

Penerapan Algoritma Sistem Semut untuk Penjejakan Multi Target pada Sistem Radar Multi Sensor

Ifan Wiranto^{#1}, Zainudin Bonok^{#2}

[#]Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Gorontalo
Jl. Jend. Soedirman no. 6, Kota Gorontalo, Indonesia

¹ifan_te@ung.ac.id

²zainudin_bonok67@yahoo.com

Abstrak— Pada sistem radar multi-sensor, beberapa dari hasil pengukuran sensor bisa tidak benar, yang disebabkan adanya kejadian tanda palsu dan *miss detection*. Sehingga jumlah target dan yang mana hasil pengukuran yang berasal dari target tidak diketahui secara pasti. Permasalahan menjadi bagaimana menentukan jumlah target, dimana dalam hasil pengukuran bercampur antara pengukuran yang benar (berasal dari target) dan yang tidak benar (tanda palsu). Masalah ini dikenal sebagai masalah penugasan multidimensi. Untuk menyelesaikan masalah ini diperlukan suatu metode heuristik. Dalam makalah ini ditawarkan metode Sistem Semut (*Ant System*) untuk menyelesaikan masalah penugasan multidimensi tersebut. Tiga lintasan target berbeda digunakan dalam simulasi menggunakan tiga radar identik. Diperoleh bahwa algoritma *Ant System* mampu memisahkan antara target benar dan tanda palsu.

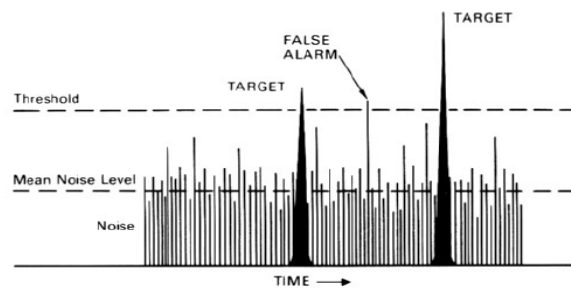
Kata kunci— penjejakan multi target, sistem semut, radar multi-sensor

I. PENDAHULUAN

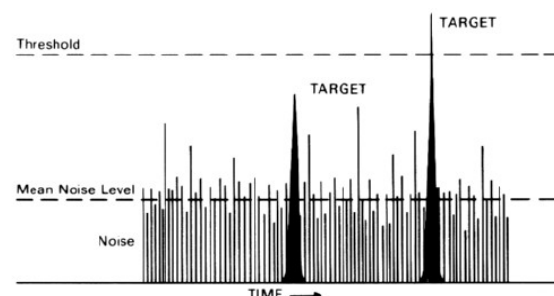
Integrasi atau penggabungan data dari beberapa sensor telah diketahui dapat meningkatkan ketelitian dalam aplikasi penjejakan target, pengawasan wilayah, atau dalam aplikasi yang bukan bidang pertahanan seperti monitoring proses industri dan diagnosis medik.[1]

Pada suatu sistem radar yang terdiri dari beberapa sensor, setiap sensor dalam sekali putaran (*scan*) akan menghasilkan informasi berupa titik (*plot*) dari obyek (misalkan pesawat terbang) yang melintas di wilayah cakupan sensor tersebut. Untuk memasang titik-titik yang berkorespondensi dengan satu obyek yang sama dalam setiap *scan* diperlukan proses penjejakan. Hasil dari proses penjejakan tersebut adalah lintasan obyek yang pada prinsipnya berupa posisi dan kecepatan dari titik tersebut. Selanjutnya lintasan obyek yang dihasilkan oleh proses penjejakan itu akan diteruskan pada suatu tampilan sistem.

Permasalahan yang ada dalam setiap sensor adalah adakalanya besar tegangan nois dalam sebuah sensor melebihi ambang deteksi (*detection threshold*). Apabila ini terjadi maka nois tersebut akan terindikasikan sebagai target. Kejadian ini disebut sebagai tanda palsu (*false alarm*). Sebaliknya apabila besar tegangan sinyal dari target kurang dari ambang deteksi maka sensor tidak dapat mendeteksi target. Kejadian ini disebut sebagai *miss detection*. Munculnya *false alarm* diperlihatkan pada Gambar 1.[2], serta kejadian *miss detection* diperlihatkan pada Gambar.2.[2]



Gambar 1. Kejadian *false alarm*



Gambar 2. Kejadian *miss detection*

Oleh karena itu, persoalan yang muncul dalam sebuah sistem radar multi sensor adalah bagaimana menentukan jumlah target yang benar, dimana

dalam hasil pengukuran bercampur antara pengukuran yang benar (berasal dari target) dan pengukuran yang tidak benar (*false alarm*). Masalah ini diketahui sebagai masalah penugasan multidimensi (*multidimensional assignment problem*), dan untuk menyelesaikan masalah ini diperlukan suatu algoritma pendekatan heuristik. Beberapa penelitian untuk penjejakkan sasaran jamak berbasis pada metodologi pencarian untuk menyelesaikan *multidimensional assignment problem* telah dilakukan. Dalam penelitian-penelitian ini menggunakan *genetic algorithm*[3], dan *tabu search*[4]. Dalam beberapa penelitian yang menerapkan metodologi pencarian, yaitu *genetic algorithm (GA)*, *simulated annealing (SA)*, dan *ant colony optimization (ACO)*, untuk *traveling salesman problem* menunjukkan bahwa *ACO* menghasilkan solusi yang lebih baik dibandingkan dengan algoritma yang lainnya.[5]

Ant Colony Optimization adalah suatu konsep baru dalam kecerdasan buatan, yang merupakan model perilaku semut yang diketahui dapat menemukan jarak terpendek antara sarang dan sumber makanan mereka.

Pada makalah ini akan diuraikan bagaimana suatu sistem multi sensor mengkombinasikan data pengamatan dari beberapa sensor dan suatu metode yang disarankan untuk memisahkan antara pengukuran yang berasal dari target dan tanda palsu.

II. MULTI SENSOR UNTUK PENJEJAKAN MULTI TARGET

Andaikan terdapat N sensor yang digunakan untuk menemukan target dalam suatu wilayah. Misalkan ada sejumlah target t (t tidak diketahui) dalam wilayah pengamatan tersebut, dan posisi dari target t tersebut adalah $\theta = (x_t, y_t, z_t)$. Peluang deteksi dari sensor s adalah P_{ds} . Misalkan bahwa jumlah pengukuran dari sensor s adalah n_s , $s=1,2,3,\dots,N$. Hasil pengukuran sensor s dinyatakan sebagai $z_{s i_s}$, $i_s=1,2,3,\dots,n_s$; dan dianggap bahwa pengukuran tersebut adalah berasal dari target sebenarnya ditambah nois Gaussian $N(0, \sigma_s^2)$.

Suatu target mungkin saja tidak terdeteksi atau muncul tanda palsu pada setiap *scan*. Untuk mempermudah notasi dalam menggambarkan tanda

palsu dan juga untuk asosiasi pengukuran target yang tidak lengkap disebabkan oleh kehilangan deteksi (*miss detection*) tersebut, sebuah pengukuran *dummy* z_{s0} ($i_s=0$) ditambahkan pada setiap himpunan pengukuran dari masing-masing sensor. Suatu tanda palsu dari suatu himpunan data $Z(k)$ dinyatakan sebagai Z_{γ_i} dengan $\gamma_i = (0,0, \dots, 0, i_k, 0, \dots, 0,0)$, dan *miss detection* dinyatakan sebagai Z_{γ_i} dengan $\gamma_i = (i_1, i_2, \dots, i_{k-1}, 0, i_{k+1}, \dots, i_{N-1}, i_N)$.

Fungsi *cost* untuk mengasosiasikan suatu pengukuran N -tuple dengan suatu target t diberikan oleh

$$c_{i_1, i_2, \dots, i_N} = \sum_{s=1}^N \{u(i_s) \left[\frac{1}{2} [Z_{i_s} - \hat{\theta}]^T \sigma^{-2} [Z_{i_s} - \hat{\theta}] + \ln \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{P_{ds} \cdot \Psi_s} \right] - (1 - u(i_s)) \ln [1 - P_{ds}] \} \quad (1)$$

Dengan $u(i_s)$ adalah fungsi indikator, yang mengindikasikan bahwa jika $i_s \neq 0$, yaitu sensor s mendeteksi target t , maka $u(i_s)=1$, sebaliknya jika $i_s=0$, yaitu sensor s tidak mendeteksi target t , maka $u(i_s)=0$. $\hat{\theta}$ adalah rerata pengukuran, Ψ_s adalah volume dari wilayah pengamatan (*field of view*) sensor s .

Tujuannya adalah bahwa suatu pengukuran menyatakan sebuah target atau menyatakan tanda palsu, dan setiap pengukuran ditugaskan hanya untuk satu target, maka masalah ini dapat diformulasikan menjadi masalah penugasan multidimensi berikut [6]

meminimumkan:

$$\sum_{i_1=0}^{n_1} \sum_{i_2=0}^{n_2} \dots \sum_{i_N=0}^{n_N} c_{i_1, i_2, \dots, i_N} \chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} \quad (2)$$

dengan kendala:

$$\sum_{i_2=0}^{n_2} \dots \sum_{i_N=0}^{n_N} \chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} = 1, \quad i_1 = 1, \dots, n_1$$

$$\sum_{i_1=0}^{n_1} \dots \sum_{i_{k-1}=0}^{n_{k-1}} \sum_{i_{k+1}=0}^{n_{k+1}} \dots \sum_{i_N=0}^{n_N} \chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} = 1,$$

untuk $i_k = 1, \dots, n_k$ dan $k = 2, 3, \dots, N-1$

$$\sum_{i_2=0}^{n_2} \dots \sum_{i_{N-1}=0}^{n_{N-1}} \chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} = 1, \quad i_N = 1, \dots, n_N$$

$$\chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} \in \{0, 1\} \quad \text{untuk semua } i_1, \dots, i_N$$

dimana $\chi_{i_1, i_2, \dots, i_N}$ adalah peubah asosiasi biner, sedemikian hingga $\chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} = 1$ jika pengukuran N-tuple diasosiasikan dengan suatu kandidat target. Sebaliknya, jika N-tuple bukan merupakan kandidat target $\chi_{i_1, i_2, \dots, i_N} = 0$.

III. SISTEM SEMUT UNTUK MENEMUKAN TARGET

Sistem semut (*ant system*) adalah salah satu algoritma dari metode *ACO* yang terinspirasi dari perilaku koloni semut untuk menemukan jarak terpendek antara sarang dan sumber makanan mereka. Beberapa penelitian penerapan *ACO* telah dilakukan, di antaranya adalah untuk solusi masalah rute kendaraan [7], *tuning* kontroler PI pada motor induksi tiga fase [8], kompensasi harmonik [9], dan untuk *mobile ad-hoc networks* [10]. Pada makalah ini ditawarkan metode *ACO* untuk menemukan target benar. Berikut adalah algoritma sistem semut untuk menemukan target yang benar.

Pada masalah penugasan multidimensi pada persamaan (1) dan (2), tujuannya adalah menemukan kemungkinan terbesar bahwa setiap pengukuran ditugaskan untuk satu target atau menyatakan pengukuran tersebut adalah tanda palsu. Kemungkinan terbesar yang menyatakan bahwa suatu pengukuran adalah target dinyatakan dengan *cost* yang kecil. Jumlah *cost* yang minimum menyatakan bahwa titik-titik tersebut adalah kandidat target atau tanda palsu. Dengan demikian, masalah asosiasi data tersebut, dapat direpresentasikan dengan himpunan titik-titik *cost*, dimana setiap titik-titik tersebut menyatakan target yang mungkin. Oleh karena itu, dalam menyelesaikan masalah di atas menggunakan optimisasi koloni semut, semut akan bergerak menuju titik-titik yang diijinkan (kendala pada persamaan (2)) sehingga mencapai jumlah *cost* minimum.

Berikut ini akan dijelaskan proses pencarian oleh semut:

Pada siklus pertama, langkah awal adalah semut-semut (jumlah semut ditentukan sembarang) diletakkan secara acak pada titik-titik yang berbeda. Selanjutnya hingga akhir siklus pertama, semut akan berpindah dari titik *i* ke titik *j* (yang diijinkan) dengan mempertimbangkan *visibility*, yaitu

$$\eta_j = \frac{1}{c_j} \quad (3)$$

dengan C_j adalah *cost* titik *j*. Semut akan menuju ke titik yang nilai *visibility*-nya terbesar. Titik-titik yang tidak diijinkan disimpan dalam tabu list. Setelah selesai satu siklus, isi dari tabu list direset.

Setiap selesai satu siklus, semut akan meninggalkan jejak feromon pada setiap titik yang dikunjunginya. Setelah menyelesaikan satu siklus, semut akan mati dan digantikan semut baru dengan jumlah yang sama.

Pada siklus kedua dan seterusnya, semut-semut baru diletakkan pada salah satu titik yang telah dikunjungi oleh semut pada siklus sebelumnya, dan akan berpindah dari titik *i* ke titik *j* (yang diijinkan) berdasarkan pada suatu fungsi peluang, dinamai sebagai aturan transisi status, yaitu

$$p_j(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_j(t)]^\alpha [\eta_j]^\beta}{\sum_{j \in \text{dijinkan}} [\tau_j(t)]^\alpha [\eta_j]^\beta} ; & \text{jika } j \in \text{dijinkan} \\ 0 ; & \text{jika sebaliknya} \end{cases} \quad (4)$$

dengan $\tau_j(t)$ adalah jumlah feromon semut pada titik *j* pada saat *t*. Parameter α dan β digunakan untuk mengendalikan tingkat kepentingan relatif dari feromon dan *visibility*. Dengan demikian, setelah suatu semut menyelesaikan perjalanannya dalam satu siklus, jumlah feromon akan diperbarui menjadi :

$$\tau_j(t + N) = \rho \tau_j(t) + \Delta \tau_j(t, t + N), \quad (5)$$

dengan ρ adalah suatu koefisien yang bernilai antara 0 sampai 1, sedemikian hingga $(1 - \rho)$ menunjukkan penguapan feromon, dan

$$\Delta \tau_j(t, t + N) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_j^k(t, t + N), \quad (6)$$

dengan $\Delta \tau_j^k(t, t + N)$ adalah feromon yang ditinggalkan oleh semut *k* pada titik *j*, pada saat antara *t* sampai $(t+N)$, yang ditentukan sebagai berikut :

$$\Delta \tau_j^k(t, t + N) = \begin{cases} \frac{1}{L^k} ; & \text{jika } j \in \text{perjalanan } k \\ 0 ; & \text{jika sebaliknya} \end{cases} \quad (7)$$

dengan L^k adalah jumlah *cost* pada perjalanan yang dilakukan oleh semut *k*. *N* adalah jumlah titik yang dikunjungi oleh setiap semut dalam satu siklus.

Jumlah titik yang dikunjungi oleh setiap semut dalam satu siklus (N) adalah $= 1 + \sum_{i=1}^s n_i$. Dimana n_i adalah jumlah pengukuran pada sensor ke- i dan s adalah jumlah sensor.

Jumlah feromon pada saat $t=0$ untuk setiap titik yaitu $\tau_j(0)$, ditentukan sama dengan nilai *visibility*-nya.

Algoritma akan berhenti jika semua semut telah menjalani rute yang sama.

IV. SIMULASI

Dalam pemodelan sistem radar, diandaikan bahwa sistem radar menggunakan tiga sensor untuk menemukan target. Jumlah pengukuran dari setiap sensor dinyatakan sebagai n_s , dengan $s=1,2,3$. Hasil pengukuran setiap sensor dinyatakan sebagai Z_{si_s} , $i_s = 1,2,3, \dots, n_s$. Dengan demikian, masalah asosiasi data dapat diformulasikan sebagai masalah penugasan multidimensi berikut,

$$c_{i_1, i_2, i_3} = \sum_{s=1}^3 \{u(i_s) \left[\frac{1}{2} [Z_{i_s} - \hat{\theta}]^T \sigma^{-2} [Z_{i_s} - \hat{\theta}] + \ln \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{P_{ds} \Psi_s} \right] - (1 - u(i_s)) [1 - P_{ds}] \}, \quad (8)$$

meminimumkan:

$$\sum_{i_1=0}^{n_1} \sum_{i_2=0}^{n_2} \sum_{i_3=0}^{n_3} c_{i_1, i_2, i_3} \chi_{i_1, i_2, i_3} \quad (9)$$

dengan kendala:

$$\sum_{i_2=0}^{n_2} \sum_{i_3=0}^{n_3} \chi_{i_1, i_2, i_3} = 1, \quad i_1 = 1, \dots, n_1$$

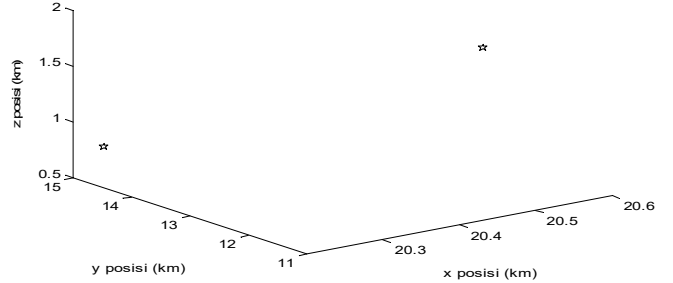
$$\sum_{i_1=0}^{n_1} \sum_{i_3=0}^{n_3} \chi_{i_1, i_2, i_3} = 1, \quad i_2 = 1, \dots, n_2$$

$$\sum_{i_1=0}^{n_1} \sum_{i_2=0}^{n_2} \chi_{i_1, i_2, i_3} = 1, \quad i_3 = 1, \dots, n_3$$

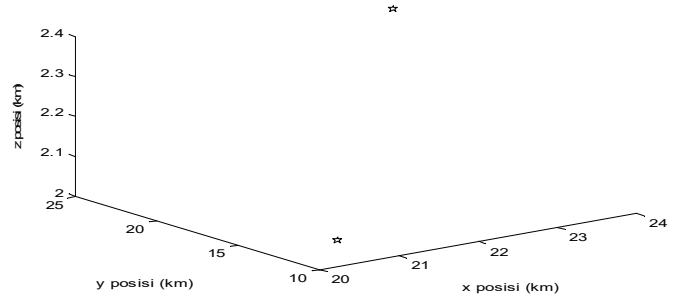
$$\chi_{i_1, i_2, i_3} \in \{0, 1\} \quad \text{untuk semua } i_1, i_2, i_3$$

Masalah penugasan multidimensi di atas akan diselesaikan dengan menggunakan metode optimisasi koloni semut untuk mendapatkan jumlah target (memisahkan antara target yang benar dan tanda palsu).

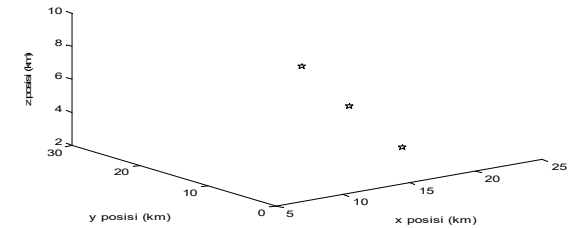
Diandaikan bahwa dalam observasi yang dilakukan oleh tiga sensor pada *scan* pertama, sensor1 memperoleh hasil pengukuran seperti diperlihatkan pada Gambar 3., sensor2 memperoleh hasil pengukuran seperti diperlihatkan pada Gambar 4., dan sensor3 memperoleh hasil pengukuran seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Penggabungan dari hasil pengukuran ketiga sensor tersebut diperlihatkan pada Gambar 6.



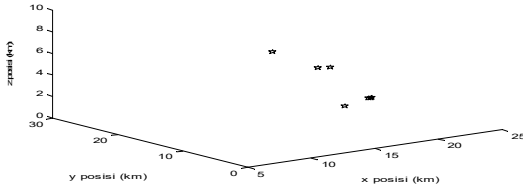
Gambar 3. Pengukuran oleh sensor1 pada scan pertama



Gambar 4. Pengukuran oleh sensor2 pada scan pertama



Gambar 5. Pengukuran oleh sensor3 pada scan pertama



Gambar 6. Penggabungan hasil pengukuran oleh sensor1, sensor2 dan sensor3 pada scan pertama

Langkah berikutnya adalah memisahkan antara pengukuran yang berasal dari target dan tanda palsu. Algoritma sistem semut digunakan untuk pemisahan tersebut dengan parameter-parameter yang digunakan adalah $\rho=0,9$, $\alpha=1$, $\beta=1$, dan jumlah semut adalah 6. Menggunakan persamaan (8), diperoleh harga-harga *cost* sebagai berikut:

```
cost(:,1) =
8,8364e+005 1,7091e+006 8,7409e+005
7,3644e+005 1,708e+006 6,8193e+005
6,7575e+005 1,7831e+006 26931

cost(:,2) =
48721 4,7693e+005 2,691e+005
76,453 5,7434e+005 2,1885e+005
2,1849e+005 7,5381e+005 75554

cost(:,3) =
2,6051e+005 2,6455e+005 4,1274e+005
3,2025e+005 4,7036e+005 5,1856e+005
5,2306e+005 4,4758e+005 1,2529e+005

cost(:,4) =
2,7127e+005 5,9118e+005 87430
2,1969e+005 7,4992e+005 76392
76145 1,5899e+005 11,736
```

Harga-harga feromon awal diperoleh:

```
feromon(:,1) =
1,1317e-006 5,851e-007 1,144e-006
1,3579e-006 5,8549e-007 1,4664e-006
1,4798e-006 5,6082e-007 3,7131e-005

feromon(:,2) =
2,0525e-005 2,0967e-006 3,7161e-006
0,01308 1,7411e-006 4,5694e-006
4,5768e-006 1,3266e-006 1,3236e-005

feromon(:,3) =
3,8387e-006 3,78e-006 2,4229e-006
3,1225e-006 2,126e-006 1,9284e-006
1,9118e-006 2,2343e-006 7,9817e-006

feromon(:,4) =
3,6863e-006 1,6915e-006 1,1438e-005
4,5519e-006 1,3335e-006 1,309e-005
```

1,3133e-005 6,2896e-006 0,085207

Pada siklus pertama, posisi awal semut diletakkan sembarang pada titik yang berbeda. Selanjutnya hingga akhir siklus pertama, semut akan berpindah dari titik *i* ke titik *j* (yang diijinkan) dengan mempertimbangkan jumlah feromon terbesar. Perjalanan semut-semut untuk siklus pertama diperoleh:

siklus awal =

```
semut1: 27 36 11 30 35 18 9 34
semut2: 2 36 30 35 18 27 9 34
semut3: 3 36 11 35 18 27 34 33
semut4: 4 36 11 30 35 18 27 9
semut5: 29 36 18 27 9 34 33 10
semut6: 34 36 11 30 35 18 27 9
```

Angka-angka di atas mengacu pada penomoran titik-titik kunjungan sebagai berikut,

```
Titik(:,1) =
1 4 7
2 5 8
3 6 9

Titik(:,2) =
10 13 16
11 14 17
12 15 18

Titik(:,3) =
19 22 25
20 23 26
21 24 27

Titik(:,4) =
28 31 34
29 32 35
30 33 36
```

Pada siklus kedua dan seterusnya, posisi awal semut baru diletakkan pada titik kunjungan terakhir siklus semut sebelumnya, dan akan berpindah dari titik *i* ke titik *j* (yang diijinkan) berdasarkan aturan transisi status. Setiap berakhir satu siklus, nilai feromon dihitung berdasarkan persamaan-persamaan (5), (6), dan (7). Algoritma berhenti jika semua semut telah menjalani rute yang sama.

Perjalanan semut-semut pada siklus terakhir diperoleh:

Siklus akhir =

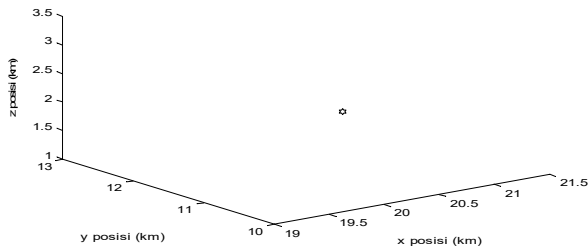
```
semut1: 11 36 18 35 27 30 9 34
semut2: 11 36 18 35 27 30 9 34
semut3: 11 36 18 35 27 30 9 34
semut4: 11 36 18 35 27 30 9 34
```

semut5: 11 36 18 35 27 30 9 34
 semut6: 11 36 18 35 27 30 9 34

Berdasarkan hasil perjalanan semut pada siklus terakhir tersebut, titik-titik kunjungan semut pada siklus terakhir (ditandai dengan angka 1), dapat dinyatakan sebagai berikut:

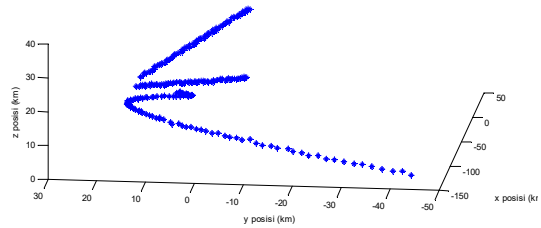
(:,:,1) =
 0 0 0
 0 0 0
 0 0 (1)
 (:,:,2) =
 0 0 0
 1 0 0
 0 0 (1)
 (:,:,3) =
 0 0 0
 0 0 0
 0 0 (1)
 (:,:,4) =
 0 0 (1)
 0 0 (1)
 (1) (0) (1)

Tanda kurung menyatakan titik-titik pada daerah tanda palsu. Angka 1 bertanda kurung menunjukkan tanda palsu, sedangkan angka 1 yang tidak bertanda kurung menunjukkan hasil pengukuran yang berasal dari target. Jadi, pengukuran N-tuple yang berasal dari target terletak pada titik (2,1,2), yang nilai teratannya diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Titik terpilih menggunakan Optimisasi Koloni Semut

Gambar 8. memperlihatkan hasil pengukuran terpilih setelah menjalankan algoritma sistem semut terpilih setelah menjalankan algoritma sistem semut terpilih hingga 100 scan.



Gambar 8. Hasil pengukuran terpilih hingga 100 scan

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil diterapkan algoritma sistem semut untuk menyelesaikan masalah penugasan multidimensi yang terjadi pada sistem radar multi sensor. Sistem semut mampu menentukan yang mana hasil pengukuran yang berasal dari target dan mana yang merupakan tanda palsu. Penelitian dilakukan untuk tiga target dengan manuver yang berbeda.

Tahapan selanjutnya yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah mengestimasi keadaan target yaitu posisi, kecepatan dan percepatan masing-masing target.

REFERENSI

- [1] D.L. Hall and J. Llinas, *Multisensor Data Fusion, Handbook of Multisensor Data Fusion*, New York, CRC Press, 2001, hal. 1-10
- [2] G.W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar, 2nd Ed.*, New York, Scitech Publishing Inc., 1998.
- [3] G. Chen, L. Hong, *A Genetic Algorithm based Multi-dimensional Data Association Algorithm for Multi-sensor Multi-target Tracking*, Pergamon, Mathl. Comput. Modelling, 1997, Vol. 26, No. 4: hal. 57-69.
- [4] I. Turkmen, K. Guney *Tabu search tracker with adaptive neuro-fuzzy inference system for multiple target tracking*, Progress In Electromagnetics Research, PIER , 2006, hal. 169-185.
- [5] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: from natural to artificial systems*, New York, Oxford University Press, 1999.
- [6] R.L. Popp, K.R. Pattipati, Y. Bar-Shalom, *m-Best S-D Assignment Algorithm with Application to Multitarget Tracking*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, Vol. 37, No. 1, hal. 22-39.
- [7] T. Pellonpera, *Ant Colony Optimization and The Vehicle Routing Problem*, University of Tampere, School of Informatics Sciences, 2014, M.Sc. Thesis.
- [8] J. Kour, S. Tiwari, *Performance Comparison of Variants of Ant Colony Optimization Technique for Online Tuning of a PI Controller for a Three Phase Induction Motor Drive*, International Journal of Computer Science and Information Technologies, 2014, Vol. 5(4), hal. 5814-5820.
- [9] A.K. Tiwari, S.P. Dubey, *Ant Colony Optimization Based Hybrid Active Power Filter for Harmonic Compensation*, International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, 2016.
- [10] S. Jena, J.K. Lakra, *Application of Ant Colony Optimization Technique for MANETS*, National Institute of Technology Rourkela, 2009, Bachelor Thesis.