PERBANDINGAN ALGORITMA KENDALI FORMASI ROBOT MAJEMUK TIPE UNICYCLE :

Pengendali terdistribusi berbasis konsensus versus pengendali *vector field*

Muhammad Zharfan Wiranata[1], Sisdarmanto Adinandra[2]

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia
Jl Kaliurang KM 14.5 Yogyakarta, Indonesia

[1]14524109@students.uii.ac.id

[2]s.adinandta@uii.ac.id

***Abstrak*—Beberapa bencana dapat dievakuasi dengan menggantikan tenaga manusia oleh robot majemuk jika kita dapat mengoptimalkan kontribusi dengan menggunakan pengendalian yang tepat. Oleh karena itu, peneliti membandingkan dua metode pengendali, yakni: pengendali terdistribusi berbasis konsensus dan pengendali *vector field* pada 3 lintasan yang berbeda. Pada proses penelitian, peneliti membuat simulasi dengan meletakkan robot secara acak, dan kemudian robot-robot tersebut membentuk formasi dan berjalan sesuai dengan lintasan yang diinginkan. Selanjutnya, hasil dari simulasi tersebut berupa kesalahan posisi, formasi, serta sinyal kendali menjadi bahan analisis. Hasil Percobaan didapatkan bahwa pada 3 lintasan yang direncanakan, pengendalian berbasis konsensus terdistribusi tidak mencapai posisi target tapi mampu mencapai formasi yang diinginkan, sedangkan dengan metode *vector field* setiap robot mencapai posisi target yang juga pasti mencapai formasi yang diinginkan. Oleh karena itu, berdasarkan hasil analisis yang dilakukan bahwa disimpulkan bahwa untuk merancang pengendalian robot majemuk yang bertujuan untuk mencapai suatu formasi dengan penyeragaman suatu nilai seperti sinyal kendali, atau jarak antar robot walaupun tidak mencapai posisi target pengendalian berbasis konsensus terdistribusi merupakan hal yang tepat. Namun untuk pengendalian agar sesuai dengan posisi target maka pengendalian *vector field* lebih diunggulkan.**

***Kata kumci*—robot majemuk, unicycle, vector field, terdistribusi, konsensus.**

I. PENDAHULUAN

Terdapat beberapa kemungkinan yang terjadi seperti musibah bencana alam atau lainnya yang dapat merugikan manusia. Dan untuk menanggulanginya hal tersebut diperlukan bantuan-bantuan yang dimana manusia mengurangi berpartisipasi secara langsung mengingat resiko kecelakaan yang besar.

Pencarian atau pun penyelamatan pasca tragedi bencana atau kecelakaan dengan robot telah banyak dilakukan dan didukung beberapa riset yang telah dilakukan. Dan penggunaan sistem robot majemuk menjadi proses yang menarik untuk dilakukan karena dapat bukan hanya melibatkan lebih dari satu robot, tapi bisa juga dengan beberapa fitur yang berbeda pada setiap robot menjadi kumpulan robot tersebut saling melengkapi.

Untuk mewujudkan hal tersebut, maka diperlukan sistem *multi-mobile robot* untuk melakukan proses pengendalian pada sistem multi robot yang sederhana. Namun perlu adanya strategi yang harus dilakukan untuk membuat sistem *multi-mobile robot* yang baik dan dapat bisa diandalkan untuk membantu kegiatan manusia untuk menanggulangi musibah yang dihadapi seperti tugas mencari dan menyelamatkan korban.

Salah satu pengendalian pada *multi-mobile robot* adalah pengendalian formasi, dimana robot dapat membentuk formasi seperti yang ditentukan dan dapat menghindari *obstacle*. Pengendalian formasi telah diteliti dengan berbagai metode seperti metode berdasarkan *vector field,* berbasis konsensus, dan lainnya. Tapi dengan beragam metode tersebut, kita perlu mengetahui pengendalian yang tepat dan efektif untuk digunakan pada *low cost swarm Search & Rerscue robotic system* terutama untuk robot *unicycle* yang menjadi objek awal, sehingga diperlukan perbandingan antar metode.

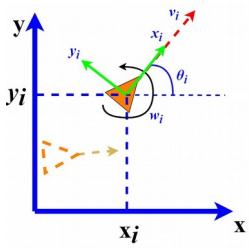
Pada penelitian ini bertujuan untuk membandingan antara pengendalian berbasis konsensus dan pengendali berbasis *vector field* untuk diterapkan pada pengendalian formasi robot *unicycle* majemuk agar dapat secara efektif digunakan pada kasus *swarm search & rescue robotic system* dengan karakteristik setiap metode. Dan proses perbandingan hanya dievaluasi dengan menggunan simulasi MATLAB.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Robot Model Unicycle

Model matematis dari robot *unicycle* dapat dituliskan pada Persamaan (1)[1]. Dan secara ilustrasi dari robot *unicycle* pada bidang

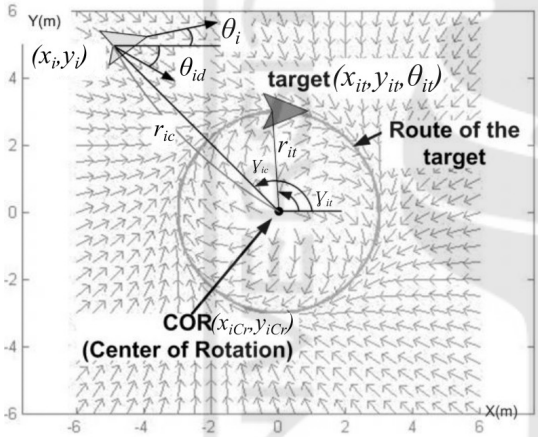
$$\dot{q}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & 0 \\ \sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \tag{1}$$



Gambar 1: Robot model Unicycle

B. Pengendalian berbasis vector field

Pengendalian berbasis *vector field* merupakan pengendalian dengan memanfaatkan medan vektor yang merupakan penetapan vektor yang telah ditetapkan pada setiap titik pada sebuah bidang[2]. Pengendalian berbasis *Vector field* telah digunakan untuk pengendalian pesawat Derek[3] . Dan pada untuk pengendalian formasi robot mejemuk tipe *unicycle* secara hierarki berbasis *vector field* telah dilakukan oleh Kwon[4] yang akan digunakan pada penelitian ini untuk dibandingkan.



Gambar 2: Center Of Rotation

Pada Pengendalian berbasis *Vector Field* diperlukan posisi robot aktual dan posisi target. Oleh karena itu, jika diketahui dengan adanya $[x_{it} \;\; y_{it}]^T$, maka *Center of Rotation* (COR) ditulis dengan Persamaan (11). Illustrasi COR ditunnjukan pada Gambar (2)

$$COR(x_{iCr}, y_{iCr}) = \begin{bmatrix} x_{it} + r_{it}\cos\left\{\theta_{it} + sgn(v_{it})\,sgn(\omega_{it})\frac{\pi}{2}\right\} \\ y_{it} + r_{it}\sin\left\{\theta_{it} + sgn(v_{it})\,sgn(\omega_{it})\frac{\pi}{2}\right\} \end{bmatrix} \quad (11)$$

dimana $v_{jt} = v_{VL}$ dan $\omega_{jt} = \omega_{VL}$ atau semua target kecepatan linear dan putar orientasi setiap robot sama dengan kecepatan linear dan putar orientasi *virtual leader*.

Pada Persamaan 11 , ketika $v_t > 0$, dan $\omega_t > 0$ maka orientasi yang diinginkan θ_{jd} adalah sebagai berikut

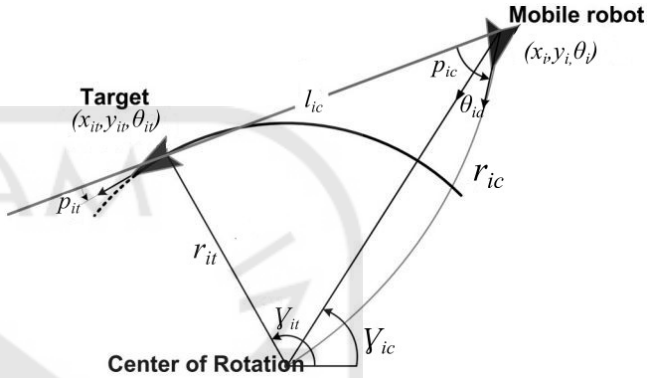
$$\theta_{id}(e_r) = \begin{cases} \gamma_{ic} + sgn(\omega_{it})\left\{\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}(k_{id}e_{ir})\right\}, v_{it} \geq 0 \\ \gamma_{ic} + sgn(\omega_{it})\left\{\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}(k_{id}e_{ir})\right\} - \pi, v_{it} < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

dimana,

$$\gamma_{ic} = atan2\left(\frac{y_i - y_{iCr}}{x_i - x_{iCr}}\right) \quad (13)$$

$$e_{ir} = r_{ic} - r_{it} \quad (14)$$

Selanjutnya hubungan antara posisi robot aktual dan posisi targetnya adalah sebagai berikut



Gambar 3: Hubungan antara posisi atual dan target

Dengan berdasarkan Gambar 3, sinyal kendali untuk setiap robotnya dituliskan dibawah ini

$$v_i = \mu(p_{ic})\frac{1}{\cos(p_{ic})}(v_{it}\cos(p_{it}) + k_{il}e_{il}) \quad (15)$$

$$\omega_i = \frac{v_i}{r_{ic}}\sin(\theta_i - \gamma_{ic}) - sgn(\omega_{it})\frac{k_{id}v_i\cos(\theta_i - \gamma_c)}{1 + (k_{id}e_{ir})^2} - k_{i\theta}e_{i\theta} \quad (16)$$

dimana,

$$e_{il} = l_{ic} = \sqrt{(y_{it} - y_i)^2 + (x_{it} - x_i)^2} \quad (17)$$

$$e_{i\theta} = \theta_i - \theta_{id} \quad (18)$$

$$\mu(p_{ic}) = 1 - \exp\left\{-\left(|p_{ic}| - \frac{\pi}{2}\right) \Big/ \sigma^2\right\} \quad (19)$$

Persamaan-Persamaan sebelumnya diterapkan pada setiap robot-*j*. Pada metode *vector field* terdapat beberapa kontrol variabel seperti $k_{j\theta}$, k_{jd} pada Persamaan (16) kemudian k_{il} pada Persamaan (16) dan σ pada Persamaan (19).

C. Pengendalian berbasis konsensus terdistribusi

Pengendali terdistribusi berbasis konsensus merupakan pengendalian yang menggunakan algoritma konsensus yang digunakan oleh sistem yang memiliki beberapa agen yang akan melakukan negosiasi untuk mencapai suatu nilai konsensus yang dapat diterima oleh semua agen. Untuk mencapai nilai konsensus, maka setiap agen perlu memperoleh informasi dari agen lainnya (tetangga-tetangga agen) yang digunakan sebagai pertimbangan untuk mencapai nilai konsensus. Secara sederhana, Algoritma Konsensus dituliskan pada Persamaan (20)[5]:

$$z_i[k+1] = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}[k]z_j[k] \quad (20)$$

dimana, *weighted value* persamaan tersebut adalah

$$a_{ij}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{33} & a_{33} & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Pada Persamaan (20) memiliki nilai *weighted* yang sangat penting dan berpengaruh, karena nilai tersebut menentukan bentuk *topology* pertukaran informasi antar agen. Dan selain itu, nilai tersebut juga memberikan pengaruh berupa *gain* dari informasi antar agen.

Selanjutnya pada pengendalian formasi dengan pengendali distribusi berbasis konsensus, peneliti menggunakan referensi yang ditulis oleh Zhaoxia Peng[1]. Pada referensi tersebut, Pengendali dimulai dengan persamaan transformasi yang disimbolkan dengan z_{1j}, z_{2j}, dan z_{3j}. Namun selain itu pada referensi ini menggunakan *virtual leader* untuk membentuk formasi, dan posisi setiap robot berdasarkan formasi yang dituliskan dengan px_i dan py_i yang merupakan jarak setiap robot-*i* terhadap *virtual leader*.

$$\begin{aligned} z_{1i}(t)&=\theta_i(t), \\ z_{2i}(t)&=(x_i(t)-px_i)\cos\theta(t)+(y_i(t)-py_i) \\ &\sin\theta_i(t)+k_0 sign(u_{1i}(t))z_{3i}(t), \\ z_{3i}(t)&=(x_i(t)-px_i)\sin\theta(t)+(y_i(t)-py_i) \\ &\cos\theta_i(t), \end{aligned} \quad (22)$$

dimana,

$$u_{1i}(t)=\omega_i(t), \quad (23)$$

$$u_{2i}(t)=v_i(t)-(1+k_0^2)u_{1i}(t)z_{3i}(t) \quad (24)$$

Dan sinyal kendali untuk pada tiap robot adalah

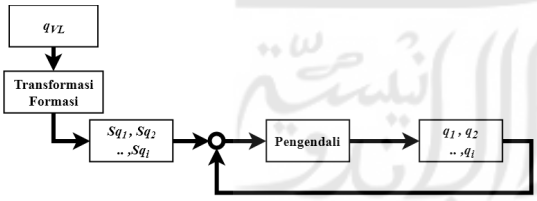
$$\begin{aligned} \omega_i=u_{1i}=u_{10}&-\alpha\sum_{j\in\mathbb{N}_i} a_{ij}(z_{1i}-z_{1j})-\alpha b_i(z_{1i}-z_{10}) \\ &-\beta sign(a_{ij}(z_{1i}-z_{1j})+b_i(z_{1i}-z_{10})) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} v_i=u_{2i}=&-\alpha\sum_{j\in\mathbb{N}_i} a_{ij}(z_{2i}-z_{2j})-\alpha b_i(z_{2i}-z_{20}) \\ &-\beta sign(a_{ij}(z_{2i}-z_{2j})+b_i(z_{2i}-z_{20}))-k_0|u_{1i}|z_{2j} \end{aligned} \quad (26)$$

III. METODE PENELITIAN

A. Proses pengendalian formasi robot majemuk

Proses pengendalian formasi yang digunakan pada robot majemuk tipe *unicycle* mengikuti diagram blok pada Gambar 4

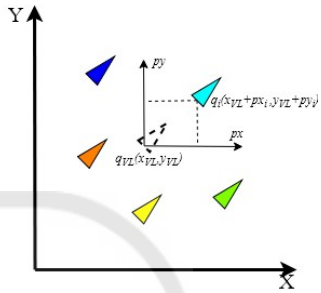


Gambar 4: Diagram blok pengendalian

Pengendalian dimulai dengan bentuk formasi yang dituju. Formasi dibentuk dengan *virtual leader* dengan model *unicycle* yang akan menjadi acuan untuk membuat formasi. Jika posisi *Virtual leader* terhadap bidang adalah $q_{VL}=[x_{VL}\, y_{VL}]^T$ maka untuk membentuk formasi antar robot dituliskan pada Persamaan (3.1).

$$Sq_i=\begin{bmatrix} px_i \\ py_i \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} x_{VL} \\ y_{VL} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Pada Persamaan (27), Sq_i merupakan hasil transformasi *robot-i* terhadap *virtual leader* dan yang akan menjadi target dari setiap robot q_i atau jika diilustrasikan bisa dilihat pada Gambar 5 yang menunjukan formasi yang dibentuk berdasarkan posisi *virtual leader*.



Gambar 5: Formasi yang dibentuk berdasarkan posisi virtual leader

Untuk melakukan pengendalian formasi dengan metode yang diajukan, maka diperlukan penyesuaian. Pada metode *vector field* proses pengendaliannya menggunakan posisi target yang telah dibentuk sebelumnya berdasarkan posisi virtual leader. Dan posisi target $[x_{it}\ y_{it}]$ disubstitusikan ke beberapa Persamaan (11) – (19) dengan menggunakan Persamaan (28).

$$q_{VL,i}=\begin{bmatrix} x_{it} \\ y_{it} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} px_i \\ py_i \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} x_{VL} \\ y_{VL} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Kemudian untuk metode pengendalian terdistribusi berbasis konsensus pada Persamaan (22) – (26) diperlukan penyesuaian pada transformasi *virtual leader* atau z_{10}, z_{20}, dan z_{30}. Jika pada z_{10}, z_{20}, dan z_{30} bergantung dari posisi dan masukan *virtual leader* maka Persamaan (22) di modifikasi menjadi Persamaan (29) yang akan digunakan pada robot-*i* . Sedangkan pada pada robot-*i* tetap menggunakan persamaan yang sama dengan sebelumnya.

$$\begin{aligned} z_{10}(t)&=\theta_{VL}(t), \\ z_{20}(t)&=x_{VL}(t)\cos\theta_{VL}(t)+y_{VL}(t)\sin\theta_{VL}(t) \\ &+k_0 sign(\omega_{VL}(t))z_{30}(t), \\ z_{30}(t)&=x_{VL}(t)\sin\theta(t)+y_{VL}(t)\cos\theta_{VL}(t), \end{aligned} \quad (29)$$

Metode penelitian yang digunakan dibagi menjadi 3 bagian yakni, Skenario pengendalian formasi, proses pengendalian dan proses analisis. Bagian-bagian yang telah disebutkan akan dijelaskan pada subbab-subbab ini

B. Skenario percobaan

Skenario yang digunakan adalah sebagai berikut

1. Dimulai dengan beberapa model robot *unicycle* diletakkan secara acak pada ruang yang tersedia, yang kemudian akan berkumpul
2. Kemudian robot akan terkumpul dengan formasi yang diinginkan, dan terus mempertahankannya

3. Selanjutnya robot berjalan sesuai trayektori yang dibentuk serta mempertahankan formasinya. Lintasan yang dibentuk pada pada penilitian ini adalah lintasan lingkaran.

Lintasan dibentuk dengan mengatur input V_{VL} dan ω_{VL} pada *virtual leader* yang akan menjadi referensi setiap robot-*i*.

C. Proses Analisis

Proses analisis berupa perbandingan *error* posisi pada robot satu dengan lainnya, perbandingan *error* formasi antar robot dan juga sinyal kendali(v_j, ω_j) pada setiap robot.

Perbandingan *error* posisi pada robot dihitung dengan persamaan berikut

$$e_x^i(t) = x_{it}(t) - x_i(t) \quad (30)$$

$$e_y^i(t) = y_{it}(t) - y_i(t) \quad (31)$$

Sedangkan untuk perbandingan *error* formasi antar robot menggunakan persamaan sebagai berikut

$$e_{px}^i(t) = x_t(t) - (x_k(t) + px_i) \quad (32)$$

$$e_{py}^i(t) = y_t(t) - (y_k(t) + py_i) \quad (33)$$

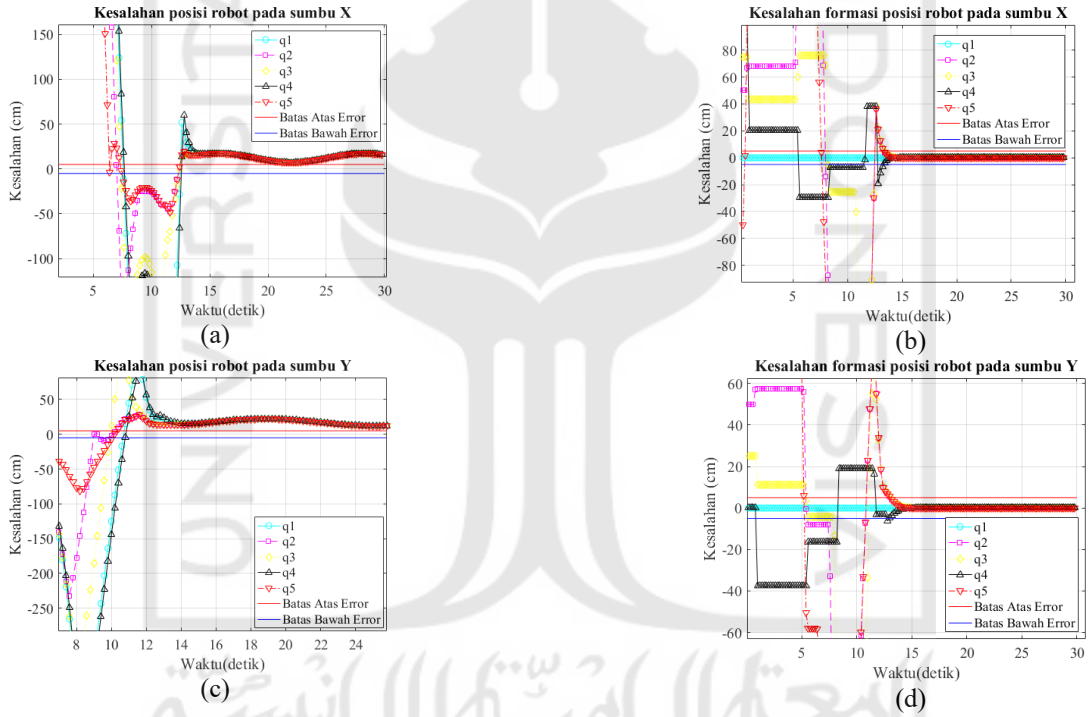
$[x_k y_k]$ merupakan posisi robot yang akan dijadikan referensi terhadap robot-robot lainnya. Serta toleransi kesalahan ditetapkan pada jangkauan ± 5cm.

IV. Hasil dan Analisis

Pada Penelitian ini, peneliti menggunakan 3 referensi lintasan dengan mengatur input pada virtual leader

- Lintasan pertama, posisi awal VL berada di (250,0) dan bergerak dengan *v=1 m/s* dan *ω=0,5 rad/s*
- Lintasan kedua , posisi awal VL berada di (500,500) dan bergerak dengan *v=1 m/s* dan *ω=0.5 rad/s*
- Lintasan ketiga, posisi awal VL berada di (250, 0) dan bergerak dengan *v=1 m/s* dan *ω=0.5 rad/s*

Dengan 3 referensi lintasan tersebut, simulasi pada lintasan kedua cukup mewakili semua hasil simulasi pada kedua metode tersebut karena pada simulasi tersebut menampilkan hasil yang dapat memberikan fungsi dari setiap metode ketika robot mencapai posisi *steady state.*



Gambar 6: Grafik kesalahan pada simulasi lintasan kedua dengan metode konsensus pada posisi steady state,(a) Kesalahan posisi robot pada sumbu X, (b) Kesalaha formasi robot pada sumbu X, (c) Kesalahan posisi robot pada sumbu Y, (d) Kesalaha formasi robot pada sumbu Y

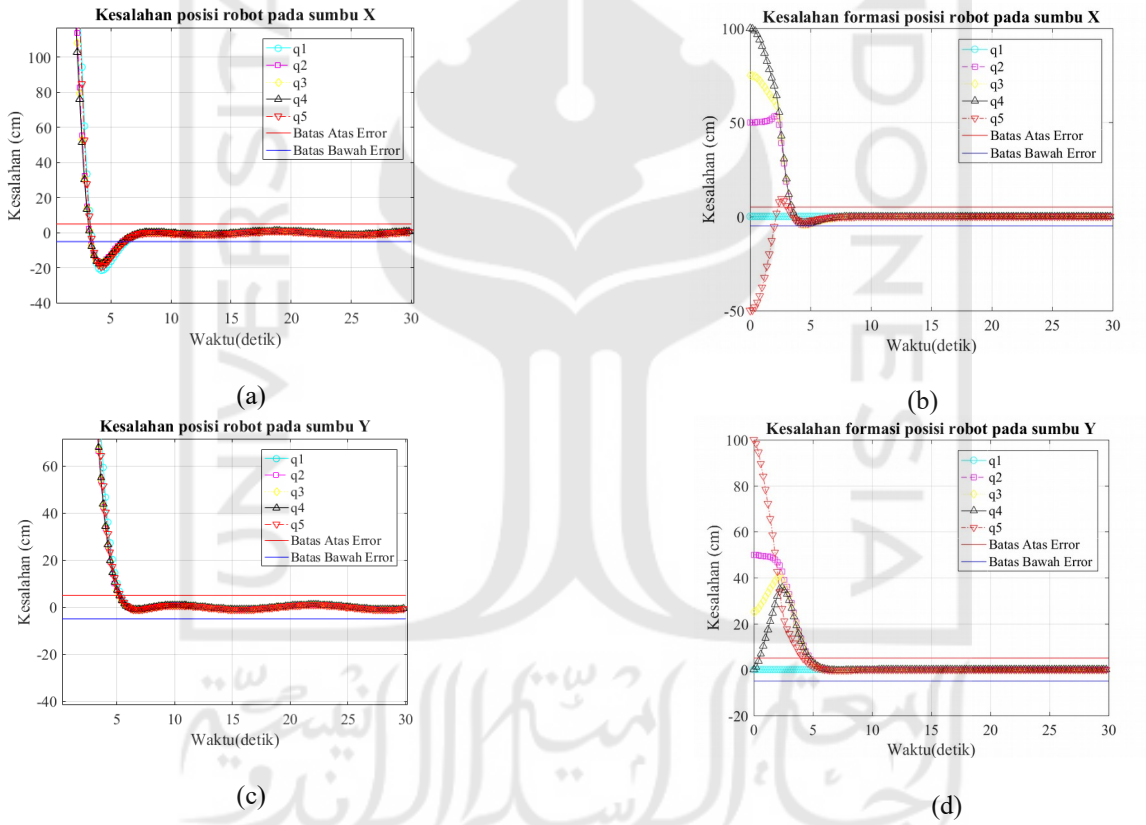
Pada Gambar (6), posisi robot tidak berada pada jangkauan *error* yang telah ditentukan yakni ± 5cm. Sedangkan pada kesalahan formasi posisi robot masih dalam jangkauaan *error* yang diizinkan. Hal ini dikarenakan pada pengendalian berbasis konsensus bertujuan untuk mencapai nilai konsensus berdasarkan pada setiap robot yang ditentukan oleh nilai robot-robot lainnya. Nilai konsensus yang dicapai pada pengendali ini untuk menyesuaikan jarak antar robot agar sesuai formasi yang secara matematis memperkecil kesalahan posisi pada formasi. Namun selain itu, *weighted value* menjadi faktor keberhasilan pada pengendalian ini.

Berbeda dengan pengendalian berbasis konsonsus, pada Gambar (7) menunjukan bahwa pengendalian berbasis *vector field* posisi robot tidak berada pada jangkauan yang juga berarti

mencapai formasi yang ingin dibentuk. Hal ini dikarenakan pengendali berbasis *vector field* bertujuan agar setiap robot mencapai posisi target atau mengurangi kesalahan posisi aktual terhadap posisi target yang juga berarti untuk mencapai formasi yang dibentuk.

Tabel 1
Hasil perbandingan simulasi pada setiap lintasan

Lintasan	Kondisi	Metode Konsensus Terdistribusi	Metode *Vector Field*
Pertama	Mencapai Target	Tidak	Ya
	Sesuai Formasi	Ya	Ya
Kedua	Mencapai Target	Tidak	Ya
	Sesuai Formasi	Ya	Ya
Ketiga	Mencapai Target	Tidak	Ya
	Sesuai Formasi	Ya	Ya



Gambar 7: Grafik kesalahan pada simulasi lintasan kedua dengan metode *vector field* pada posisi steady state,(a) Kesalahan posisi robot pada sumbu X, (b) Kesalaha formasi robot pada sumbu X, (c) Kesalahan posisi robot pada sumbu Y, (d) Kesalaha formasi robot pada sumbu Y

V. KESIMPULAN

Pada subbab sebelumnya telah menjelaskan hasil serta tujuan pada setiap pengendalian. Dengan hasil tujuan pengendalian tersebut, tentu akan menjadi referensi untuk memilih metode pengendalian formasi robot majemuk. Jika ingin merancang pengendalian robot majemuk yang bertujuan untuk membentuk formasi yang diinginkan dengan penyeragaman sinyal kendali atau jarak antar robot walaupun

tidak mencapai posisi target, pengendalian formasi dengan metode konsensus terdistribusi lebih tepat. Namun jika pengendalian pada setiap robot untuk mencapai posisi target, maka pengendalian *vector field* lebih baik digunakan

DAFTAR PUSTAKA

[1] Z. Peng, G. Wen, A. Rahmani, and Y. Yu, "Distributed consensus-based formation control for multiple nonholonomic mobile robots with a specified reference trajectory," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 46, no. 8, pp. 1447–1457, 2015.

[2] A. Galbis and M. Maestre, "Vector Analysis Versus Vector Calculus - Antonio Galbis, Manuel Maestre - Google Buku." [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=tdF8uTn2cnMC&pg=PA12&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [Accessed: 04-Feb-2019].

[3] D. R. Nelson, D. B. Barber, T. W. Mclain, S. Member, R. W. Beard, and S. Member, "Vector Field Path Following for Miniature Air Vehicles," vol. 23, no. 3, pp. 519–529, 2007.

[4] J. W. Kwon and D. Chwa, "Hierarchical Formation Control Based on a Vector Field Method for Wheeled Mobile Robots," *Robot. IEEE Trans.*, vol. 28, no. 6, pp. 1335–1345, 2012.

[5] W. Ren and R. W. Beard, *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*. .