

Kendali Formasi Mobile Robot Berdasarkan Jarak Menggunakan Algoritma *Cosinus*

ANGGORO DWI NUR ROHMAN¹, M. AZIZ MUSLIM², BAMBANG SISWOJO³

^{1,2,3}Program Studi Magister, Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Indonesia
Email : anggoro_dwi@student.ub.ac.id

Received 30 November 201x | *Revised* 30 Desember 201x | *Accepted* 30 Januari 201x

ABSTRAK

Kendali formasi adalah topik penelitian kendali multi-robot, dimana sekelompok robot dapat mencapai formasi tertentu dan mempertahankannya ketika berpindah ke arah yang diinginkan. Salah satu pengembangan kendali formasi adalah kendali formasi berdasarkan jarak dimana setiap individu robot menggunakan informasi jarak antar sesamanya untuk mencapai tujuan formasi. Banyak pengembangan yang dilakukan pada kendali formasi berdasarkan jarak menggunakan model yang sederhana dan membutuhkan pengembangan lebih lanjut untuk penerapan kendali ke model yang lebih nyata. Ketika penerapan kendali formasi berdasarkan jarak, terdapat permasalahan kondisi awal yaitu robot tidak dapat menentukan koordinat tetangganya apabila menggunakan informasi jarak saja. Pada penelitian ini dikembangkan algoritma cosinus sebagai solusi untuk kondisi awal. Algoritma cosinus terinspirasi dari rumus segitiga sederhana dan mengharuskan robot melakukan dua langkah saja untuk dapat menemukan koordinat tetangganya. Dari hasil percobaan simulasi, kendali formasi berdasarkan jarak menggunakan model robot holonomic dan algoritma cosinus cukup baik untuk menemukan koordinat tetangganya yaitu dengan rata-rata waktu 6.5 detik.

Kata kunci: *Kendali Formasi, Multi-Robot, Algoritma Cosinus, Mobile Robot.*

ABSTRACT

Formation control is a research topic of multi-robot control, where a group of robots can reach a certain formation and defend it when moving in the desired direction. One of the developments is distance-based where formation goals achieved using the distance between each other only. Many developments are using a simple model and need further development into a realistic model. When applying distance-based, there is a problem in the initial condition, namely that the robot cannot find the coordinates of its neighbors when using only distance. In this work, the cosine algorithm was developed as a solution to the initial conditions which are inspired by a simple triangle formula and need only two steps to find the coordinates. From the simulation experiment results, the distance-based formation control using the holonomic robot model and the cosine algorithm is good enough to find the coordinates with an average time of 6.5 seconds.

Keywords: *Formation Control, Multi-robot, Cosine Algorithm, Mobile Robot.*

1. PENDAHULUAN

Kendali formasi adalah topik penelitian kendali multi-robot untuk memecahkan permasalahan koordinasi pergerakan. Kendali formasi bertujuan untuk mengendalikan sekelompok robot dalam mencapai formasi tertentu dan dapat mempertahankan formasi tersebut ketika bermanuver menuju arah yang diinginkan. Dari penjabaran oleh Guanghua (Guanghua et al., 2013), pengembangan kendali formasi dilakukan dari beberapa algoritma strategi. Seperti yang dikembangkan oleh Wang (Wang et al., 2014) menggunakan strategi *leader-follower*, menggunakan *Fuzzy-Logic* sebagai tingkah laku robot oleh Ferik (Ferik et al., 2016) dan menggunakan *struktur virtual* dimana sekelompok robot memiliki titik referensi sebagai satu robot oleh Xuen-ren (Li et al., 2015).

Penjabaran oleh Kwang-Kyo (Oh et al., 2015) bahwa dari berbagai pengembangan kendali formasi dapat diambil garis besar menjadi 3 bagian, yaitu berdasarkan posisi, perpindahan, dan jarak. Ketiga bagian tersebut tertuju pada jawaban dari pertanyaan, "variable apa yang digunakan sebagai sensor" dan "variabel apa yang aktif dikendalikan oleh sistem multi-robot untuk mencapai formasi yang diinginkan". Dikhususkan pada kendali formasi berdasarkan jarak, variabel yang dikendalikan adalah variabel jarak antar agent yang terhubung dan koordinat yang digunakan tidak mengacu pada koordinat global. Sehingga pada penerapannya, formasi berdasarkan jarak menggunakan sensor yang lebih sedikit dibanding dengan posisi dan perpindahan. Namun salah satu permasalahan pada metode tersebut adalah penerapan model yang lebih nyata. Pengembangan formasi berdasarkan jarak telah dikembangkan menggunakan teori graph dengan model sederhana pada *single* dan *double integrator* oleh Kwang-Kyo (Oh & Ahn, 2014), menggunakan informasi jarak untuk mengendalikan model sederhana *double integrator* oleh Xiaoyu (Cai & de Queiroz, 2014), menggunakan konsensus antara robot untuk mencapai bentuk formasi pada model *single integrator* sederhana Oleh Deghat (Deghat et al., 2016), mengendalikan bentuk formasi menggunakan *adaptive control* untuk mengestimasi kecepatan tetangga dari model robot yang sederhana oleh Sung-Mo (Kang et al., 2014), menggabungkan kendali formasi berdasarkan jarak dan perpindahan untuk mengendalikan model robot yang sederhana oleh Myoung-Chul (Park & Ahn, 2015), dan menggunakan kendali *Proportional-Integral* (PI) untuk mengendalikan jarak setiap model robot yang sederhana oleh Rozenheck (Rozenheck et al., 2015).

Kendali PI pada penelitian oleh Rozenheck (Rozenheck et al., 2015) tidak dapat langsung diterapkan menggunakan sensor jarak karena kendali tersebut mengambil informasi jarak menggunakan selisih dari koordinat global kartesian setiap robot. Sedangkan dalam praktiknya robot hanya bisa mengukur jarak dan tidak mengetahui koordinat dari robot tetangganya. Selain itu, informasi jarak adalah besaran yang tidak memiliki arah sehingga robot diharuskan untuk mengetahui koordinat tetangganya untuk mencapai jarak yang diinginkan.

Penelitian ini akan menggunakan asumsi sensor jarak *Ultra-wide band* (UWB) yang terinspirasi dari penelitian oleh Qiang (Qiang et al., 2017a) dimana sensor UWB dipasang pada robot untuk mengendalikan formasi robot. Sensor UWB kerap digunakan untuk mendeteksi lokasi seperti pada penelitian oleh Kexing (Guo et al., 2020) dimana sensor UWB menggantikan sensor berbasis *vision* dan penerapan sensor UWB oleh Qiang (Qiang et al., 2017b) untuk mendeteksi lokasi dimana UWB dipasang secara statis sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan sekelompok robot secara terpusat. Pada penelitian ini akan dikembangkan sebuah algoritma untuk menemukan koordinat tetangga menggunakan informasi jarak dan digunakan untuk mengetahui koordinat tetangga pertama kali sebelum menjalankan kendali formasi berdasarkan jarak. Percobaan akan menggunakan model robot *holonomic* dengan harapan

menjadi langkah awal untuk mengembangkan kendali formasi berdasarkan jarak menggunakan model robot yang lebih nyata.

2. METODE

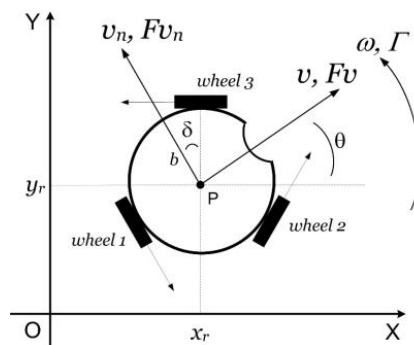
2.1 Model Robot

Robot menggunakan tiga buah motor yang dihubungkan pada *omniwheel* sehingga robot dapat bergerak kesegala arah (Gambar 1). Berikut adalah model dari robot *holonomic* dalam bentuk *state-space* (Correia et al., 2012).

$$\dot{x}(t) = A_r x(t) + B_r u(t) + K_r \text{sgn}(x(t)) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

Dimana vector $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t)]^T$ adalah masukan model bersatuan *volt* yang memiliki tegangan motor $-6 \leq u_i \leq 6$ *volt*. Vektor $y(t) = x(t) = [v(t) \ v_n(t) \ w(t)]^T$ adalah kecepatan robot yang akan diperoleh dari sensor percepatan, dimana v adalah kecepatan robot bergerak maju/mundur atau koordinat x berdasarkan kerangka robot, v_n adalah kecepatan robot untuk menyamping kiri/kanan atau koordinat sumbu y berdasarkan kerangka robot, dan $w(t)$ adalah kecepatan rotasi dari kerangka robot. Matrix $A_r \in R^{3 \times 3}$ dan $B_r \in R^{3 \times 3}$ adalah parameter fisik robot yang diperoleh dari persamaan fisika. Matrix $K_r \in R^{3 \times 3}$ adalah parameter *friction* dari robot yang diestimasi dari hasil identifikasi sistem dengan cara percobaan.



Gambar 1. Geometri Rangka Robot (Correia et al., 2012)

2.2 Kendali Robot Holonomic

Kendali robot holonomic akan dibagi menjadi dua mode. Perbedaan kedua mode tersebut adalah *setpoint* kendalinya, dimana mode satu akan memiliki *setpoint* kecepatan koordinat kerangka robot sedangkan mode dua memiliki *setpoint* koordinat kerangka robot. Penjelasan lebih lengkap kegunaan dari kedua mode tersebut akan dijelaskan pada bab metode algoritma *cosinus*.

Mode Satu. Kendali robot mode satu bertujuan untuk robot mencapai kecepatan yang diinginkan. Untuk mencapai tujuan tersebut akan menggunakan metode *state-feedback* pada persamaan kendali nya.

$$u_{c1}(t) = -K_1^c x(t) + N_1^c r_1^c \quad (3)$$

$$N_1^c = -[C(A_r - B_r K_1^c)^{-1} B_r]^{-1} \quad (4)$$

Dimana vector $r_1^c = [v^* \ v_n^* \ w^*]$ adalah setpoint kendali mode satu, $K_1^c \in R^{3 \times 3}$ adalah konstanta yang diperoleh dari optimasi persamaan *Riccati* terhadap matriks A_r dan B_r pada persamaan (1), dan $N_1^c \in R^{3 \times 3}$ adalah konstanta yang diperoleh dari *inverse state-space* pada keadaan *steady state* yang menghasilkan persamaan (4(4)). Dengan menggabungkan persamaan (1) dan persamaan (3) akan mendapatkan persamaan *state-space* robot yang baru.

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c r_1^c + K_r \text{sgn}(x(t)) \quad (5)$$

$$A_c = (A_r - B_r K_1^c) \quad (6)$$

$$B_c = B_r N_1^c \quad (7)$$

Mode Dua. Kendali robot mode dua bertujuan untuk robot mencapai titik koordinat tertentu berdasarkan koordinat kerangkanya. Untuk mencapai tujuan tersebut akan memodifikasi persamaan (1) dengan menambah koordinat *frame* robot pada *state* nya. *State* robot menjadi $x_{c2}(t) = [x_r(t) \ y_r(t) \ \theta_r(t) \ v(t) \ v_n(t) \ w(t)]^T$. Berikut adalah *state-space* robot mode dua.

$$\dot{x}_{c2}(t) = A_{c2} x_{c2}(t) + B_{c2} u_{c2}(t) + K_{c2}(x_{c2}(t)) \quad (8)$$

$$y_{c2}(t) = C_{c2} x_{c2}(t) \quad (9)$$

$$A_{c2} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & A_r \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6} \quad (10)$$

$$B_{c2} = \begin{bmatrix} 0 & B_r \end{bmatrix} \in R^{6 \times 3} \quad (11)$$

$$K_{c2}(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_r \text{sgn}(x) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 3} \quad (12)$$

Untuk menentukan mendapatkan $u_{c2}(t)$ sebagai persamaan kendali pada persamaan (8), akan dilakukan metode yang sama seperti mode satu.

$$u_{c2}(t) = -K_2^c x_{c2}(t) + N_2^c r_2^c \quad (13)$$

Dimana $r_2^c = [x_r^* \ y_r^* \ \theta_r^* \ v^* \ v_n^* \ w^*]^T$ adalah setpoint kendali mode dua, $K_2^c \in R^{3 \times 6}$ adalah konstanta yang diperoleh dari optimasi persamaan *Riccati* terhadap matriks A_{c2} dan B_{c2} menggunakan persamaan (8) dan $N_2^c \in R^{3 \times 6}$ adalah konstanta yang diperoleh dari *inverse state-space* pada keadaan *steady state*.

2.3 Kendali Formasi Berdasarkan Jarak

Didefinisi sebuah *undirect graph* $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ terdiri dari himpunan simpul \mathcal{V} dan himpunan sisi $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$. Didefinisi $n \triangleq |\mathcal{V}|$ sebagai jumlah dari node dan $m \triangleq |\mathcal{E}|$ sebagai jumlah dari sisinya. Didefinisi $p = [x_1^T \ \dots \ x_n^T]^T \in R^{3n}$, dimana $x_i \in R^3$ dan $x_i \neq x_j$ untuk semua $i \neq j$. Dinotasikan vektor posisi relatif $e_k \triangleq x_j - x_i$ dan semua vector sisi $e = [e_1^T \ \dots \ e_m^T] \in R^{3m}$. Didefinisikan fungsi *Jacobian* sisi (Rozenheck et al., 2015)

$$R \triangleq \text{diag}(e_i^T)(E^T \otimes I_2) \in R^{m \times 3n} \quad (14)$$

Dimana $\text{diag}(A_i)$, I_2 , dan $E \in R^{n \times m}$ adalah $\text{diag}(A_i) \triangleq \text{blkdiag}\{A_1, \dots, A_n\} \in R^{np \times nq}$, matrik identitas 2×2 dan matrik *incidence* $\{0, \pm 1\}$ yang baris dan kolom matrik nya mengindikasikan

simpulnya dan sisinya. Kendali formasi mengadopsi dari penelitian sebelumnya (Oh & Ahn, 2014) dimana persamaan potensial didefinisikan sebagai berikut.

$$\Phi(e) = \frac{1}{2} \sum_{i \in \mathcal{V}} \|v_i\|^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \left(\|e_k\|^2 - d_k^2 \right)^2 \quad (15)$$

Lalu, *Gradient negative* dari persamaan (8) akan digunakan untuk masukan dari persamaan (4) dan diberikan konstanta *proportional*.

Pada peneliatn ini mengusulkan untuk mengubah model sederhana dari penelitian sebelumnya oleh Rozenheck (Rozenheck et al., 2015) menjadi model robot *holonomic pada* persamaan (5). Berikut adalah hasil persamaannya yang akan dijalankan secara simulasi.

$$\dot{p} = A_f p(t) + B_f \frac{\partial \Phi(e)}{\partial v} \quad (16)$$

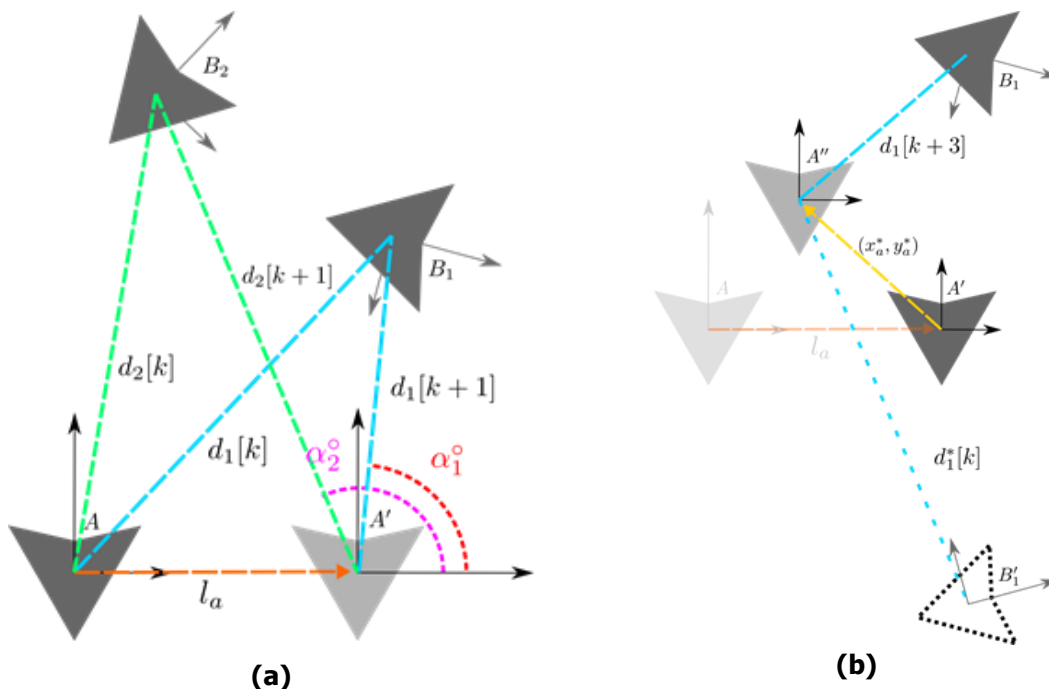
$$= A_f p(t) + B_f v(t)$$

$$\dot{v} = -C \left(\frac{\partial \Phi(e)}{\partial v} + \frac{\partial \Phi(e)}{\partial p} \right) \quad (17)$$

$$= -k_{p1} v(t) + R^T(p(t)) k_{p2} (R(p(t)) p(t) - d)$$

Dimana $A_f \in R^{3n \times 3n}$ dan $B_f \in R^{3n \times 3n}$ adalah matrix diagonal dari A_c dan B_c .

2.4 Algoritma *Cosinus*



Gambar 2. Strategi Algoritma *cosinus* pencarian koordinat tetangga

Telah didefinisi pada pendahuluan bahwa menggunakan informasi jarak saja robot tidak mengetahui koordinat tetangganya, sedangkan pada persamaan (16) dan (17), sebagai kendali formasi, membutuhkan state koordinat. Pada penelitian ini diusulkan sebuah algoritma

cosinus untuk menemukan *state* ketika kondisi awal. Algoritma *cosinus* membutuhkan robot untuk mengerjakan dua Langkah yang akan dijelaskan sebagai berikut.

Dinotasikan \mathcal{N}_A adalah himpunan tetangga dari robot A . Dinotasikan $B_i \in \mathcal{N}_A$ adalah robot i sebagai tetangga dari robot A . Dinotasikan $d_i[k]$ adalah informasi jarak antara robot A ke robot B_i .

Langkah pertama. Dapat diperhatikan pada Gambar 2a dimana robot A menyimpan jarak $d_i[k]$ dan menggunakan kendali mode dua pada persamaan (8) untuk berpindah sepanjang l_a atau ke koordinat $A' = (0, l_a)$ sehingga akan mendapatkan jarak $d_i[k + 1]$. Dari perbedaan d_i sesudah $(k + 1)$ dan sebelum (k) berpindah tersebut akan digunakan untuk menentukan sudut α_i^a menggunakan rumus segitiga *cosinus*. Berikut adalah persamaan α_i^a .

$$\zeta_i^a = \cos^{-1} \left(\frac{l_a^2 + d_i[k + 1]^2 - d_i[k]^2}{2d_i[k + 1]l_a} \right) \quad (18)$$

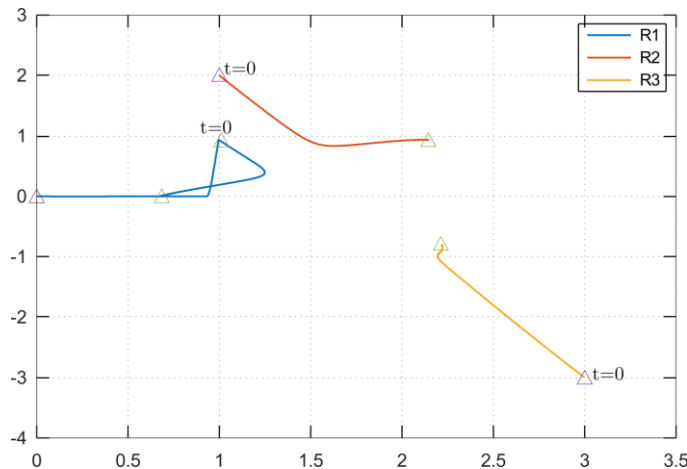
$$\alpha_i^a = 180^\circ \pm \zeta_i^a \quad (19)$$

Variable α_i^a dan $d_i[k + 1]$ adalah nilai dari koordinat polar dari setiap robot tetangga A . Diubah menjadi koordinat kartesian untuk dapat dimasukkan dalam *state* kendali formasi.

$$x_{B_i}^A = \begin{bmatrix} x_{B_i} = d_i[k + 1] \cos \alpha_i^a \\ y_{B_i} = d_i[k + 1] \sin \alpha_i^a \end{bmatrix} \quad (20)$$

Langkah kedua. Hasil koordinat yang dihasilkan pada persamaan (20) akan menghasilkan bias dikarenakan persamaan (19) tidak mengetahui letak kuadran sudut nya. Sudut ζ_i^a adalah sudut segitiga (Gambar 2a) $\angle AA'B_1$ atau $\angle AA'B_2$ sehingga dimungkinkan koordinat yang dihasilkan persamaan (20) bisa berada pada kuadran 1 atau kuadran 4 (perhatikan robot B_1 pada Gambar 2b). Oleh karena itu pada persamaan (19) terdapat operasi \pm dimana operasi tersebut akan dilakukan berdasarkan letak kuadran B_i .

$$\alpha_i^a = \begin{cases} 180^\circ - \zeta_i^a, & \text{Robot berada pada kuadran 1 dan 2} \\ 180^\circ + \zeta_i^a, & \text{Robot berada pada kuadran 3 dan 4} \end{cases} \quad (21)$$



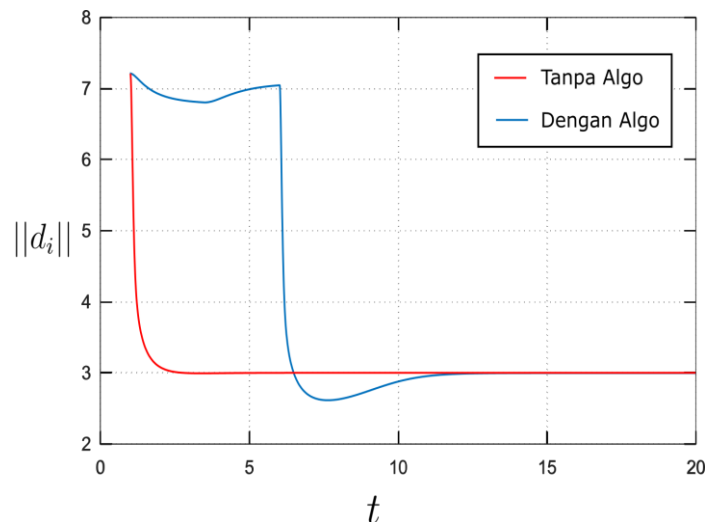
Gambar 3. Grafik pergerakan robot menggunakan algoritma *cosinus* pada kendali formasi

Langkah kedua ini bertujuan untuk menentukan kejadian pada persamaan (21) dimana robot diharuskan untuk berpindah ke koordinat $A'' = (x_a^*, y_a^*)$ (Gambar 2b). Sebelum robot berpindah, kondisi robot telah mendapatkan koordinat dari langkah pertama. Koordinat tersebut akan diubah menjadi jarak dan akan dibandingkan jarak tersebut dengan informasi jarak dari sensor setelah berpindah ke A'' . Apabila terdapat perbedaan maka kejadian pada persamaan (20) diubah ke kejadian selanjutnya dan mengkoreksi koordinat sebelumnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kendali formasi berdasarkan jarak akan dijalankan secara simulasi menggunakan *matlab/octave* dan algoritma *cosinus* akan dijalankan pertama kali untuk mendapatkan *state* yang akan digunakan di persamaan (16) dan (17). Simulasi akan menggunakan 3 robot dengan himpunan simpul $\mathcal{V} = \{R_1, R_2, R_3\}$ dan himpunan sisi $\mathcal{E} = \{(R_1, R_2), (R_3, R_2), (R_3, R_1)\}$ sehingga variable jarak $d_1 = ||x_1 - x_2||$, $d_2 = ||x_3 - x_2||$ dan $d_3 = ||x_3 - x_1||$.

Gambar 3 adalah pergerakan robot terhadap koordinat global robot R_1 dengan kendali formasi algoritma *cosinus*. Dapat diperhatikan robot R_1 menjalankan algoritma *cosinus* langkah pertama dimana robot berpindah sepanjang $l_a = 1$ sehingga *setpoint* kendali persamaan (13) adalah $r_2^c = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Setelah *setpoint* tercapai, robot R_1 mendapatkan jarak yang dibutuhkan untuk menyelesaikan persamaan (19) dan (20) lalu dilanjutkan ke langkah ke dua dengan berpindah ke koordinat (1,1) sehingga *setpoint* kendali persamaan (13) adalah $r_2^c = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Setelah *setpoint* tercapai maka dilakukan pengecekan kejadian persamaan (21) dengan membandingkan jarak dari sensor dengan jarak dari koordinat yang dihasilkan dari persamaan (20). Robot R_3 berada pada kuadran 4 maka kejadian yang digunakan adalah $\alpha_i^o = 180^\circ + \zeta_i^a$ dan robot R_2 berada pada kuadran 1 maka kejadian yang digunakan adalah $\alpha_i^o = 180^\circ - \zeta_i^a$. Setelah koordinat ditemukan, maka robot menggunakan kendali formasi berdasarkan jarak pada persamaan (16) dan (17).



Gambar 4. Grafik response jarak terhadap waktu pada robot dengan kendali formasi.

Gambar 4 adalah grafik perbandingan penerapan dan tidak algoritma *cosinus* pada kendali formasi persamaan (16) dan (17). Hasil jarak $||d_i||$ pada kendali formasi tanpa penerapan algoritma *cosinus* menunjukkan bahwa setiap robot mencapai jarak yang sama dalam waktu kurang lebih 4 detik. Sedangkan pada kendali formasi menggunakan algoritma *cosinus* terdapat tambahan waktu 6 detik. Tambahan waktu tersebut digunakan untuk menjalankan algoritmanya.

Tabel 1. *Settling Time* Dengan Konstanta K_p Yang Berbeda

| Koordinat | | | <i>Settling Time</i> Tanpa Algoritma <i>cosinus</i> (detik) | | | <i>Settling Time</i> Dengan Algoritma <i>cosinus</i> (detik) | | | Selisih (detik) | | |
|---|----------|---------|---|---|---|--|----|----|-----------------|---|---|
| R1 | R2 | R3 | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| (0, 0) | (1, 2) | (-2, 3) | 6 | 5 | 3 | 14 | 11 | 9 | 8 | 6 | 6 |
| (0, 0) | (-2, -4) | (3, -2) | 4 | 2 | 2 | 9 | 8 | 7 | 5 | 6 | 5 |
| (0, 0) | (1, 2) | (3, -3) | 7 | 4 | 2 | 16 | 13 | 11 | 9 | 9 | 9 |
| (0, 0) | (-2, -3) | (3, 2) | 10 | 7 | 4 | 16 | 11 | 9 | 6 | 4 | 5 |
| Konstanta: (A) $K_{p1} = 50$; $K_{p2} = 3$; (B) $K_{p1} = 80$; $K_{p2} = 7$; (C) $K_{p1} = 100$; $K_{p2} = 15$ | | | | | | | | | | | |

Dilakukan percobaan *settling time* dengan beberapa koordinat yang mewakili kombinasi antara dua robot dengan kejadian pada persamaan (21). Serta diberikan nilai K_{p1} dan K_{p2} pada persamaan (17) yang berbeda juga. Dapat diperhatikan pada Tabel 1 selisih dari penerapan algoritma dan tidak memiliki rata-rata 6.5 detik. Artinya bahwa algoritma membutuhkan waktu 5-7 detik untuk menemukan koordinat tetangganya.

4. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa, dari hasil percobaan kendali formasi berdasarkan jarak menggunakan model robot *holonomic* dan algoritma *cosinus* dapat menemukan koordinat tetangganya dengan cukup baik, yaitu 6.5 detik.

DAFTAR RUJUKAN

- Cai, X., & de Queiroz, M. (2014). Multi-agent formation maneuvering and target interception with double-integrator model. *2014 American Control Conference*, 287–292. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6858603>
- Correia, M. D., Gustavo, A., & Conceição, S. (2012). Modeling of a Three Wheeled Omnidirectional Robot Including Friction Models. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(22), 7–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00002>
- Deghat, M., Anderson, B. D. O., & Lin, Z. (2016). Combined Flocking and Distance-Based Shape Control of Multi-Agent Formations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(7), 1824–1837. <https://doi.org/10.1109/TAC.2015.2480217>
- Ferik, S. el, Nasir, M. T., & Baroudi, U. (2016). A Behavioral Adaptive Fuzzy controller of multi robots in a cluster space. *Applied Soft Computing*, 44, 117–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.03.018>
- Guanghua, W., Deyi, L., Wenyan, G., & Peng, J. (2013). *Study on Formation Control of Multi-Robot Systems*. 1335–1339. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2012.316>

- Guo, K., Li, X., & Xie, L. (2020). Ultra-Wideband and Odometry-Based Cooperative Relative Localization With Application to Multi-UAV Formation Control. *IEEE Transactions on Cybernetics*, *50*(6), 2590–2603. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2019.2905570>
- Kang, S.-M., Park, M.-C., Lee, B.-H., & Ahn, H.-S. (2014). Distance-based formation control with a single moving leader. *2014 American Control Conference*, 305–310. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6858587>
- Li, X., Li, B., Zhang, P., Zhang, J., & Zhang, S. (2015). Large-Scale Unmanned Aerial Vehicle Formation Maintenance Algorithm Based on Virtual Structure. *2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, *1*, 417–421. <https://doi.org/10.1109/ISCID.2015.5>
- Oh, K.-K., & Ahn, H.-S. (2014). Distance-based undirected formations of single-integrator and double-integrator modeled agents in n-dimensional space. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, *24*(12), 1809–1820. <https://doi.org/10.1002/rnc.2967>
- Oh, K.-K., Park, M.-C., & Ahn, H.-S. (2015). A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, *53*, 424–440. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.022>
- Park, M.-C., & Ahn, H.-S. (2015). Distance-based control of formations with orientation control. *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2199–2204. <https://doi.org/10.1109/CDC.2015.7402533>
- Qiang, L., Heng, W., Huican, L., & Ying, Z. (2017a). Design and implementation of multi robot research platform based on UWB. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 7246–7251. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978492>
- Qiang, L., Heng, W., Huican, L., & Ying, Z. (2017b). Design and implementation of multi robot research platform based on UWB. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 7246–7251. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978492>
- Rozenheck, O., Zhao, S., & Zelazo, D. (2015). A proportional-integral controller for distance-based formation tracking. *2015 European Control Conference (ECC)*, 1693–1698. <https://doi.org/10.1109/ECC.2015.7330781>
- Wang, X., Yan, Z., & Wang, J. (2014). Model predictive control of multi-robot formation based on the simplified dual neural network. *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 3161–3166. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2014.6889491>