

REDUKSI RUANG SOLUSI DAN ALGORITMA PENELUSURAN HIPERBOLA MENGGUNAKAN FILTER PARTIKEL UNTUK ESTIMASI LOKASI SUMBER SUARA

Iwan Awaludin, Tati Susilawati

Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Girang Bandung
E-mail : awaludin@jtk.polban.ac.id

ABSTRAK

Reduksi ruang solusi, pemilihan sensor, filter partikel, dan penelusuran hiperbola merupakan metode estimasi posisi sumber suara yang diajukan dalam penelitian. Reduksi ruang solusi dilakukan dengan menetapkan jumlah dan posisi mikrofon. Penetapan ini dilakukan untuk mempermudah proses reduksi karena dari setiap pasang mikrofon dapat dieliminasi setengah ruang solusi. Ruang solusi terakhir merupakan hasil irisan sisa ruang solusi dari semua pasangan mikrofon. Setelah ruang solusi direduksi langkah selanjutnya adalah melakukan penelusuran hiperbola. Penelusuran dilakukan dengan penyebaran partikel pada ruang hasil reduksi. Partikel ini kemudian dieliminasi dengan membandingkan beda jarak sebagai fungsi waktu dan sebagai fungsi posisi mikrofon. Sisa eliminasi merupakan penelusuran hiperbola di mana perpotongan dua buah hiperbola merupakan estimasi posisi sumber suara. Dalam makalah ini disajikan formulasi matematika dari rangkaian metode di atas. Hasil simulasi dan rencana penelitian juga disampaikan.

Kata kunci : reduksi ruang solusi, TDOA, filter partikel, penelusuran hiperbola

1. PENDAHULUAN

Mencari lokasi sumber suara impulsif memiliki banyak aplikasi seperti dalam bidang pertahanan keamanan, pelacakan, dan bidang lainnya. Beberapa model telah dikembangkan seperti Time of Arrival, Received Signal Strength, dengan Time Difference of Arrival (TDOA) menjadi salah satu model yang populer untuk melakukan estimasi posisi sumber suara (Zekavat dan Buehrer, 2012).

Model ini memakai persamaan non-linier sebagai representasi lokasi sumber suara berdasarkan jarak dan waktu kedatangan sinyal. Kelebihannya yaitu tidak memerlukan informasi waktu pembangkitan sinyal di sisi pengirim sehingga arsitekturnya jadi lebih sederhana. Tetapi model ini memerlukan model matematika yang lebih rumit dibandingkan model seperti TOA. Untuk mencari solusi persamaan non-linier ini beberapa peneliti mendapatkan pencarian akar-akar kuadrat yang pemecahannya belum mendapat definisi yang pasti seperti

(Chan dan Ho, 1994), (Enhua dkk, 2015), dan (Al Harbi dan Helgert, 2010).

Pencarian akar kuadrat dapat dibantu dengan cara mereduksi ruang yang menjadi pusat perhatian seperti yang dilakukan oleh (Chan dan Ho, 1994) dan turunannya. Selain itu juga bisa dilakukan dengan menambahkan sebuah sensor sebagai pembanding seperti dilakukan oleh (Bucher dan Misra, 2002). Belum ada yang bisa melakukannya secara otomatis terhadap persamaan kuadrat yang dihasilkan.

Dalam penelitian ini akan diinvestigasi bagaimana pemilihan akar bisa dibantu dengan reduksi ruang solusi sekaligus mengurangi pasangan sensor yang dapat berkontribusi terhadap kesalahan estimasi.

2. METODOLOGI

Informasi pertama yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah informasi beda waktu kedatangan sinyal suara di pasangan sensor. Informasi ini secara langsung dapat dikonversi menjadi beda jarak yang nantinya

digunakan dalam perhitungan estimasi posisi. Kesalahan dalam informasi ini akan terbawa dalam perhitungan estimasi posisi sumber suara.

Informasi beda waktu kedatangan sinyal suara (waktu tunda) di pasangan sensor diperoleh dengan membandingkan sinyal di pasangan sensor. Dalam proposal tidak disebutkan metode yang akan digunakan untuk mendapatkan informasi ini. Jika hasil penelitian akan dibuat implementasinya, maka diperlukan metode yang cukup handal dalam mendapatkan waktu tunda.

Eksplorasi metode untuk mendapatkan waktu tunda (*time delay*) merupakan satu topik riset tersendiri. Agar tidak terlalu melenceng dari tujuan estimasi posisi sumber suara, maka metode mendapatkan waktu tunda akan menggunakan metoda yang sudah ada seperti dilaporkan (Dufaux, 2001). Pertimbangan pemilihannya berdasarkan kemudahan implementasi dan penggunaan sumber daya yang efisien.

Sebagai bahan eksperimen pertama kali akan dilakukan simulasi dengan sebuah berkas (file) contoh suara. Dalam contoh suara ini terdapat sebuah suara impulsif. Metode yang diambil harus dapat mendeteksi suara impulsif yang ada di berkas tersebut dan menunjukkan waktu terjadinya.

Setelah suara impulsif dapat dideteksi selanjutnya suara ini diduplikasi dengan menambahkan waktu tunda. Jadi akan ada dua berkas suara yang satu dengan lainnya merupakan suara yang identik tetapi salah satunya sudah digeser di sumbu waktu. Metode hitung waktu tunda yang dipilih nantinya harus dapat memperoleh informasi waktu tunda dari dua buah berkas suara.

Setelah berhasil menguji metode hitung waktu tunda, selanjutnya suara yang ada diduplikasi dengan menambahkan galat. Galat pada kondisi nyata diperoleh dari tambahan noise dan juga sifat laten dari alat pengubah suara menjadi sinyal digital. Metode hitung waktu tunda yang sudah dipilih harus dapat memperoleh waktu tunda dengan cukup akurat. Atau bisa jadi dapat diperoleh kondisi-kondisi batas (parameter) yang menyebabkan waktu tunda tidak dapat diperoleh, misalnya besar noise dan juga kualitas suara (*Signal to Noise Ratio / SNR*).

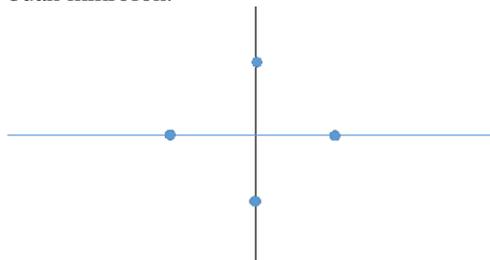
Selanjutnya dengan mengambil asumsi posisi sumber suara dan posisi sensor, berkas suara untuk masing-masing sensor

disiapkan dengan tambahan waktu tunda yang sesuai. Bila hanya satu unit pemroses perlu diperiksa berapa lama waktu pemrosesan yang diperlukan untuk menghitung waktu tunda semua pasangan sensor. Pemeriksaan ini perlu dilakukan untuk mendapatkan kemungkinan pemrosesan selanjutnya dilakukan secara waktu nyata. Pada kondisi nyata pengambilan suara dilakukan secara terus menerus. Bila tidak memungkinkan untuk menghitung waktu tunda secara waktu-nyata, perlu dipertimbangkan kapan penghitungan akan dilakukan. Misalnya ketika salah satu sensor mendapat suara pembangkit (*triggering sound*).

3. DISKUSI DAN SIMULASI

Reduksi Ruang Solusi

Dalam kasus 2D seperti penempatan sensor pada Gambar 1, ruang solusi (feasible solution space) awalnya adalah empat kuadran. Yaitu sumber suara bisa berada di manapun dalam ke empat kuadran tersebut. Pada makalah (diajukan sebuah Lemma yang terdiri dari empat macam tempat kemungkinan sumber suara berdasarkan beda waktu kedatangan gelombang suara di dua buah mikrofon.



Gambar 1. Posisi Penempatan Sensor

Dari ke empat macam tempat itu, dapat disederhanakan menjadi tiga macam tempat saja. Lemma tersebut memakai notasi sebagai berikut di mana t_{mn}^* adalah waktu yang dibutuhkan suara untuk bergerak dari satu sensor ke sensor lainnya sedangkan \hat{t}_{mn} adalah waktu hasil pengukuran.

1. Jika $|\hat{t}_{mn}| > t_{mn}^*$ maka tidak ada sumber suara yang terdefinisi dalam ruang solusi.
2. Jika $\hat{t}_{mn} = 0$ maka sumber suara berada pada hyperplane yang melalui dan tegak lurus pada titik di tengah segmen garis mayor yang

menghubung kedua mikrofon. Hyperplane ini akan membagi ruang solusi menjadi dua bagian yang sama besar, di sebelah kiri dan sebelah kanannya.

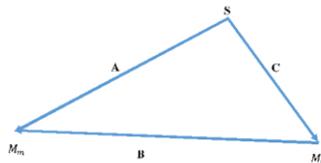
3. Jika $|\hat{t}_{mn}| < t_{mn}^*$, pada kondisi ini ada dua kemungkinan yaitu saat $\hat{t}_{mn} < t_{mn}^*$ atau $-\hat{t}_{mn} < t_{mn}^*$. Bila kondisi pertama yang terpenuhi maka sumber suara berada pada setengah ruang solusi yang lebih dekat dengan M_m , sedangkan kondisi kedua menyatakan sumber suara berada pada setengah ruang solusi yang lebih dekat dengan M_n .

Jarak dari posisi sumber suara ke sensor ditentukan oleh kecepatan rambat dan waktu rambat yang diperlukan sinyal suara untuk berpindah. Persamaan umumnya adalah

$$r = v \cdot t \quad (1)$$

Di mana r adalah jarak Antara sensor dan sumber suara, v adalah kecepatan rambat suara, dan t adalah waktu yang dibutuhkan sinyal suara untuk merambat dari sumber suara ke sensor. Berdasarkan sifat ini maka bukti terhadap Lemma yang pertama dan kedua dapat diberikan.

Pada Lemma yang pertama ada nilai TDOA maksimum yaitu sebesar waktu yang dibutuhkan oleh gelombang suara merambat dari satu mikrofon ke mikrofon lainnya. Pembuktian bisa dilakukan dengan memakai pertidaksamaan triangular. Gambar 2 berikut ini menunjukkan arah vektor perambatan suara dari S menuju $M_m(A)$ dan $M_n(C)$. Beda waktu kedatangan di antara dua mikrofon ini berbanding lurus terhadap beda panjang A dan C .



Gambar 2. Ilustrasi Pertidaksamaan Triangular

$$A = C + B \quad (2)$$

$$\|A\| = \|C + B\| \leq \|C\| + \|B\| \quad (3)$$

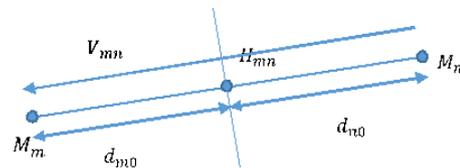
$$\|A\| - \|C\| \leq \|B\| \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan 1 dan 4, bukti adanya beda waktu maksimum antar dua sensor seperti persamaan 5 bisa dibuktikan.

$$-t_{mn}^* \leq t_{mn}(S) \leq t_{mn}^* \quad (5)$$

Lemma yang kedua berkaitan dengan sebuah titik H_{mn} yang berada di tengah-tengah dua buah mikrofon M_m dan M_n . Posisi H_{mn} ditetapkan seperti Persamaan 6 dan lokasinya diilustrasikan seperti Gambar 3.

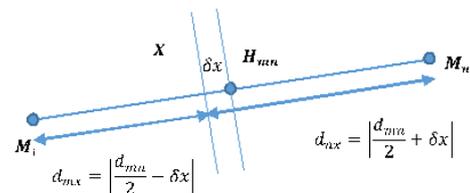
$$H_{mn} = \frac{M_m + M_n}{2} \quad (6)$$



Gambar 3. Ilustrasi Lemma 2

Jarak dari M_m ke H_{mn} (d_{m0}) akan sama dengan jarak dari M_n ke H_{mn} (d_{n0}). Semua titik yang berada di hyperplane yang tegak lurus terhadap segmen garis mayor V_{mn} akan memiliki jarak yang sama di segmen garis mayor tersebut terhadap M_m dan M_n , dan tinggi yang sama terhadap H_{mn} . Dengan memakai hukum Phytagoras bisa dibuktikan bahwa jarak sumber suara yang ada di *hyperplane* tersebut terhadap kedua mikrofon adalah sama.

Lemma yang ketiga menyebutkan bahwa suara akan sampai ke mikrofon yang jaraknya lebih dekat. Pembuktiannya memakai persamaan 8, persamaan 12, dan lemma ke dua. Diasumsikan segmen garis mayor yang menghubungkan kedua buah mikrofon telah dipetakan ke sumbu x seperti Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi Lemma 3

Jarak masing-masing mikrofon $d_{m0}=d_{n0}=d$. Jika sumber suara berada di

dekat salah satu mikrofon, misal M_n , dengan jarak δx maka jarak

$$d_{m0} = d + \delta x$$

Sedangkan

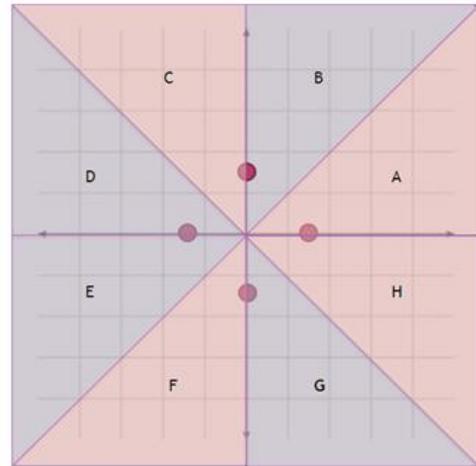
$$d_{n0} = d - \delta x$$

Dengan memakai hukum Pythagoras lagi bisa dibuktikan bahwa jarak sumber suara terhadap M_n lebih dekat jika dibandingkan terhadap M_m .

Setelah itu reduksi ruang solusi bisa dilakukan dengan memakai lemma-lemma di atas. Ada delapan ruang solusi yang mungkin menjadi tempat sumber suara dengan cara mencari irisan berdasarkan ruang yang lebih dekat dengan sensor. Ruang-ruang ini ditunjukkan dalam tabel 1 berikut ini.

| | Kondisi | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| | Sumbu x | Sumbu y | Sumbu Tambahan | Pasang Sensor |
| A | $t_{x+} < t_{x-}$ | $t_{y+} < t_{y-}$ | $t_{x-} > t_{y-}$ | $[x-, y -]$ $[y-, y +]$ |
| B | $t_{x+} < t_{x-}$ | $t_{y+} < t_{y-}$ | $t_{x-} < t_{y-}$ | $[y-, x -]$ $[x-, x +]$ |
| C | $t_{x+} > t_{x-}$ | $t_{y+} < t_{y-}$ | $t_{x+} < t_{y-}$ | $[y-, x +]$ $[x+, x -]$ |
| D | $t_{x+} > t_{x-}$ | $t_{y+} < t_{y-}$ | $t_{x+} > t_{y-}$ | $[x+, y -]$ $[y-, y +]$ |
| E | $t_{x+} > t_{x-}$ | $t_{y+} > t_{y-}$ | $t_{x+} > t_{y+}$ | $[x+, y +]$ $[y+, y -]$ |
| F | $t_{x+} > t_{x-}$ | $t_{y+} > t_{y-}$ | $t_{x+} < t_{y+}$ | $[y+, x +]$ $[x+, x -]$ |
| G | $t_{x+} < t_{x-}$ | $t_{y+} > t_{y-}$ | $t_{x-} < t_{y+}$ | $[y+, x -]$ $[x-, x +]$ |
| H | $t_{x+} < t_{x-}$ | $t_{y+} > t_{y-}$ | $t_{x-} > t_{y+}$ | $[x-, y +]$ $[y+, y -]$ |

Ilustrasi 8 ruang solusi ini diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Delapan Ruang Solusi

Tidak semua pasangan mikrofon valid dalam estimasi posisi sumber suara dengan memakai TDOA. Pasangan mikrofon yang tidak valid di antaranya adalah yang hasil pengukuran TDOA nya memenuhi Lemma pertama. Yaitu TDOA hasil pengukuran lebih besar dari waktu yang diperlukan oleh suara untuk merambat dari satu mikrofon ke mikrofon lainnya.

Pasangan lain yang tidak valid adalah yang memiliki posisi segaris dengan sumber suara. Hiperbola merupakan bagian bahasan dari potongan konik. Dalam definisinya hiperbola memiliki eksentrisitas > 1 . Eksentrisitas untuk hiperbola didefinisikan sebagai berikut:

$$e = \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \quad (7)$$

Jarak dari titik H_{mn} terhadap perpotongan hiperbola dengan segmen garis mayor diberi simbol a , sedangkan jarak dari H_{mn} ke salah satu mikrofon diberi simbol c . Maka hubungan antara a , b , dan c adalah:

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (8)$$

Eksentrisitas dari hiperbola mencapai tak hingga jika titik potong hiperbola di H_{mn} . Semakin menjauh dari titik H_{mn} maka eksentrisitas akan semakin kecil. Untuk titik yang berada di segmen garis mayor yang semakin dekat ke mikrofon maka eksentrisitas akan semakin mendekati 1 atau mendekati parabola. Dengan memakai

definisi di persamaan 7 dan 8 di atas maka titik yang berada di dekat mikrofon atau di garis perpanjangan segmen garis mayor tidak memenuhi syarat hiperbola.

Untuk keperluan pemilihan pasangan mikrofon bisa dipilih pasangan yang TDOA nya kecil karena eksentrisitasnya akan semakin besar. Karena itu hasil dari TDOA semua pasangan diurutkan dari yang paling kecil norm nya sampai ke yang paling besar. Untuk kasus 2 dimensi cukup pilih dua buah pasangan mikrofon yang paling kecil TDOA nya. Sementara untuk 3 dimensi perlu dipilih tiga pasang mikrofon.

Penelusuran Hiperbola

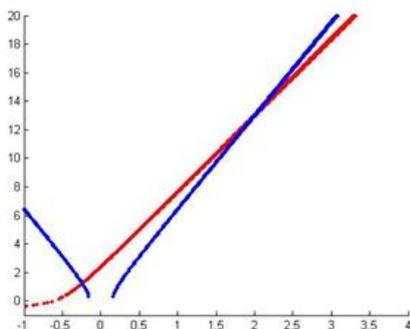
Penelusuran hiperbola dilakukan dengan cara menebar partikel kemudian melakukan eliminasi terhadap partikel yang tidak memenuhi syarat. Syarat yang harus dipenuhi dapat diambil dari dua persamaan. Yaitu beda jarak sebagai fungsi waktu dan beda jarak sebagai fungsi posisi sensor.

Beda jarak sebagai fungsi waktu adalah hasil pengukuran. Informasi ini seperti telah dibahas sebelumnya, didapat dari membandingkan sinyal yang ditangkap oleh sensor. Besarnya beda jarak yang disimpan sebagai pembanding saat eliminasi partikel. Kedua persamaan tersebut dinyatakan dalam Persamaan 9 dan 10.

$$d = v \cdot \hat{t}_{mn} \quad (9)$$

$$d = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2} - \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} \quad (10)$$

Hasil simulasi dengan sumber suara yang terletak di (2,3) diberikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Simulasi

Perlu diperhatikan bahwa penyebaran partikel seperti ini hanya optimal jika ruang solusi terbatas. Misalnya dalam aplikasi *indoor*. Sementara untuk aplikasi *outdoor* di mana ruang solusi memiliki jarak yang sangat jauh, penyebaran partikel sudah tidak lagi optimal karena menjadi terlalu banyak dan lama dalam proses eliminasinya.

4. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi diperoleh informasi bahwa metode yang diusulkan dapat digunakan untuk melakukan estimasi posisi sumber suara. Metoda ini dapat membantu mereduksi ruang solusi.

Metode ini dapat digabungkan dengan metoda yang sudah ada sebelumnya terutama untuk verifikasi estimasi posisi sumber suara. Setelah memakai metoda ini maka dua akar persamaan kuadratik bisa dipilih langsung tanpa harus memperhatikan ruang yang menjadi pusat perhatian atau penambahan sensor verifikator.

Kelemahannya adalah dari sisi penyebaran partikel yang cukup banyak. Saat aplikasi *indoor* masih bisa diperoleh waktu operasi optimal. Tetapi saat aplikasi *outdoor*, waktu operasi sudah tidak optimal karena terlalu banyak partikel yang harus diverifikasi untuk proses eliminasi.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah optimalisasi penyebaran partikel agar masih mungkin digunakan untuk aplikasi *outdoor*.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Harbi F. A. dan H. J. Helgert, 2010, "An Improved Chan-Ho Location Algorithm for TDOA Subscriber Position Estimation," *IJCSNS*, vol. 10, no. 9, p. 101, 2010.
- Bucher R. dan Misra D. 2002, "A synthesizable VHDL model of the exact solution for three-dimensional hyperbolic positioning system," *Vlsi Des.*, vol. 15, no. 2, pp. 507-520.
- Chan Y.T. dan Ho K. C., "A simple and efficient estimator for hyperbolic

- location,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 42, no. 8, pp. 1905–1915, 1994.
- Dufaux A., 2001, “Detection and recognition of impulsive sounds signals,” Dissertation, University of Neuchatel, Switzerland.
- En-Hua L., X. Ke-Ming, dan J. Yu, 2015, “Study of the Improved Location Algorithm Based on Chan and Taylor,” Open Cybern. Syst. J., vol. 9, pp. 2158–2162.
- S. A. Zekavat and R. M. Buehrer, 2012, Eds., Position location: theory, practice and advances. Hoboken, N.J: Wiley-IEEE Press.