

Perancangan Estimasi Posisi Sumber Suara Pada Bidang Dua Dimensi Berdasarkan *Time Difference of Arrival*

¹Ardianto Satriawan, ²Yudi Satria Gondokaryono

^{1,2}*Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung, Indonesia*

¹ardiantosatriawan@gmail.com

²ygondokaryono@stei.itb.ac.id

Abstrak— Estimasi atau perkiraan lokasi dari sebuah sumber gelombang adalah salah satu topik yang diminati dalam penelitian ilmiah karena memiliki manfaat pada berbagai bidang, seperti self localization pada robot, analisis vibrasi pada inti transformator, penentuan posisi telepon seluler terhadap beberapa base transfer station, atau pada aplikasi yang lebih modern, yaitu global positioning system atau GPS. Pada paper ini, dipresentasikan desain dari suatu sistem untuk melakukan estimasi posisi terhadap salah satu bentuk sumber gelombang, yaitu gelombang suara dengan frekuensi konstan. Penentuan posisi sumber suara didasarkan pada persamaan lingkaran pada bidang koordinat dan hubungan selisih jari-jari lingkaran dengan *time difference of arrival* (TDOA) dari sinyal-sinyal yang diperoleh pada beberapa mikrofon. Untuk keperluan tersebut, dilakukan beberapa buah percobaan untuk memperoleh hubungan antara selisih jari-jari lingkaran dengan TDOA dan pada akhirnya membuat sebuah sistem yang dapat mendeteksi posisi sumber suara dengan frekuensi konstan pada bidang kartesian dua dimensi.

Keywords— *sound localization, time difference of arrival*

I. PENDAHULUAN

Estimasi atau perkiraan lokasi sumber gelombang adalah salah satu topik yang diminati dalam penelitian ilmiah karena memiliki banyak manfaat seperti self localization pada robot, analisis gelombang vibrasi pada inti transformator tegangan tinggi, dan penentuan posisi telepon seluler terhadap base transfer station. Pemanfaatan dari lokalisasi yang paling dikenal dalam kehidupan sehari-hari adalah pada GPS atau Global Positioning System untuk membantu navigasi.

Pada paper ini, dilakukan desain untuk penentuan lokasi pada salah satu bentuk gelombang, yaitu suara mendengung (humming) dengan frekuensi konstan pada bidang kartesian dua dimensi. Posisi sumber suara tersebut dinyatakan dalam bentuk (x,y) dan diperoleh dengan menyelesaikan sistem persamaan linier yang diturunkan dari beberapa *time difference of arrival* (TDOA).

Untuk memperoleh beberapa buah TDOA dari sumber suara, digunakan beberapa buah mikrofon yang sedapat mungkin memiliki parameter-parameter yang identik. Data TDOA dari beberapa mikrofon tersebut diolah dalam suatu perangkat lunak untuk dikonversi menjadi sebuah koordinat dari sumber suara tersebut. Sebagai catatan, untuk

memperoleh titik koordinat dua dimensi dari suatu sumber suara diperlukan empat buah mikrofon apabila hubungan antara selisih jarak dan TDOA diketahui.

II. DASAR TEORI

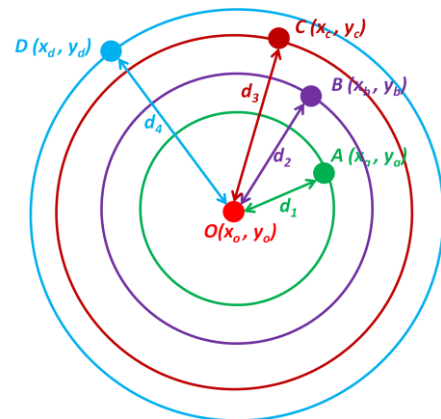
Terdapat dua hal yang mendasari perancangan estimasi posisi sumber suara pada bidang dua dimensi, yaitu cara penentuan posisi secara matematis dan *time difference of arrival*.

A. Penentuan Posisi

Mahajan dan Walworth pada tahun 2001 menyatakan bahwa jika terdapat empat buah sensor terhadap suatu sumber gelombang, dapat diketahui posisi sumber suara pada bidang Cartesian (x_o, y_o) ^[1]. Posisi sumber suara diperoleh dengan menyelesaikan sistem persamaan linier dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} 2(x_a - x_b) & 2(y_a - y_b) & 2(\Delta d_{12}) \\ 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) & 2(\Delta d_{13}) \\ 2(x_a - x_d) & 2(y_a - y_d) & 2(\Delta d_{14}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a^2 - x_b^2 + y_a^2 - y_b^2 + \Delta d_{12}^2 \\ x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + \Delta d_{13}^2 \\ x_a^2 - x_d^2 + y_a^2 - y_d^2 + \Delta d_{14}^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dengan (x_a, y_a) , (x_b, y_b) , (x_c, y_c) , dan (x_d, y_d) adalah posisi masing-masing sensor pada bidang Cartesian dua dimensi. Sedangkan Δd_{1n} adalah selisih antara jarak sensor pertama ke sumber suara dengan jarak sensor ke n dengan sumber suara.



Gmb 1. Ilustrasi sumber suara dan beberapa sensor

B. Time difference of Arrival (TDOA)

Apabila terdapat dua buah sensor dan satu buah sumber suara, dengan jarak sumber suara ke masing-masing sensor berbeda, maka waktu tempuh gelombang suara dari sumber suara ke masing-masing sensor juga akan berbeda. Perbedaan waktu tempuh gelombang suara tersebut disebut *time difference of arrival* atau TDOA.

Secara matematis, TDOA disimbolkan Δt_{ij} dengan yang didefinisikan sebagai

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad (2)$$

Namun, TDOA tidak dapat langsung dihitung dengan (2) karena waktu tempuh gelombang suara dari sumber ke masing-masing sensor tidak diketahui, sehingga diperlukan cara lain untuk memperoleh TDOA. Cara tersebut adalah dengan melakukan analisis terhadap sinyal-sinyal yang diperoleh oleh sensor.

Dengan asumsi tidak terdapat derau, maka sinyal-sinyal yang diterima oleh beberapa mikrofon akan identik satu sama lain, tetapi mengalami pergeseran terhadap sumbu waktu. Pergeseran terhadap sumbu waktu tersebut adalah TDOA.

Untuk memperoleh perbedaan waktu kedatangan atau time delay dari dua sinyal yang diperoleh oleh mikrofon, digunakan fungsi korelasi silang (cross correlation). Fungsi korelasi silang pada antara dua fungsi kontinu $f(t)$ dan $g(t)$ didefinisikan sebagai^[2]

$$(f \star g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\tau) g(t + \tau) \quad (3)$$

Time delay antara dua sinyal Δt atau TDOA antara dua sinyal dapat diperoleh dengan mencari nilai t yang menyebabkan nilai korelasi silangnya maksimum (atau minimum jika kedua sinyal memiliki korelasi negatif).^[3]

$$\Delta t = \underset{t}{\operatorname{argmax}} (f \star g)(t) \quad (4)$$

Time delay ini dianggap berbanding lurus secara linier dengan selisih jarak dengan konstanta pembanding sebesar k yang diperoleh dari eksperimen dan regresi linier. Dengan memperhitungkan faktor *intercept* dari regresi linier, e , hubungan TDOA dan selisih jarak dinyatakan sebagai

$$\Delta d_{1n} = k\Delta t_{1n} + e \quad (5)$$

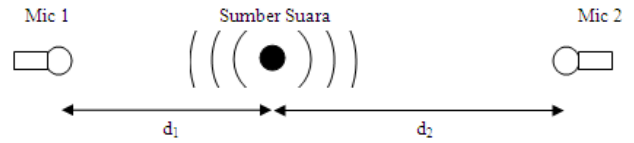
Persamaan (1) dan (5) adalah dasar untuk memperkirakan posisi sumber suara dalam bidang koordinat.

III. EKSPERIMEN

Dalam pembuatan paper ini dilakukan beberapa eksperimen untuk mencapai tujuan memperoleh posisi sumber suara.

A. Hubungan TDOA dengan Selisih Jarak

Tujuan dari eksperimen ini adalah memperoleh konstanta k dan e dalam persamaan (5). Untuk keperluan tersebut, diperlukan dua buah mikrofon, satu buah perangkat keras perekaman, perangkat lunak perekaman, dan perangkat lunak untuk menghitung TDOA. Sumber suara yang digunakan adalah sumber suara dengan frekuensi konstan, 300 Hz.



Gmb 2. Ilustrasi eksperimen hubungan TDOA dan selisih jarak

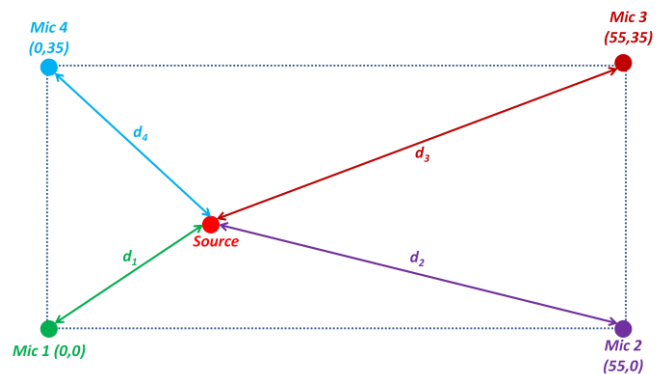
Jarak antara kedua mikrofon diubah-ubah terhadap sumber suara. Pada percobaan yang dilakukan, jarak sumber suara d_1 dan d_2 adalah 5 cm – 25 cm, dengan interval 5 cm dan semua kombinasi yang mungkin.

Pada tiap kombinasi jarak, dihitung TDOA antara sinyal yang diterima oleh setiap mikrofon. Setelah itu dilakukan regresi linier sederhana agar diperoleh hubungan antara selisih jarak dengan TDOA.

B. Estimasi Posisi Sumber Suara

Tujuan dari eksperimen ini adalah melakukan estimasi posisi sumber suara berdasarkan persamaan (1). Sebelumnya untuk memperoleh selisih jarak, digunakan persamaan (5) dengan konstanta k dan e diperoleh pada eksperimen sebelumnya.

Pada eksperimen ini, digunakan empat buah mikrofon dan sebuah sumber suara dengan frekuensi konstan 300 Hz. Posisi dari masing-masing mikrofon ditetapkan pada (0,0), (55,0), (55,35), dan (0,35).



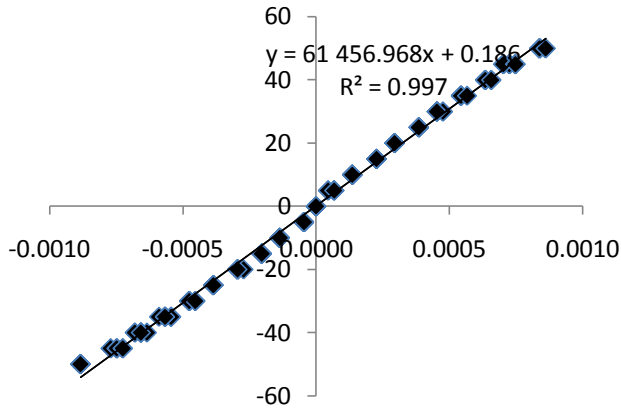
Gmb 3. Ilustrasi posisi mikrofon dan sumber suara

Pada percobaan ini, dihitung masing-masing TDOA antara mikrofon 1, 2, 3, dan 4. Kemudian dihitung selisih jaraknya dengan hasil regresi linier pada percobaan sebelumnya, dan pada akhirnya dihitung posisinya dengan menyelesaikan sistem persamaan linier (5).

IV. HASIL EKSPERIMEN

A. Hubungan TDOA dan Selisih Jarak

Setelah dilakukan percobaan dengan mengambil data untuk beberapa selisih jarak dan TDOA, dilakukan regresi linier sederhana untuk memperoleh konstanta k dan e yang diperlukan pada persamaan (5). Hasil regresi linier dapat dilihat pada Gambar 4.



Gmb 4. Hasil regresi linier sederhana

Dari hasil regresi linier sederhana yang dilakukan pada percobaan ini, persamaan (5) berubah menjadi

$$\Delta d_{1n} = 61456.968\Delta t_{1n} + 0.186 \quad (6)$$

Persamaan ini menjadi dasar untuk menghitung selisih jarak pada percobaan selanjutnya.

B. Estimasi Posisi Sumber Suara

Pada percobaan ini dilakukan beberapa kali pengambilan data pada posisi (15,10), (15,15), (25,15), (25,20), dan (35,25). Hasil pengambilan data pada posisi-posisi tersebut dapat dilihat pada tabel-tabel berikut.

TABEL 1. HASIL EKSPERIMEN PADA POSISI (15,10)

No	Posisi (cm)		Hasil eksperimen (cm)		Kesalahan (cm)	
	x_o	y_o	x_e	y_e	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	15	10	15.5316	11.2639	0.5316	1.2639
2	15	10	15.5316	11.2639	0.5316	1.2639
3	15	10	15.5316	11.2639	0.5316	1.2639
4	15	10	15.5316	11.2639	0.5316	1.2639
5	15	10	14.3891	9.2452	0.6109	0.7548
6	15	10	15.5316	11.2639	0.5316	1.2639
7	15	10	14.3891	9.2452	0.6109	0.7548
8	15	10	14.3891	9.2452	0.6109	0.7548
9	15	10	16.7304	11.5549	1.7034	1.5549
10	15	10	16.7304	11.5549	1.7034	1.5549

TABEL 2 HASIL EKSPERIMEN PADA POSISI (15,15)

No	Posisi (cm)		Hasil eksperimen (cm)		Kesalahan (cm)	
	x_o	y_o	x_e	y_e	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	15	15	17.1425	16.0987	2.1425	1.0987
2	15	15	14.8092	14.3963	0.1908	0.6037
3	15	15	17.1425	16.0987	2.1425	1.0987
4	15	15	13.2612	12.5223	1.7388	2.4777
5	15	15	14.8092	14.3963	0.1908	0.6037
6	15	15	14.8092	14.3963	0.1908	0.6037
7	15	15	14.8092	14.3963	0.1908	0.6037
8	15	15	13.7934	14.2895	1.2066	0.7105
9	15	15	14.8092	14.3963	0.1908	0.6037
10	15	15	13.2612	12.5223	1.7388	2.4777

TABEL 3 HASIL EKSPERIMEN PADA POSISI (25,15)

No	Posisi (cm)		Hasil eksperimen (cm)		Kesalahan (cm)	
	x_o	y_o	x_e	y_e	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	25	15	26.8566	16.0668	1.8566	1.0668
2	25	15	26.7973	15.5135	1.7973	0.5135
3	25	15	26.7973	15.5135	1.7973	0.5135
4	25	15	26.8566	16.0668	1.8566	1.0668
5	25	15	26.8566	16.0668	1.8566	1.0668
6	25	15	27.1915	16.2120	2.1915	1.2120
7	25	15	26.8566	16.0668	1.8566	1.0668
8	25	15	26.7973	15.5135	1.7973	0.5135
9	25	15	26.8566	16.0668	1.8566	1.0668
10	25	15	26.8566	16.0668	1.8566	1.0668

TABEL 4 HASIL EKSPERIMEN PADA POSISI (25,20)

No	Posisi (cm)		Hasil eksperimen (cm)		Kesalahan (cm)	
	x_o	y_o	x_e	y_e	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
2	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
3	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
4	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
5	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
6	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
7	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
8	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476
9	25	20	26.8032	17.5000	1.8032	2.5000
10	25	20	26.9561	17.8524	1.9561	2.1476

TABEL 5 HASIL EKSPERIMEN PADA POSISI (35,25)

No	Posisi (cm)		Hasil eksperimen (cm)		Kesalahan (cm)	
	x_o	y_o	x_e	y_e	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	35	25	32.1832	25.8613	2.1832	0.8613
2	35	25	32.5785	26.5838	2.4215	1.5838
3	35	25	31.0633	24.8853	3.9367	0.1147
4	35	25	32.5785	26.5838	2.4215	1.5838
5	35	25	32.5785	26.5838	2.4215	1.5838
6	35	25	31.0633	24.8853	3.9367	0.1147
7	35	25	31.0633	24.8853	3.9367	0.1147
8	35	25	32.5785	26.5838	2.4215	1.5838
9	35	25	32.5785	26.5838	2.4215	1.5838
10	35	25	33.1387	28.7987	1.8613	3.7987

V. KESIMPULAN

Berdasarkan eksperimen dan analisis yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan

1) TDOA atau time difference of arrival dari dua buah sinyal yang diterima oleh mikrofon dapat diperoleh dengan cara menghitung nilai yang menyebabkan korelasi silang (cross-correlation) dari kedua sinyal tersebut menjadi maksimum atau menjadi minimum jika keduanya memiliki korelasi negatif.

2) Hubungan antara selisih jarak dengan TDOA dapat diperoleh dengan melakukan eksperimen sederhana untuk mengambil beberapa selisih jarak dan kemudian menghitung TDOA dari masing-masing selisih jarak tersebut. Hubungan kedua variabel tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan regresi linier sederhana.

3) Posisi sumber suara dalam bidang dua dimensi dapat diperkirakan apabila diketahui tiga buah TDOA dari empat buah mikrofon, dari tiga buah TDOA tersebut dapat diperoleh selisih-selisih jarak antara sumber suara dengan mikrofon untuk kemudian dihitung posisi sumber suara pada bidang koordinat dalam bentuk (x,y) .

PUSTAKA

- [1] Mahajan A., Walworth M., 3-D Position Sensing Using the Differences in the Time-of-Flights from a Wave Source to Various Receivers, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 91-94, 2001.
- [2] Roberts, M.J., *Signals and Systems: Analysis Using Transform Methods and MATLAB*, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 2004.
- [3] _____, *Cross-correlation*, Wolfram Alpha, <http://mathworld.wolfram.com/Cross-Correlation.html>, 21 Februari 2013, 22:00 WIB.
- [4] Chatterjee, S., Hadi, A.S., *Regression Analysis by Example*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2006.