

# Perancangan Kendali Formasi pada Multi-Robot Roda *Omni* dengan Kemampuan Menghindari Tabrakan

## (*Formation Control Design on Multi-Omni Directional Mobile Robot with Collision Avoidance*)

Faisal Wahab<sup>1</sup>

**Abstract**—In this study, a distributed formation control was designed using multiple omni wheel robots (OMR) with the ability to avoid collisions between OMRs when forming a formation. The formation control employed a consensus algorithm consisting of four layers, namely the tracking, consensus, behavior, and the physical robot layer. The tracking layer was used to direct the OMR position at a predetermined virtual center. At the consensus layer, controllers were designed at the robot level. These controllers were an elaboration of the consensus algorithm. The behavior layer was used to augment the collision avoidance methods when OMR formed a formation using the Stipanovic method. On the physical robot layer, four OMRs with three omni wheels configurations were employed. Subsequently, the previously designed controllers were simulated using MATLAB software. The simulation results indicate that the controller applied to the OMR has succeeded in forming the desired formations, namely square and rhombus. In addition, during the process of building these formations, each OMR could maintain a distance; thus, there was no collision with various communication topologies and formations.

**Intisari**—Pada makalah ini dirancang sebuah kendali formasi terdistribusi menggunakan multi-robot roda *omni* (*Omni Directional Wheel Mobile Robot*, OMR) dengan kemampuan menghindari tabrakan antar OMR saat membentuk sebuah formasi. Kendali formasi menggunakan algoritme konsensus yang terdiri atas empat buah *layer*, yaitu *layer tracking*, *layer konsensus*, *layer behavior*, serta *layer fisik robot*. *Layer tracking* digunakan untuk mengarahkan posisi OMR pada *virtual center* yang telah ditentukan. Pada *layer konsensus* dirancang pengendali pada tingkat robot. Pengendali ini merupakan penjabaran dari algoritme konsensus. *Layer behavior* digunakan untuk menambah metode penghindar tabrakan antar OMR saat membentuk formasi. Penghindar rintangan menggunakan metode Stipanovic. Pada *layer fisik robot*, digunakan OMR dengan konfigurasi tiga buah roda *omni*. OMR yang digunakan berjumlah empat buah. Pengendali yang telah dirancang disimulasikan dengan menggunakan peranti lunak MATLAB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali yang diterapkan pada OMR telah berhasil membentuk formasi yang diinginkan, yaitu persegi dan belah ketupat, serta dalam perjalanan membentuk formasi tersebut, setiap OMR dapat menjaga jarak sehingga tidak terjadi tabrakan dengan berbagai topologi komunikasi dan bentuk formasi.

**Kata Kunci**—Kendali Formasi, Konsensus, Penghindar Tabrakan, Roda *Omni*, Simulasi.

<sup>1</sup> Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan, Jl Ciumbuleuit no. 94 Bandung 40141, Jawa Barat, Indonesia (telp: 022-203 2655; fax: 022-203-1110; e-mail: faisal.wahab@unpar.ac.id)

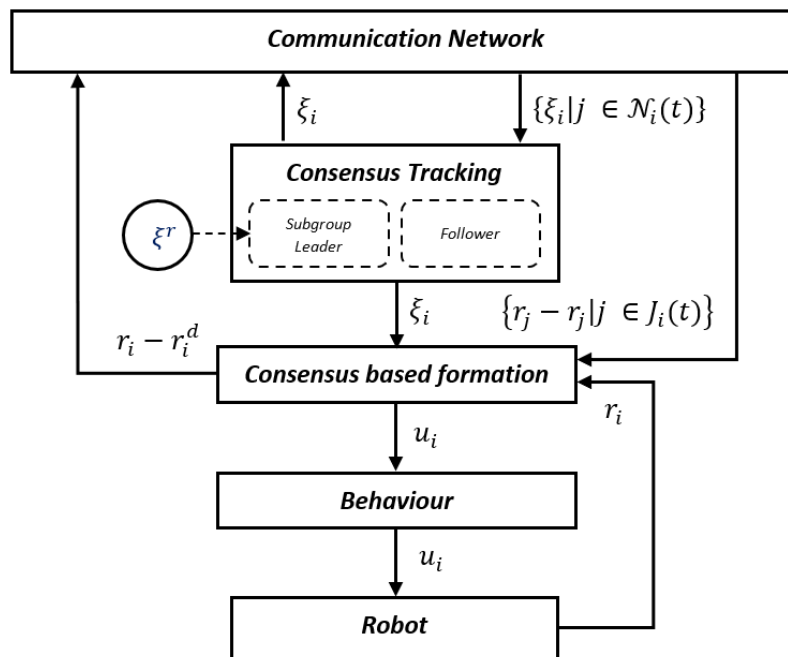
### I. PENDAHULUAN

Perkembangan aplikasi dunia robot semakin meluas dan semakin kompleks. Pada beberapa aplikasi tertentu, robot tidak hanya bekerja secara mandiri, tetapi membutuhkan multi-robot yang dapat bekerja sama secara simultan. Referensi [1]-[4] menggunakan kerjasama multi-robot untuk menyelesaikan sebuah misi. Dengan menggunakan multi-robot, pekerjaan dapat lebih cepat dan mudah dilakukan jika dibandingkan dengan robot bekerja secara mandiri. Maka, diperlukan sebuah sistem multi-robot yang dapat bekerja sama dan dapat berkomunikasi satu sama lain.

Salah satu kajian dalam pembahasan multi-robot adalah kendali formasi. Kendali formasi banyak digunakan pada sistem satelit, pesawat udara, *mapping*, pengawasan keamanan, dan penyelamatan dari bencana. Untuk memecahkan kendali formasi tersebut, terdapat beberapa pendekatan yang dapat digunakan, di antaranya *behavior* [5], *leader-follower* [6], *virtual-structure* [7], teori graf [8], dan konsensus [9], [10]. Pada penggunaan algoritme konsensus, terdapat beberapa kelebihan, di antaranya dapat menggunakan bermacam-macam topologi komunikasi, bermacam-macam bentuk formasi, dan menjaga formasi robot [11]. Selain itu, algoritme konsensus ini dapat mencapai konsensus ketika terjadi perubahan formasi dengan menggunakan beberapa topologi komunikasi robot yang telah ditentukan [12].

Dalam penerapan kendali formasi pada robot, terdapat beberapa permasalahan yang terjadi. Salah satunya adalah ketika multi-robot akan membentuk sebuah formasi, ada kemungkinan robot memiliki lintasan yang sama atau jarak antar robot terlalu dekat, sehingga terjadi tabrakan antar robot. Hal ini mengakibatkan robot tidak dapat membentuk formasi yang diinginkan dan jika diterapkan pada robot nyata akan terjadi kerusakan pada robot yang bertabrakan. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode supaya saat membentuk sebuah formasi, robot dapat menghindari tabrakan antar robot (*collision avoidance*). Terdapat beberapa metode penghindar tabrakan, di antaranya menggunakan *fuzzy* [13] dan metode Stipanovic [14], [15].

Pada penerapan kendali formasi dan metode penghindar tabrakan, diperlukan sebuah *platform* supaya kendali tersebut dapat diimplementasikan. Salah satu jenis robot yang banyak digunakan saat ini adalah robot dengan menggunakan roda *omni*, yang disebut dengan *Omni Directional Wheel Mobile Robot* (OMR). Roda *omni* adalah sebuah roda yang terdiri atas sebuah roda tunggal dan pada sekeliling roda inti terdapat roda tambahan. OMR memiliki pergerakan sama dengan robot



Gbr. 1 Arsitektur kendali formasi terdistribusi.

dengan roda diferensial biasa, yaitu maju, mundur, putar kiri, dan putar kanan, tetapi OMR memiliki kelebihan utama, yaitu dapat bergerak kanan, kiri, samping kiri dan samping kanan, atau bergerak ke segala arah tanpa perlu mengubah orientasi OMR. Oleh karena itu, OMR termasuk kategori robot *holonomic*, yaitu dapat bergerak ke segala arah tanpa perlu mengubah orientasi robot. Terdapat dua buah konfigurasi pemasangan roda pada OMR, yaitu dengan tiga buah roda *omni* dan empat buah roda. Pada pemasangan tiga roda, roda *omni* dipasang dengan perbedaan sudut  $120^\circ$  [16], dan jika digunakan empat buah roda, roda *omni* dipasangkan dengan perbedaan sudut  $90^\circ$  [17]. Setiap konfigurasi memiliki perbedaan pada persamaan kinematikanya.

Pada makalah ini dibahas penggunaan algoritme konsensus sebagai kendali untuk membentuk sebuah formasi tertentu dan menerapkan metode penghindar tabrakan antar robot saat membentuk formasi tersebut menggunakan OMR. OMR yang digunakan pada makalah ini berkonfigurasi tiga buah roda *omni* yang berjumlah empat buah OMR. Hasil simulasi dipaparkan untuk mengilustrasikan penerapan kendali formasi dan metode penghindar tabrakan serta simulasi penggunaan kinematika OMR.

## II. METODOLOGI

Pada bagian ini, dirancang arsitektur konsensus pada kendali formasi terdistribusi dengan kemampuan menghindari tabrakan antar robot. Konsensus diartikan sebagai kesepakatan sekelompok robot terhadap suatu variabel pada suatu nilai tertentu. Untuk mencapai konsensus, harus ada pertukaran variabel yang disebut *state (information state)* dan harus ada metode atau algoritme untuk bernegosiasi sehingga dapat tercapai konsensus pada *state* tersebut. Arsitektur konsensus ini mengikuti arsitektur pada penelitian sebelumnya [9]. Arsitektur sebelumnya hanya berfokus pada kendali formasi dan

mencapai konsensus, sedangkan pada makalah ini ditambahkan sebuah *layer*, yaitu *behavior*, sebagai kemampuan tambahan kendali untuk menghindari tabrakan antar robot. Pada Gbr. 1 ditunjukkan arsitektur konsensus yang digunakan pada makalah ini, yang terdiri atas empat *layer* sebagai berikut:

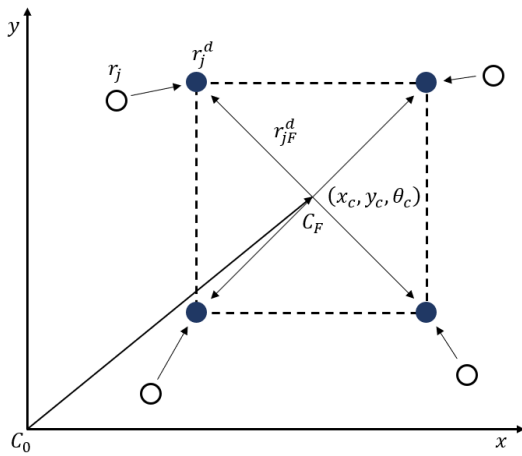
- *layer consensus tracking*,
- *layer* kendali formasi berbasis konsensus,
- *layer behavior*, dan
- *layer* fisik robot.

Arsitektur kendali formasi terdistribusi ditunjukkan pada Gbr. 1, dengan  $N_i(t)$  adalah himpunan robot yang membangkitkan variabel koordinasi dan  $J_i(t)$  adalah *position tracking error* pada robot ke- $i$  pada saat  $t$ . Pada arsitektur tersebut, terlihat nilai  $\xi_j$  langsung diperoleh dari robot tetangga. Simbol  $\xi$  adalah variabel koordinasi dari kelompok robot.

Salah satu solusi untuk kendali formasi adalah dengan pendekatan *virtual leader/virtual structure* dan *leader-follower*. Pada perancangan ini, *virtual structure* berada di posisi pada tengah formasi dan dalam formasi tersebut terdapat sebuah robot yang menjadi *leader* dan robot lainnya difungsikan sebagai *follower*. Gbr. 2 menunjukkan ilustrasi pendekatan *virtual structure* dengan sebuah formasi segi empat.

Pada Gbr. 2,  $r_j = [x_j, y_j]^T$  dan  $r_j^d = [x_j^d, y_j^d]^T$  merepresentasikan posisi aktual dan posisi yang diinginkan robot ke- $j$ . Kerangka inersia  $C_0$  dan kerangka koordinat *virtual*  $C_F$  merepresentasikan sebuah kerangka koordinat *virtual* yang berlokasi di pusat kerangka *virtual*  $(x_c, y_c)$  dengan orientasi  $\theta_c$ , sedangkan  $r_{jF}^d = [x_{jF}^d, y_{jF}^d]^T$  merepresentasikan pergeseran yang diinginkan oleh robot ke- $j$  relatif terhadap kerangka  $C_F$ .

Hubungan antara titik kerangka *virtual* dengan posisi yang diinginkan setiap robot dalam formasi ditunjukkan dalam (1).



Gbr. 2 Kerangka koordinat virtual dan inersia.

$$\begin{bmatrix} x_j^d \\ y_j^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos[\theta_c] & -\sin[\theta_c] \\ \sin[\theta_c] & \cos[\theta_c] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{jF}^d \\ y_{jF}^d \end{bmatrix}. \quad (1)$$

### A. Layer Consensus Tracking

Layer consensus tracking berfungsi untuk mengarahkan  $\xi_i$  ke  $\xi^r = [x_c^r, y_c^r, \theta_c^r]^T$  yang merepresentasikan referensi bagi variabel koordinasi. Pada layer ini, masing-masing robot menggunakan algoritme dalam (2) sebagai berikut.

$$u_i = \frac{1}{\eta_i(t)} \sum_{j=1}^n a_{ij}^c(t) [\xi_j - \gamma(\xi_i - \xi_j)] + \frac{1}{\eta_i(t)} a_{i(n+1)}^c(t) [\xi^r - \gamma(\xi_i - \xi^r)], \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

dengan  $a_{ij}^c, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1$  adalah elemen  $(i, j)$  dari matriks adjacency  $A_{n+1}^c$ , dengan  $A_{n+1}^c \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$  pada saat waktu  $t$ , lalu  $\gamma$  adalah sebuah nilai skalar positif, dan  $\eta_i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}^c(t)$ , dengan catatan bahwa  $\xi^r$  dan  $\xi^r$  tersedia hanya kepada subgroup leader dan jumlah subgroup leader dapat bervariasi dari 1 sampai  $n$ .

### B. Layer Kendali Formasi Berbasis Konsensus

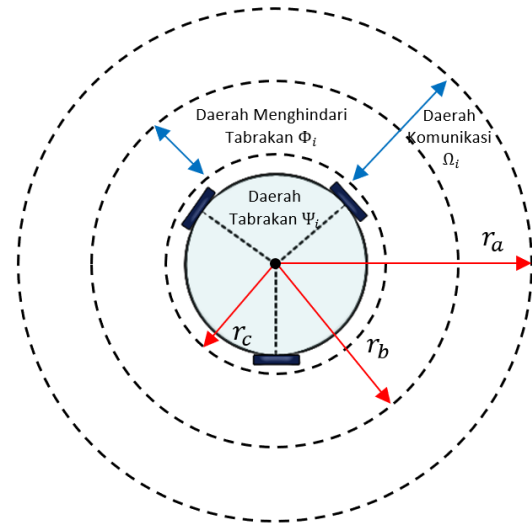
Pada layer ini, dirancang pengendali pada tingkat robot, seperti pada (3). Pengendali ini merupakan penjabaran dari algoritme konsensus.

$$\bar{u}_i = \dot{r}_i^d - \alpha_i(r_i - r_i^d) - \sum_{j=1}^n a_{ij}^v [(r_i - r_i^d) - (r_j - r_j^d)] \quad (3)$$

dengan  $\alpha_i$  adalah sebuah nilai skalar positif,  $a_{ij}^v$  adalah elemen  $(i, j)$  dari matriks adjacency  $A_n^v \in \mathbb{R}^{n \times n}$  yang berasosiasi dengan graf topologi interaksi  $G_n^v \stackrel{\text{def}}{=} (V_n^v, E_n^v)$ , untuk semua nilai  $(r_i - r_i^d)$  dan  $r_i^d = [x_i^d, y_i^d]^T$  dengan (4).

$$\begin{bmatrix} x_i^d \\ y_i^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos[\theta_{ci}] & -\sin[\theta_{ci}] \\ \sin[\theta_{ci}] & \cos[\theta_{ci}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{iF}^d \\ y_{iF}^d \end{bmatrix} \quad (4)$$

dengan mengikuti langkah pembuktian pada Teorema 3.6 pada [10], kendali  $u_i = \dot{r}_i^d - \alpha_i(r_i - r_i^d)$  sudah cukup untuk menjamin terjadinya konsensus formasi, yaitu dengan nilai  $r_i(t) \rightarrow r_i^d(t), i = 1, \dots, n$ , ketika  $t \rightarrow \infty$ .



Gbr. 3 Ilustrasi lapisan daerah pada metode penghindar tabrakan.

### C. Layer Behavior

Layer ini digunakan untuk penambahan metode penghindar tabrakan yang berfungsi untuk menghindari tabrakan antar robot yang terjadi saat pembentukan formasi. Metode penghindar tabrakan yang digunakan adalah metode Stipanovic [14]. Ilustrasi metode penghindar tabrakan ini ditunjukkan pada Gbr. 3.

Terdapat beberapa lapisan dalam metode ini, yaitu lapisan daerah tabrakan  $\Psi_i = \{x \in \mathbb{R}^2 | \|r_i - r_j\|_2 \leq r_c\}$ ,  $\Phi_i = \{x \in \mathbb{R}^2 | r_c \leq \|r_i - r_j\|_2 \leq r_b\}$ ; lapisan daerah menghindari tabrakan  $\Omega_i = \{x \in \mathbb{R}^2 | r_c \leq \|r_i - r_j\|_2 \leq r_a\}$ ; dan lapisan daerah komunikasi atau pendeteksian. Persamaan (5) adalah persamaan metode penghindar tabrakan. Persamaan ini terdiri atas dua bagian, yaitu kondisi jarak antar robot memasuki lapisan komunikasi  $r_c \leq \|r_i - r_j\|_2 \leq r_b$  dan di luar jangkauan komunikasi  $\|r_i - r_j\|_2 \geq r_b$ . Untuk jarak di luar jangkauan komunikasi,  $\frac{\partial V_{ij}}{\partial r_i} = 0$ , sedangkan jika jarak antar robot masuk lapisan komunikasi maka digunakan (5).

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial r_i} = \frac{4(r_c^2 - r_b^2)(r_b^2 - \|r_i - r_j\|_2^2)}{(\|r_i - r_j\|_2^2 - r_c^2)^2} (r_i - r_j)^T \quad (5)$$

dengan  $r_i$  adalah posisi robot  $i$ ,  $r_j$  adalah posisi robot  $j$ , dan  $\| \cdot \|_2$  adalah Euclidean distance.

**Asumsi 1:** Terdapat dua kondisi singularitas yang dapat terjadi pada metode penghindar tabrakan. Kondisi pertama terjadi di luar wilayah deteksi dengan  $\frac{\partial V_a}{\partial x} = \frac{\partial V_a}{\partial y} = 0$ , sedangkan kondisi kedua terjadi di dalam wilayah deteksi, dengan kondisi arah vektor referensi berlawanan dengan arah vektor untuk menghindari tabrakan.

**Asumsi 2:** Robot harus berbentuk konveks karena metode collision ini mengharuskan dimilikinya titik pusat yang nantinya mempunyai radius ukuran robot dan radius menghindar.

Pada kendali tingkat robot, kendali formasi berbasis konsensus pada (3) akan ditambahkan dengan metode penghindar tabrakan pada (5), yang gabungan persamaan ini juga digunakan pada [18]. Maka, persamaan kendali tingkat robot menjadi seperti pada (6).

$$u_i = \dot{r}_i^d - \alpha_i(r_i - r_i^d) - \sum_{j=1}^n a_{ij}^v [(r_i - r_i^d) - (r_j - r_j^d)] - \sum_{j=1}^n \frac{\partial V_{ij}}{\partial r_i} \quad (6)$$

dengan  $n$  adalah jumlah kemungkinan pertemuan robot; suku  $\dot{r}_i^d - \alpha_i(r_i - r_i^d) - \sum_{j=1}^n a_{ij}^v [(r_i - r_i^d) - (r_j - r_j^d)]$  digunakan untuk kendali konsensus; dan suku  $-\sum_{j=1}^n \frac{\partial V_{ij}}{\partial r_i}$  digunakan untuk penghindar tabrakan.

#### D. Layer Fisik Robot

Pada *layer* ini, penerapan algoritme konsensus diterapkan pada empat buah OMR. Model OMR yang digunakan di sini menggunakan “Y” dengan tiga buah roda *omni*, dengan setiap sudut penempatannya,  $\alpha$ , berbeda  $120^\circ$ , yaitu  $\alpha_1 = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 150^\circ$ , dan  $\alpha_3 = 270^\circ$ . Untuk mengetahui pergerakan OMR, perlu diketahui kinematika dari OMR tersebut.

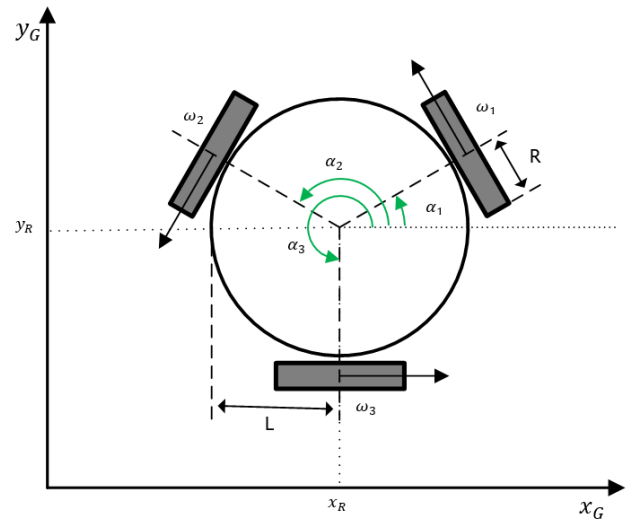
Kinematika adalah ilmu yang mempelajari gerak benda tanpa meninjau penyebab gerakan. Kinematika OMR terdiri atas dua bagian, yaitu kinematika maju (*forward kinematics*) dan kinematika mundur (*inverse kinematics*). Untuk menentukan kecepatan *body* OMR ( $v_x, v_y, \dot{\theta}$ ) dari kecepatan masing-masing roda, ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ), digunakan kinematika maju. Sementara itu, kinematika mundur digunakan untuk menentukan kecepatan sudut dari setiap roda *omni* ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) berdasarkan kecepatan robot ( $v_x, v_y, \dot{\theta}$ ).

Penerapan kendali dan penentuan posisi OMR dilakukan menggunakan Kerangka Koordinat Global (KKG), sedangkan penerapan kinematika OMR diterapkan pada Kerangka Koordinat Lokal (KKL). Oleh karena itu, KKG perlu diubah menjadi KKL supaya kinematika robot dapat digunakan. Hubungan antara KKG dan KKL ditunjukkan pada (7).

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Setelah posisi KKL diperoleh, selanjutnya kinematika OMR ditentukan. Gbr. 4 menunjukkan kinematika dari OMR yang digunakan. Pada Gbr. 4, jarak antara titik pusat OMR dengan pusat roda adalah  $L$  dan panjang jari-jari roda *omni* adalah  $R$ . Kinematika roda-roda *omni* berbeda dengan roda diferensial biasa, sehingga perlu ditentukan hubungan kecepatan setiap roda *omni* terhadap titik pusat OMR menggunakan (8).

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \omega_i \cos \left( \alpha_i + \frac{\pi}{2} \right) \\ \dot{y}_i &= \omega_i \sin \left( \alpha_i + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$



Gbr. 4 Kinematika robot dengan tiga roda *omni*.

dengan kecepatan setiap roda *omni* ditandai dengan  $\omega_i$ ,  $i = 1,2,3$ , dan  $\alpha_i$  adalah sudut yang terbentuk dengan sumbu  $x$ . Selanjutnya, ditentukan kecepatan tangensial roda *omni* ( $v_i$ ) dari kecepatan *angular* roda *omni* ( $\omega_i$ ) menggunakan (9).

$$v_i = R \omega_i, (i = 1,2,3). \quad (9)$$

Untuk menentukan kecepatan *angular*/sudut *body* robot ( $\dot{\theta}$ ) dari kecepatan *linear*/tangensial roda *omni* ( $v_i$ ), digunakan (10).

$$\dot{\theta} = \frac{v_i}{L}, (i = 1,2,3) \quad (10)$$

Dengan melakukan substitusi (9) dan (10), didapatkan kecepatan putar *body* robot ( $\dot{\theta}$ ) dari kecepatan putar roda *omni* ( $\omega_i$ ) pada (11).

$$\dot{\theta} = \frac{R}{L} \omega_i, (i = 1,2,3). \quad (11)$$

Berdasarkan (7) sampai (11), didapatkan kinematika maju seperti pada (12).

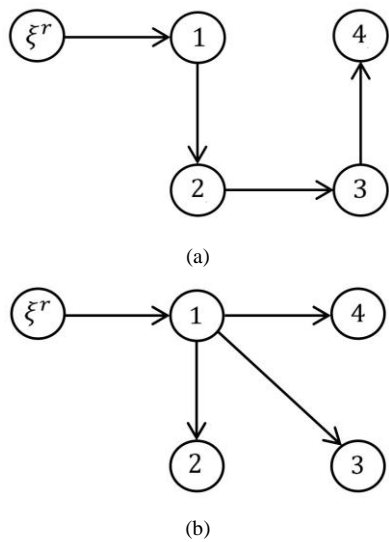
$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \left( \alpha_1 + \frac{\pi}{2} \right) & \cos \left( \alpha_2 + \frac{\pi}{2} \right) & \cos \left( \alpha_3 + \frac{\pi}{2} \right) \\ \sin \left( \alpha_1 + \frac{\pi}{2} \right) & \sin \left( \alpha_2 + \frac{\pi}{2} \right) & \sin \left( \alpha_3 + \frac{\pi}{2} \right) \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Dengan melakukan inversi terhadap (12), didapatkan persamaan kinematika mundur seperti pada (13). Parameter yang digunakan adalah  $R = 0,1$  meter dan  $L = 0,25$  meter.

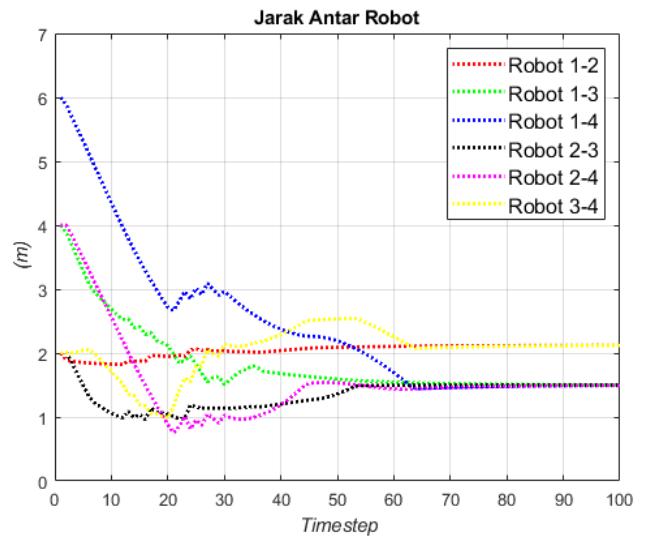
$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,33 & 5,773 & 0,83 \\ -3,33 & -5,773 & 0,83 \\ 6,67 & 0 & 0,83 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Setelah kinematika maju dan kinematika mundur diperoleh, KKL dikembalikan menjadi KKG sehingga OMR dapat terlihat dalam dua dimensi. Untuk mengetahui hubungan antara KKG dengan KKL, digunakan (14).

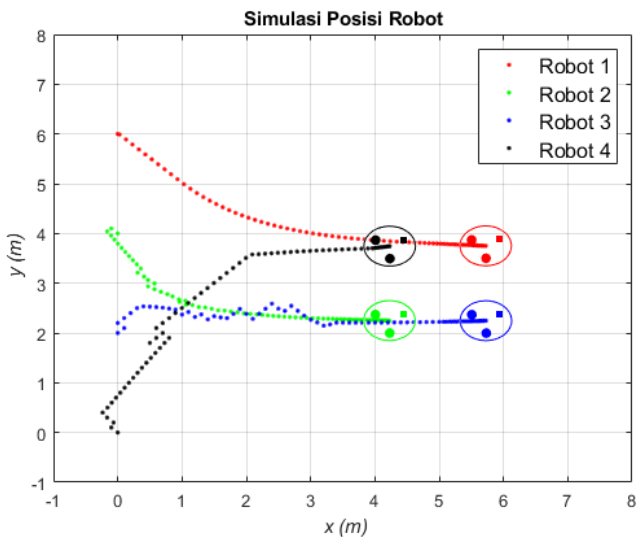
$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$



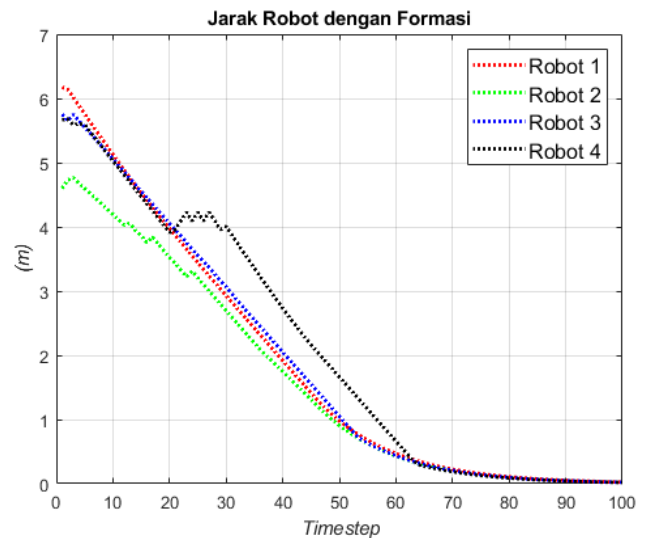
Gbr. 5 Topologi komunikasi, (a) topologi komunikasi 1, (b) topologi komunikasi 2.



Gbr. 7 Jarak antar robot OMR topologi 1.



Gbr. 6 Pergerakan posisi OMR topologi 1.



Gbr. 8 Jarak OMR dengan titik formasi topologi 1.

Pada tahap akhir, perubahan pergerakan OMR setiap iterasi dapat dilihat dengan mengubah KKL menjadi KKG, ditambah dengan posisi robot lama, sehingga didapatkan posisi OMR terbaru, seperti ditunjukkan pada (15).

$$\begin{bmatrix} x_{baru} \\ y_{baru} \\ \theta_{baru} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{lama} \\ y_{lama} \\ \theta_{lama} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ \theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

Posisi baru robot,  $x_{baru}$ ,  $y_{baru}$ ,  $\theta_{baru}$ , dan robot lama,  $x_{lama}$ ,  $y_{lama}$ ,  $\theta_{lama}$ , di-plot pada simulasi sehingga terlihat pergerakan dari posisi lama menuju posisi robot baru. Jumlah matriks posisi baru robot ditentukan berdasarkan jumlah iterasi yang telah ditentukan.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kendali formasi terdistribusi diawali dengan menentukan parameter yang dibutuhkan. Pada penerapan metode Stipanovic [14], diperlukan parameter nilai pada setiap

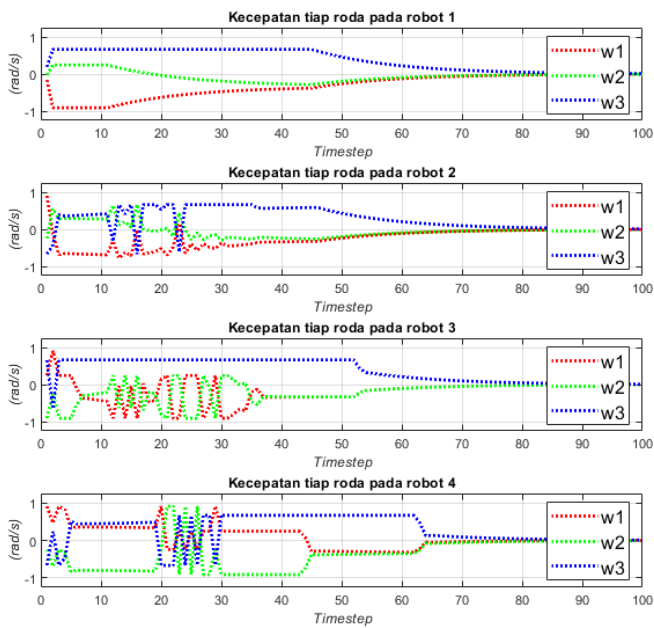
lapisan. Radius komunikasi yang digunakan adalah 1 meter dan batas minimum jarak untuk menghindari adalah 0,5 meter.

Topologi yang digunakan pada pengujian ini terdiri atas dua macam topologi, seperti pada Gbr. 5. Topologi pertama, ditunjukkan pada Gbr. 5(a), adalah topologi seri, dengan informasi,  $\xi^r$ , dikirim kepada robot 1, dari robot 1 kepada robot 2, dan seterusnya. Topologi kedua adalah topologi paralel, seperti pada Gbr. 5(b), dengan informasi,  $\xi^r$ , dikirim kepada robot 1 yang membagikan langsung ke seluruh robot. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh topologi terhadap komunikasi dari manuver setiap robot.

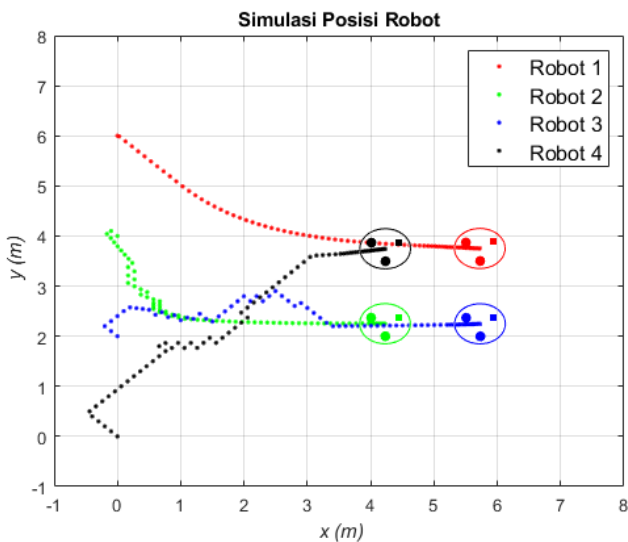
#### A. Topologi Komunikasi 1 Formasi Persegi

Pada topologi ini, digunakan formasi berbentuk persegi, yang ditandai dengan warna merah untuk robot 1, hijau untuk robot 2, biru untuk robot 3, dan hitam untuk robot 4. Pada makalah ini, orientasi robot tidak berubah, sehingga untuk menentukan urutan roda pertama pada sebuah OMR, digunakan tanda dengan simbol kotak.





Gbr. 9 Kecepatan tiap roda OMR topologi 1.

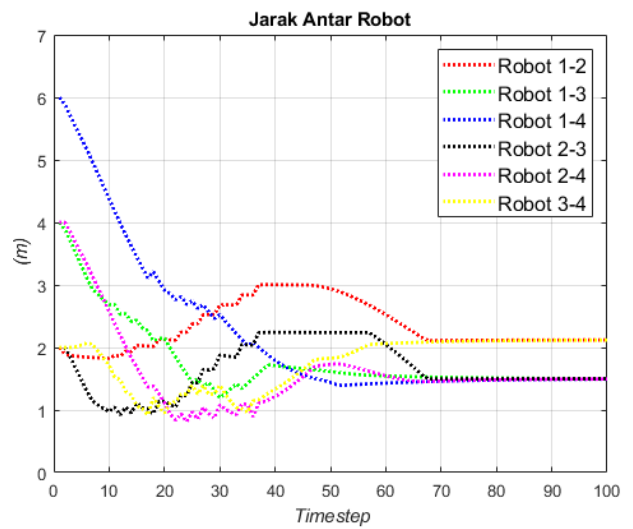


Gbr. 10 Pergerakan posisi OMR topologi 2.

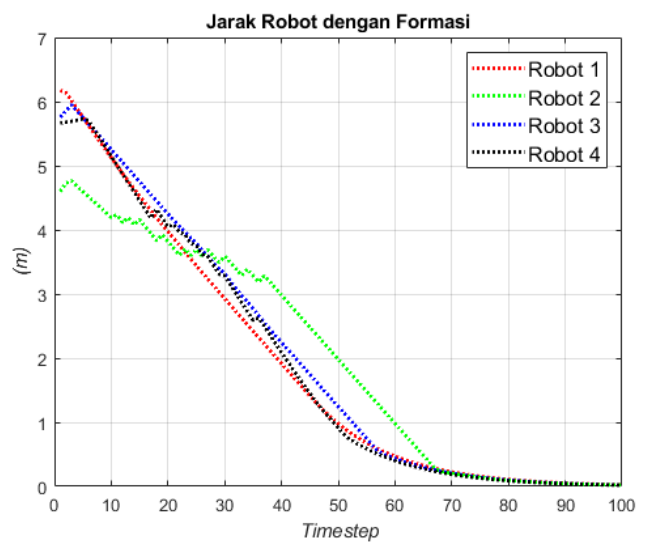
Gbr. 6 menunjukkan pergerakan setiap robot menuju formasi persegi, dengan titik *virtual structure* berada pada koordinat (5,3). Grafik jarak antar robot diperlihatkan pada Gbr. 7. Pada grafik, terdapat robot yang saling berdekatan, yaitu robot 2-4, 2-3, dan 3-4. Hal ini terjadi karena terdapat lintasan yang berdekatan antara robot tersebut. Dengan radius komunikasi 1 meter, setiap robot berhasil menjaga jarak aman, sehingga berhasil menghindari tabrakan antar robot.

Untuk memastikan bahwa robot telah mencapai formasi yang diinginkan, pada Gbr. 8 ditunjukkan jarak robot dari posisi awal sampai dengan titik yang diinginkan. Semua robot berhasil mencapai titik yang diinginkan, sehingga semua jarak mendekati nilai nol.

Pada tahap implementasi robot nyata, diperlukan masukan berupa kecepatan tiap roda *omni* yang diberikan kepada motor DC. Gbr. 9 menunjukkan grafik kecepatan masing-masing roda



Gbr. 11 Jarak antar robot OMR topologi 2.



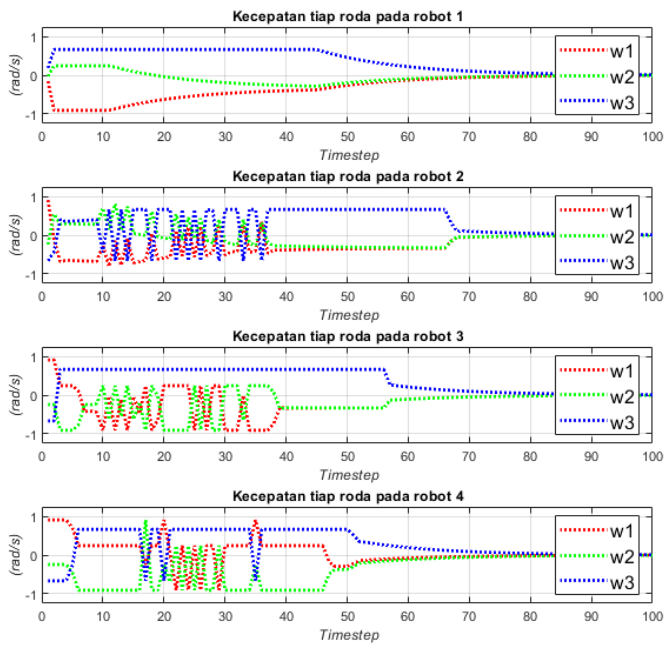
Gbr. 12 Jarak OMR dengan titik formasi topologi 2.

*omni* dari setiap robot. Pada simulasi ini, kecepatan maksimum setiap roda *omni* dibuat sebesar 1 rad/s, sehingga akan disesuaikan dengan implementasi secara nyata pada robot.

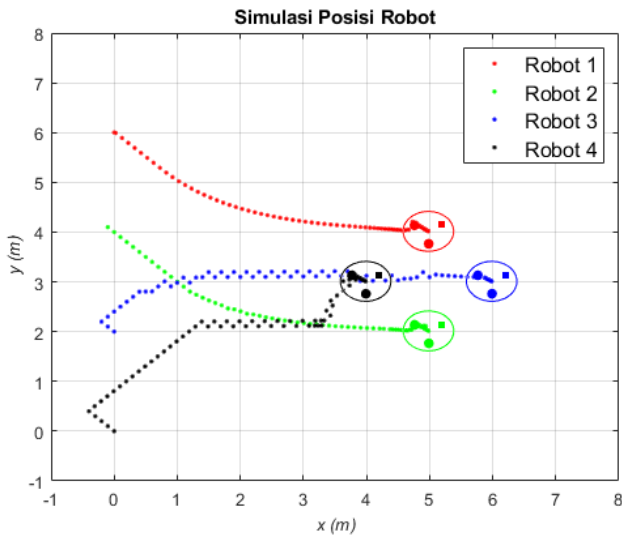
### B. Topologi Komunikasi 2 Formasi Persegi

Pada topologi komunikasi 2, komunikasi yang terjadi adalah  $\xi^r$  mengirimkan informasi kepada robot 1 dan informasi tersebut diberikan langsung kepada robot 2, robot 3, dan robot 4. Pergerakan keempat buah robot ditunjukkan pada Gbr. 10, dengan formasi persegi menggunakan topologi 2. Posisi awal setiap robot dibuat berbaris dengan posisi robot 1 pada (0,6), robot 2 pada (0,4), robot 3 pada (0,2), dan robot 4 pada (0,6).

Dari hasil penerapan topologi 2, setiap robot dapat membentuk formasi persegi dan dapat menghindari tabrakan satu sama lain. Perbedaan topologi 1 dan topologi 2 terlihat pada lintasan robot 2, robot 3, dan robot 4. Hal ini disebabkan waktu pengiriman data dari *leader* menuju *follower* ini berbeda, sesuai dengan topologi yang digunakan, sehingga setiap iterasi akan membentuk nilai baru dengan menggunakan (6) berdasarkan posisi terbaru setiap robot.



Gbr. 13 Kecepatan tiap roda OMR topologi 2.

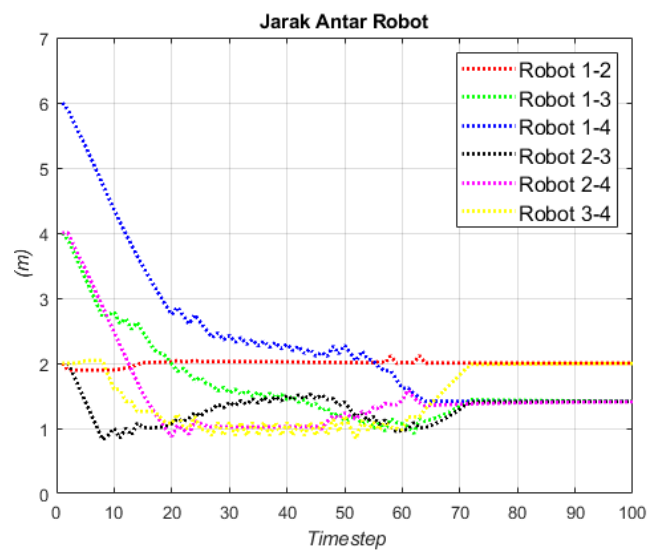


Gbr. 14 Pergerakan posisi OMR topologi 2.

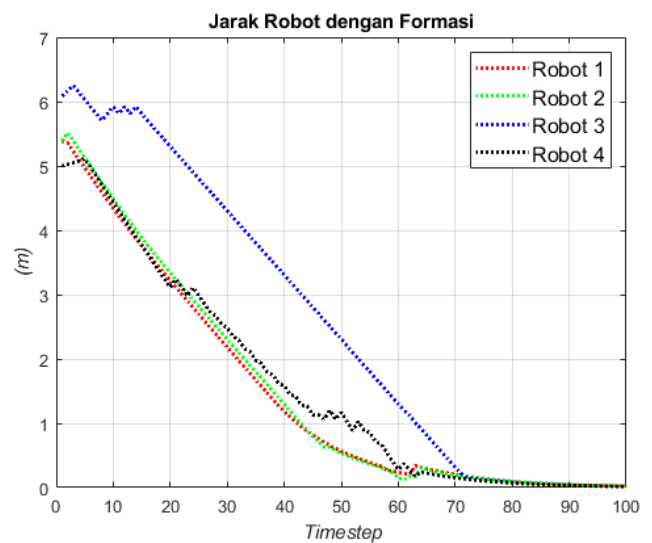
Pada Gbr. 7 dan Gbr. 11 tidak terlihat perbedaan yang signifikan antara penggunaan topologi 1 dan topologi 2, demikian juga pada Gbr. 8 dan Gbr. 12. Gbr. 13 menunjukkan grafik kecepatan setiap roda menggunakan topologi 2. Maka, penggunaan perbedaan topologi tetap dapat membentuk formasi yang diinginkan. Iterasi yang diperlukan untuk mencapai formasi yang diinginkan antara topologi 1 dan topologi 2 adalah 80 iterasi. Terlihat pada Gbr. 9 dan Gbr. 13 pada *timestep* 80 bahwa kecepatan setiap motor adalah 0 rad/s, yang menandakan robot sudah berada pada titik formasi yang diinginkan.

C. Topologi Komunikasi 2 dengan Formasi Belah Ketupat

Pada subbagian ini digunakan formasi lain, yaitu formasi belah ketupat menggunakan topologi komunikasi 2. Gbr. 14 menunjukkan bahwa telah berhasil dibentuk formasi belah



Gbr. 15 Jarak antar robot OMR topologi 2.



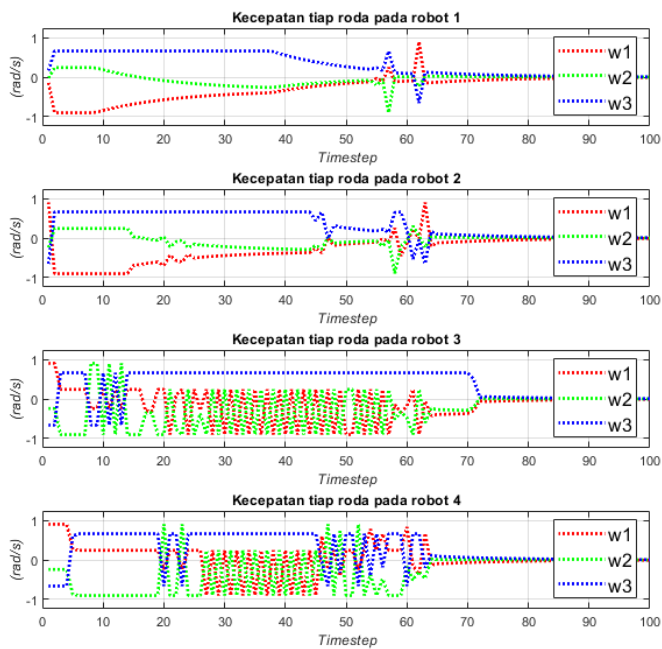
Gbr. 16 Jarak OMR dengan titik formasi topologi 2.

ketupat tanpa mengalami tabrakan antar robot. Pada formasi ini, pertemuan antar robot lebih banyak terjadi, jika dibandingkan dengan formasi persegi.

Terlihat pada Gbr. 15 bahwa jarak robot yang kurang dari radius komunikasi cukup banyak. Namun, setiap robot dapat menjaga jarak aman sehingga tidak terjadi tabrakan antar robot. Pada Gbr. 16 dan Gbr. 17 terlihat pula tidak terdapat banyak perbedaan dari topologi dan formasi. Maka, perubahan formasi mengakibatkan perbedaan lintasan setiap robot, tetapi setiap robot tetap dapat membentuk formasi yang diinginkan.

IV. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah dirancang dan disimulasikan kendali formasi terdistribusi dengan kemampuan menghindari tabrakan saat membentuk formasi. Kendali formasi terdistribusi yang dirancang terdiri atas empat layer, yaitu layer *consensus tracking*, layer kendali formasi berbasis konsensus, layer *behavior*, dan layer fisik robot. Robot yang digunakan adalah empat buah robot roda *omni* dengan konfigurasi tiga roda *omni*



Gbr. 17 Kecepatan tiap roda OMR topologi 2.

yang terpasang pada setiap robotnya. Kendali formasi yang telah dirancang berhasil membentuk formasi yang diinginkan dan memiliki kemampuan dapat menghindari tabrakan antar robot saat membentuk formasi dalam simulasi. Pengendali yang telah dirancang ini juga terbukti berhasil pada berbagai topologi komunikasi dan berbagai bentuk formasi. Perbedaan topologi dan formasi berpengaruh pada pergerakan lintasan robot dan waktu penyelesaian formasi. Tahapan selanjutnya yang dapat dilakukan adalah eksperimen menggunakan robot nyata sehingga dapat diketahui kinerja yang sesungguhnya.

#### REFERENSI

- [1] Y. Huang, Y. Zhang, dan H. Xiao, "Multi-Robot System Task Allocation Mechanism for Smart Factory," *Proc. 2019 IEEE 8th Jt. Int. Inf. Technol. Artif. Intell. Conf. (ITAIC 2019)*, 2019, hal. 587–591.
- [2] M. Alberri, S. Hegazy, M. Badra, M. Nasr, O.M. Shehata, dan E.I. Morgan, "Generic ROS-based Architecture for Heterogeneous Multi-Autonomous Systems Development," *2018 IEEE Int. Conf. Veh. Electron. Safety, (ICVES 2018)*, 2018, hal. 1–6.
- [3] Y.G. Kim, J.H. Kwak, D.H. Hong, J.H. Ahn, S.G. Wee, dan J. An, "Localization Strategy based on Multi-Robot Collaboration for Indoor Service Robot Applications," *2013 10th Int. Conf. Ubiquitous Robot. Ambient Intell. (URAI 2013)*, 2013, hal. 225–226.
- [4] S.N. Heo, S.Y. Lu, J.S. Shin, dan H.H. Lee, "Multi-Robot-Multi-Target Path Planning and Position Estimation for Disaster Area," *2018 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Robot. (ICT-ROBOT 2018)*, 2018, hal. 1–4.
- [5] Y.P. Pane, S. Fuady, dan K. Mutijarsa, "Overtaking in Centralized Multi Robot Formation Control Based on Pedestrian Behavior," *Proc. - UKSim 15th Int. Conf. Comput. Model. Simulation (UKSim 2013)*, 2013, hal. 271–276.
- [6] J. Shao, G. Xie, J. Yu, dan L. Wang, "Leader-following Formation Control of Multiple Mobile Robots," *Proc. 20th IEEE Int. Symp. Intell. Control. (ISIC '05), 13th Mediterr. Conf. Control Autom. (MED '05)*, 2005, hal. 808–813.
- [7] X.X. Yang, G.Y. Tang, Y. Li, dan P.D. Wang, "Formation Control for Multiple Autonomous Agents Based on Virtual Leader Structure," *Proc. 2012 24th Chinese Control Decis. Conf. (CCDC 2012)*, 2012, hal. 2833–2837.
- [8] Z. Wang, L. Wang, H. Zhang, dan Q. Chen, "A Graph based Formation Control of Nonholonomic Wheeled Robots Using a Novel Edge-weight Function," *2017 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern. (SMC 2017)*, 2017, hal. 1477–1481.
- [9] W. Ren dan N. Sorensen, "Distributed Coordination Architecture for Multi-Robot Formation Control," *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 56, No. 4, hal. 324–333, 2008.
- [10] W. Ren dan R.W. Beard, *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*, London, Inggris: Springer-Verlag, 2008.
- [11] J. Zhang, W. Wang, Z. Zhang, K. Luo, dan J. Liu, "Cooperative Control of UAV Cluster Formation Based on Distributed Consensus," *2019 IEEE 15th Int. Conf. Control Autom.*, 2019, hal. 788–793.
- [12] L. Liu, X. Liang, C. Zhu, dan L. He, "Distributed Cooperative Control for UAV Swarm Formation Reconfiguration Based on Consensus Theory," *2017 2nd Int. Conf. Robot. Autom. Eng. (ICRAE 2017)*, 2018, hal. 264–268.
- [13] A. Riid, D. Pahhomov, dan E. Rüstern, "Car Navigation and Collision Avoidance System with Fuzzy Logic," *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, 2004, hal. 1443–1448.
- [14] S. Mastellone, D.M. Stipanović, C.R. Graunke, K.A. Intlekofer, dan M.W. Spong, "Formation Control and Collision Avoidance for Multi-agent Non-holonomic Systems: Theory and Experiments," *Int. J. Rob. Res.*, Vol. 27, No. 1, hal. 107–126, 2008.
- [15] P.F. Hokayem, D.M. Stipanović, dan M.W. Spong, "Coordination and Collision Avoidance for Lagrangian Systems with Disturbances," *Appl. Math. Comput.*, Vol. 217, No. 3, hal. 1085–1094, 2010.
- [16] M. Gavani, D. Tanpure, dan P. Falake, "Path Planning of Three Wheeled Omni-Directional Robot Using Bezier Curve Tracing Technique and PID control Algorithm," *2019 IEEE Pune Sect. Int. Conf. (PuneCon 2019)*, 2019, hal. 1–6.
- [17] A. Phunopas dan S. Inoue, "Motion Improvement of Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots for Indoor Terrain," *Proc. Int. Conf. Artif. Life Robot.*, Vol. 22, 2017, hal. 607–612.
- [18] Z. Sun dan Y. Xia, "Consensus-based Formation Control with Dynamic Role Assignment," *26th Chinese Control Decis. Conf. (CCDC 2014)*, 2014, hal. 3681–3686.