, H. G., *Design and Evaluation of Two-Channel-Based Sound Source Localization over Entire Azimuth Range for Moving Talkers*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.
- [11] Pertilä, P., Korhonen, T., and Visa, A., *Measurement Combination for Acoustic Source Localization in a Room Environment*, Research Article, Tampere University of Technology, Finland, 2008.



