e-ISSN: 3025-8189 ; p-ISSN: 3025-8197

JURNAL INOVASI DAN TREN

doi.org/10.35870/ljit.v4i.2.9105

Vol. 4, No. 2, Tahun 2026

Hal. 2149-2162

Homepage http://www.journal.lembagakita.com/ljit

Reduksi Kegagalan Formasi Multi-Omnidireksional karena *Deadlock Controller* Melalui Distribusi Tanggung Jawab Resiprokal

Putra Wisnu Agung Sucipto[1*], Annisa Firansanti[2], Muhammad Amin Bakri[3], Frano Riuji Arda Pratama[4], Fariz Ega Ahsani[5], Ahmad Aji Sulthon Adila[6], Fayyadh Sophie Rahmatullah[6]

Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia[1,4,5,6,7]

Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Indonesia, Kota Bekasi, Indonesia[2,3]

Email Korespodensi: putrawisnu.ft@um.ac.id

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima *28-10-2026*
Disetujui *24-11-2026*
Diterbitkan *28-11-2026*

ABSTRACT

This study addresses a controller dilemma in robot formation control: how to maintain a safe distance between robots while still moving toward target positions. In swarms that use the Artificial Potential Field (APF) approach, the attractive force toward a target and the repulsive forces from neighboring robots can cancel each other out, causing the formation to freeze (deadlock). To overcome this problem, we propose Reciprocal-APF (R-APF), a variant that distributes the avoidance vector proportionally among interacting robots instead of assigning the full avoidance burden to each robot. The method requires only position and proximity sensors and does not rely on a global planner. Simulations in Webots with six omnidirectional robots at a maximum linear speed of 3.7 m/s show that R-APF achieved 100% convergence in 7.027 s with no deadlocks, one safety-distance violation, and 42 chattering events. In contrast, standard APF and Leader-Follower failed to converge for 17 of 18 robots. Although R-APF converges more slowly than CBF and Virtual Structure, it yielded the smallest steady-state position error. Future work will validate the method on physical robots.

Keywords: *Omnidirectional Robots; Formation Control; Deadlock; Reciprocal; Multi-Robot Systems*

ABSTRAK

Penelitian ini membahas dilema pengendali dalam menjaga jarak aman antarrobot sekaligus bergerak menuju target formasi. Pada kawanan robot yang menggunakan *Artificial Potential Field* (APF), gaya tarik menuju target dan gaya tolak dari robot tetangga dapat saling meniadakan sehingga formasi berhenti bergerak (*deadlock*). Untuk mengatasinya, penelitian ini mengusulkan *Reciprocal-APF* (R-APF), yaitu varian APF yang membagi vektor penghindaran secara proporsional antarrobot yang berinteraksi, sehingga tanggung jawab penghindaran tidak lagi dibebankan sepenuhnya pada setiap robot. Metode ini hanya memerlukan sensor posisi dan kedekatan serta tidak membutuhkan perencana global. Pengujian pada simulator Webots dengan enam robot omnidireksional berkecepatan linear maksimum 3,7 m/s menunjukkan bahwa R-APF mencapai konvergensi 100% dalam 7,027 detik tanpa *deadlock*, dengan satu pelanggaran jarak aman dan 42 kali *chattering*. Sebaliknya, APF standar dan *Leader-Follower* gagal mengonvergenkan 17 dari 18 robot. Meskipun lebih lambat daripada CBF dan *Virtual Structure*, R-APF menghasilkan galat posisi tunak terkecil. Validasi pada robot fisik akan dilakukan pada penelitian selanjutnya.

Katakunci: Robot Omnidireksional; Pengendali Formasi; D*eadlock*; Resiprokal; Sistem Multi-Robot

Copyright @ 2026. Published by Lembaga Komunitas Informasi Teknologi Aceh (KITA), Indonesia. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). Based on a work at http://journal.lembagakita.com/ljit

Abstract & Indexing

CC BY-NC 4.0

OPEN ACCESS

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Sucipto, P. W. A., Firansanti, A., Bakri, M. A., Pratama, F. R. A., Ahsani, F. E., Sulthon Adila, A. A., & Rahmatullah, F. S. (2026). Reduksi Kegagalan Formasi Multi-Omnidireksional karena Deadlock Controller Melalui Distribusi Tanggung Jawab Resiprokal. LANCAH: Jurnal Inovasi Dan Tren, 4(2), 2149-2162. https://journal.lembagakita.com/ljit/article/view/9105

PENDAHULUAN

Kemampuan holonomik robot omnidireksional terletak pada fitur translasi dan rotasinya yang dapat dilakukan secara independen (R. Chen et al., 2026). Pada lingkungan kerja robot yang tidak terstruktur, kemampuan ini menawarkan keunggulan kinerja yang signifikan (Taheri & Zhao, 2020). Namun, tantangan muncul ketika posisi dan orientasi robot harus diraih secara simultan. Pengendali tentu akan memasok perintah yang proporsional dengan selisih antara posisi aktual dan target (Takahashi et al., 2013). Sementara itu, pengaturan haluan ditempatkan pada prioritas kedua, atau sebaliknya. Dilema sinyal kendali kembali muncul ketika gaya tarik target memaksa robot melaju cepat menuju posisi dalam formasi, sementara dorongan robot tetangga membuatnya harus mengerem demi terhindar dari tabrakan.

Mengatur pose dan kedudukan merupakan urusan yang sama-sama penting (Hacene & Mendil, 2019). Namun, ketika robot masuk dalam kerumunan, gaya tolak tetangga muncul sama besar dengan gaya tarik target (Grover et al., 2021; C. Hu et al., 2023). Pada kondisi ini, pengendali robot mengalami jalan buntu. Jika harus memenuhi gaya tarik melawan umpan balik aktual, akan terjadi tabrakan. Sebaliknya, jika mundur mengikuti gaya tolak, target posisi dalam formasi bisa semakin lama dicapai. Secara matematis, lahir pernyataan instruksi yang saling bertentangan, namun sama-sama penting. Keadaan ini memproduksi sinyal kendali ke aktuator dengan magnitudo bernilai nol (Grover et al., 2021; Ruiz-Fernandez et al., 2025; Z. Zhang et al., 2025; Dai et al., 2015).

Masalah ini menyebabkan formasi multi-robot omnidireksional gagal terbentuk. Secara logika, diam di tempat adalah pilihan aman bagi semua anggota dalam kerumunan. Tetapi, jika semua robot saling menunggu satu sama lain untuk bergerak, perubahan sinyal aktual kadang kala tidak mendukung. Terjadilah kebekuan formasi menyeluruh yang berakibat fatal apabila multi-robot diterapkan untuk urusan pengawasan area, pencarian dan penyelamatan, serta transportasi kooperatif (An et al., 2023; Drew, 2021; Li et al., 2024).

Fenomena ini dalam formasi robot omnidireksional telah diselidiki secara mendalam dalam literatur. Penelitian-penelitian tersebut dikelompokkan ke dalam tiga klaster utama. Pertama, berfokus pada pengaturan aktuasi berlebih. Setiap robot pengikut mengoptimalkan masukan kendali lokalnya berdasarkan lintasan yang diprediksi dari tetangganya dalam grafik komunikasi terarah (Duong et al., 2025). Efisiensi koordinasi dapat terjadi jika menggunakan metode ini. Namun, asumsi model dinamika robot tidak boleh salah diketahui agar pengontrol mode geser dapat mengaktuasi konvergensi asimtotik pada situasi dinamis (Mo et al., 2025). Perlu ditinjau pula efek saturasi aktuator yang, apabila muncul, dapat membuat kinerja memburuk. Polanya nonlinier, sehingga kompensator *anti-windup* statis dapat pula digunakan (Liu et al., 2025). Hanya saja, penerapannya masih terbatas karena sistem multi-agen memiliki kopling dinamis. Selain itu, ada metode *temporal rescaling* melalui mekanisme evaluasi pasca-optimisasi (Şenbaşlar et al., 2023). Melalui mekanisme ini, kemampuan aktuator diatur berdasarkan skala waktu lintasan. Walaupun tidak memaksa mengejar target di luar kapasitasnya, metode ini bukan pilihan ringan. Sebab, perencanaan lintasannya sangat padat aktivitas komputasi yang sulit untuk diaplikasikan secara waktu nyata pada prosesor berdaya rendah.

Pada klaster kedua, pengaturan kebuntuan sinyal pengendali didekati dengan mengelola rintangan dan *deadlock* secara parsial. Penghindaran rintangan tanpa kebuntuan sambil mempertahankan formasi dapat menggunakan matriks modulasi asimetris dinamis. Titik pelana di medan potensial dapat dihilangkan secara geometris (R. Chen et al., 2026). Namun, cara ini menuntut komputasi geometris yang rumit dibandingkan hanya perlu membuat target referensi baru yang dinamis. Referensi ini dibuat oleh sistem

bantu yang menghitung kesalahan konsensus antara status robot dengan tetangga virtualnya. Keluaran dari sistem bantu ini menghasilkan sinyal kendali yang "aman" dari risiko saturasi (Xiao et al., 2025). Sayangnya, metode ini memerlukan *tuning* parameter yang dinamis.

Penggunaan *Kontrol Prediktif Model Horizon Tak Terbatas dengan Resolusi Kebuntuan* juga dapat digunakan sebagai solusi alternatif (Y. Chen et al., 2024). Memang pasti terdapat jaminan matematis resolusi *deadlock*, dengan catatan horizon prediksi harus panjang. Ini termasuk bukan pilihan yang ringan dan sederhana. Dari sisi penyaluran daya presisi untuk eksekusi gerakan agar tidak buntu sinyal kendalinya, dapat saja menggunakan *Pengendalian Berbasis Ruang Nol dan Proses Fusi Multi-Perilaku yang Diprioritaskan*, *Sliding Mode Controller* (SMC), dan *Extended State Observer* (ESO) (Mo et al., 2024). Syaratnya, model harus presisi dan penalaan parameter harus adaptif.

Cara lainnya adalah dengan menjalankan pengendali dengan mode kerja *switching*. Dapat digunakan cara peralihan mulus hanya dengan menyesuaikan parameter dan *Pengamat Hibrida Waktu Terbatas* (J. Hu et al., 2024). Dimungkinkan proses peralihan tidak menyebabkan *chattering*. Namun, pada sistem multi-robot dengan interaksi kompleks tidak memperbolehkan klaim terbatas. Jaminan stabilitas dalam waktu terbatas dapat terwujud jika menggunakan *Struktur Pengidentifikasi Aktor Kritik*, *Pengamat Keadaan Fuzzy*, dan *Fixed-Time Boundedness* (J. Zhang et al., 2024). Bekerjanya bisa tanpa model walaupun memerlukan komputasi yang intensif pada perangkat keras yang sumber dayanya tidak terbatas. Pendekatan *Gradien yang Mulus dan Terbatas di Dekat Titik Nol* menawarkan *Solusi Perilaku Kejenuhan Pada Jarak Jauh* (Hernández et al., 2026). Metode ini membatasi gradien medan potensial di dekat target untuk mencegah osilasi. Namun, interaksi sistem multi-agen sangat dinamis antarobjek.

Klaster terakhir, pendekatan di dalamnya berfokus pada pengurusan formasi yang memiliki daya tahan. Salah satu metodenya adalah robot-robot mengikuti aturan yang dibuat oleh pemimpinnya. Setiap robot diasumsikan memiliki karakteristik yang sama dengan pemimpinnya (Karam et al., 2026), padahal tidak mungkin ada asumsi model pengikut yang persis sama antara satu robot dan robot lainnya. Begitu juga dengan model kontrol formasi robot bergerak multi-omnidireksional (OMR) dengan dinamika nonlinier yang tidak diketahui (Bi et al., 2026). Metode ini memerlukan *persistency of excitation* agar pergerakan sesaat tidak kehilangan estimasi.

Pendekatan matriks formasi lebih memberikan struktur yang lebih tergambar. Jarak dan kecepatan relatif antaragen serta hukum kontrol berbasis dinamika invers merupakan muatannya (Crespo et al., 2025). Namun, karena bekerja di ruang tepi, terjadi ketergantungan yang kuat dengan media komunikasinya. Apabila jalur komunikasi terbentuk, berbasis konflik yang ada, formasinya tetap dapat dibentuk (W. Zhang et al., 2024). Akan tetapi, asumsinya tidak bisa hanya pada ruang diskrit dengan mengabaikan pertimbangan dinamika kontinu. Sama dengan tawaran *Real-Time Planning using Linear Spatial Separations* (Şenbaşlar et al., 2023). Efisiensinya tercipta jika *sensing* posisinya presisi dan rabaan batasan aktuator sangat kuat.

Terlepas dari peningkatan kemampuan lintas metode yang telah diulas ini, banyak kesenjangan penelitian yang belum disentuh dan terselesaikan. Masih diperlukan identifikasi empiris *deadlock* yang disebabkan oleh interaksi simultan antara saturasi aktuator dan distribusi tanggung jawab yang tidak proporsional. Validasi mekanisme distribusi tanggung jawab resiprokal pada aktuator yang memiliki batasan fisik dibutuhkan agar dapat diintegrasikan dengan APF. Hal ini karena resultan gaya dorong dan tolak yang mencapai nilai nol pada saat yang tidak tepat bukanlah solusi utama dalam menghindari rintangan secara benar. Saling meniadakan secara simetris tidak boleh diperparah oleh saturasi aktuator. Walaupun ini dianggap gangguan kecil, diharapkan magnitudonya tidak membuat robot gagal "keluar" dari

kondisi *deadlock*.

Oleh karena itu, pekerjaan ini mengusulkan penyebaran tanggung jawab berdasarkan jarak relatif robot secara resiprokal. Mekanisme ini diintegrasikan pada APF yang sudah ada. Penelitian ini memberikan kontribusi pada dokumentasi kuantitatif proses, waktu, dan parameter terjadinya *deadlock*. Selain itu, ditawarkan mekanisme pendistribusian tanggung jawab pengendali secara resiprokal antarrobot. Berbeda dari APF standar, beban untuk melakukan penghindaran rintangan tidak dijalankan secara penuh oleh setiap robot. Melainkan, dilakukan pembagian vektor penghindaran secara proporsional. Implementasinya sederhana dan ringan serta hanya memerlukan pemindai posisi dan kedekatan untuk menghasilkan gaya virtual. Penerapannya dapat langsung terintegrasi dengan APF standar tanpa memerlukan perubahan arsitektur yang besar ketika diterapkan untuk membentuk formasi multi-robot.

METODE

Kami memakai APF standar sebagai basis konseptual. Setiap robot, i, memiliki vektor kecepatan yang dihitung berdasarkan dua komponen utama yaitu, gaya tarik menuju target dan gaya tolak dari robot tetangga. Gaya tarik menuju target dinyatakan sebagai:

$$F_{att,i} = k_{att} \cdot (p_{target,i} - p_i)$$

dengan: k_{att}= gain tarik, $p_{target,i}$= posisi target robot i, dan p_i= posisi aktual robot ke-i. Gaya tolak dari robot tetangga dinyatakan sebagai:

$$F_{rep,i} = \sum_{j \neq i} k_{rep} \cdot \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|} \cdot g(d_{ij})$$

dengan: k_{rep}= gain tolak, d_{ij}= jarak antara robot i dan robot j, $g(d_{ij})$= fungsi bobot yang bernilai besar ketika jarak dekat, dan nol ketika jarak melebihi radius deteksi. Fungsi bobot $g(d_{ij})$ didefinisikan sebagai:

$$g(d_{ij}) = \begin{cases} (R_{avoid} - d_{ij}) \cdot k_{avoid}, & \text{jika } d_{ij} < R_{avoid} \\ 0, & \text{jika } d_{ij} \geq R_{avoid} \end{cases}$$

dengan R_{avoid} adalah radius penghindaran dan k_{avoid} adalah gain penghindaran. Vektor kecepatan yang diinginkan adalah resultan dari kedua gaya:

$$v_{cmd,i} = F_{att,i} + F_{rep,i}$$

Vektor ini kemudian dibatasi oleh kecepatan linear maksimum.

$$v_{cmd,i} = \begin{cases} v_{cmd,i}, & \text{jika } \| v_{cmd,i} \| \leq v_{max} \\ \frac{v_{cmd,i}}{\| v_{cmd,i} \|} \cdot v_{max}, & \text{jika } \| v_{cmd,i} \| > v_{max} \end{cases}$$

Kontribusi utama penelitian ini adalah mekanisme distribusi tanggung jawab resiprokal, sehingga dinamai *Reciprocal Artificial Potential Field* (R-APF). Berbeda dari APF standar yang membebankan tanggung jawab penghindaran secara penuh pada setiap robot, mekanisme ini membagi vektor penghindaran secara proporsional antar robot yang berinteraksi. Prinsip dasarnya adalah ketika dua robot saling mendekat, masing-masing robot hanya menanggung sebagian dari tanggung jawab penghindaran. Besarnya tanggung jawab didasarkan pada jarak relatif dan orientasi masing-masing robot. Vektor penghindaran resiprokal untuk robot i terhadap robot j didefinisikan sebagai:

$$F_{recip,i,j} = \alpha_{ij} \cdot k_{rep} \cdot \frac{p_i - p_j}{\| p_i - p_j \|} \cdot g(d_{ij}) \quad ..$$

dengan α_{ij} adalah bobot distribusi tanggung jawab yang memenuhi:

$$\alpha_{ij} + \alpha_{ji} = 1,\ 0 \le \alpha_{ij} \le 1 \quad ...(7)$$

Bobot distribusi α_{ij} dihitung berdasarkan jarak relatif kedua robot terhadap target masing-masing:

$$\boldsymbol{\alpha_{ij} = \frac{d_{i,target}}{d_{i,target} + d_{j,target}}} \quad ...(8)$$

dengan: $d_{i,target}$= jarak robot i ke targetnya dan $d_{j,target}$= jarak robot j ke targetnya memakai pemindai jarak atau posisi seperti sensor GPS, ultrasonik atau enkoder.Interpretasi dari persamaan (8) adalah robot yang masih jauh dari target akhir posisinya diberikan prioritas untuk memakai jalur. Prioritas ini diberikan agar ia tak tertahan di tepi saat ada kemacetan. Bobot penghindaran rintangan lebih kecil agar ia merasa berada dalam posisi aman untuk bergerak kencang dalam formasi yang juga sedang bergerak. Di lain sisi, bagi robot yang sudah mendekati zona target akan melakukan pergeseran mikro, sebelum mekanisme peredaman jarak menguncinya. . Vektor penghindaran total untuk robot i menjadi:

$$\boldsymbol{F_{rep,i}^{recip} = \sum_{j \neq i} F_{recip,i,j}} \quad ...(9)$$

Sehingga vektor kecepatan yang diinginkan menjadi:

$$\boldsymbol{v_{cmd,i} = F_{att,i} + F_{rep,i}^{recip}} \quad ...(10)$$

Untuk mencegah tabrakan ketika jarak antar robot sangat dekat, diterapkan mekanisme darurat. Ketika jarak d_{ij}kurang dari radius darurat $R_{emergency}$, vektor kecepatan di-override oleh gaya darurat:

$$F_{emergency,i} = k_{emergency} \cdot \frac{p_i - p_j}{\| p_i - p_j \|} \quad ...(11)$$

dengan $k_{emergency}$ adalah gain darurat yang bernilai lebih besar dari gain penghindaran normal. Untuk mengurangi chattering yang disebabkan oleh peralihan mendadak antara mode formasi dan mode darurat, diterapkan mekanisme histeresis. Mode darurat diaktifkan ketika $d_{ij} < R_{emergency,on}$, dan dinonaktifkan ketika $d_{ij} > R_{emergency,off}$, dengan $R_{emergency,off} > R_{emergency,on}$.

Selain posisi, penelitian ini juga mengontrol orientasi/haluan/arah hadap (*heading*) robot. Setiap robot memiliki target *heading* yang telah ditentukan. Kontrol *heading* dilakukan dengan menggunakan data dari kompas. *Error heading* dinyatakan sebagai:

$$\boldsymbol{e_{\theta,i} = \theta_{target,i} - \theta_i} \quad ...(12)$$

dengan: $\theta_{target,i}$= *heading* target robot i dan θ_i= *heading* aktual robot i. Kecepatan sudut yang diinginkan dinyatakan sebagai:

$$\boldsymbol{\omega_i = k_\theta \cdot e_{\theta,i}} \quad ...(13)$$

dengan k_θ adalah gain *heading*. Kecepatan sudut ini kemudian dibatasi oleh ω_{max}. Untuk mencegah *chattering* dan *overshoot*, kontrol heading hanya diaktifkan ketika robot sudah dekat dengan target posisinya:

$$\omega_i = \begin{cases} k_\theta \cdot e_{\theta,i}, & \text{jika } d_{i,target} < R_{heading} \\ 0, & \text{jika } d_{i,target} \ge R_{heading} \end{cases} \quad ...(14)$$

Kecepatan linear dan kecepatan sudut yang telah dihitung diintegrasikan ke dalam kinematika robot omnidireksional:

$$v_0 = \frac{v_x - \omega \cdot R}{r} \quad ...(15)$$

$$v_1 = \frac{-0.5v_x + 0.866v_z - \omega \cdot R}{r} \quad ...(16)$$

$$v_2 = \frac{-0.5v_x - 0.866v_z - \omega \cdot R}{r} \quad ...(17)$$

dengan R adalah jarak dari pusat robot ke roda. Untuk mencegah saturasi aktuator yang dapat menyebabkan kehilangan kendali arah, diterapkan pembatasan kecepatan motor:

$$v_k = \begin{cases} v_k, & \text{jika } |v_k| \leq v_{motor,max} \\ \text{sign}(v_k) \cdot v_{motor,max}, & \text{jika } |v_k| > v_{motor,max} \end{cases} \quad ..$$

dengan $v_{motor,max} = 137$rad/s adalah kecepatan maksimum motor berdasarkan spesifikasi robot yang dipakai.

Eksperimen dalam pekerjaan ini dilakukan menggunakan simulator Webots dengan konfigurasi sebagai berikut: 1) jumlah robot: 6 robot omnidireksional; 2) formasi target: formasi heksagon dengan tiga varian kombinasi posisi akhir robot dalam formasi, yaitu varian 1 = {"Robotino 5", "Robotino 4", "Robotino 3", "Robotino 6", "Robotino 1", "Robotino 2"}; varian 2 = {"Robotino 1", "Robotino 6", "Robotino 2", "Robotino 5", "Robotino 3", "Robotino 4"}; dan varian 3 = {"Robotino 3", "Robotino 2", "Robotino 1", "Robotino 5", "Robotino 4", "Robotino 6"}, yang arah hadapnya semuanya tertuju ke titik tengah lingkaran; 3) durasi simulasi: 3000 langkah waktu, sekitar 96 detik; dan 4) metrik kinerja yang digunakan, yaitu: a) waktu konvergensi, yaitu waktu yang dibutuhkan robot untuk mencapai posisi di sekitar 0,10 m dari target; b) *error* posisi tunak, adalah *error* posisi robot saat robot berhenti di posisi akhir; c) frekuensi *deadlock*, merupakan situasi robot tidak bergerak lebih lama dari 3,0 s ketika jarak ke target masih lebih dari 0,30 m; d) jumlah pelanggaran jarak aman, yaitu jumlah kejadian potensi tabrakan robot yang dideteksi ketika jarak antar pusat robot kurang dari 0,35 m berdasarkan pembacaan data GPS, bukan sensor inframerah; e) frekuensi *chattering*, yaitu jumlah perpindahan mode perilaku; dan f) jumlah robot yang gagal mencapai target atau tidak konvergen dalam 40 s.

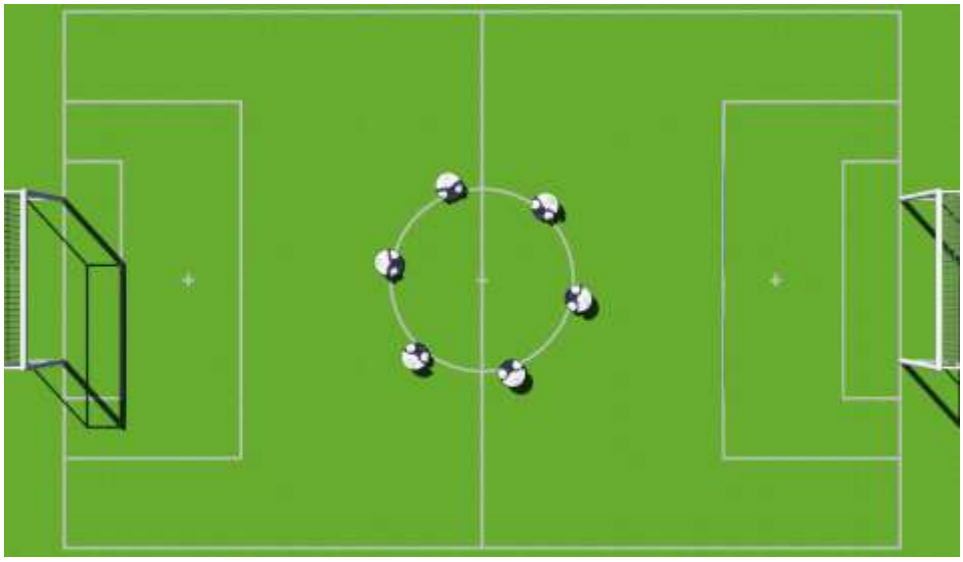
Radius heksagon di eksperimen ini adalah 1,545 m dari pusat ke salah satu titik sudutnya. Di setiap titik sudutnya ditetapkan titik koordinat yang menjadi tempat kedudukan robot dalam formasi. Setiap robot harus mendarat persis di tempat kedudukannya sebagaimana formasi varian 1–3, dengan *heading* yang mengarah ke pusat heksagon. Detail titik posisi dan haluan target per titik sudut heksagon dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Target posisi dan haluan setiap robot

Nomor Titik Simpul Hekasagon	Posisi (x, z) Target (m)	Haluan Target (°)
1	(-0,620; 1,444)	20,83
2	(-1,595; 0,246)	80,83
3	(-1,045; -1,198)	140,83
4	(0,475; -1,444)	-159,17
5	(0,906; 1,198)	-40,00
6	(1,455; -0,246)	-99,17

Sumber: Data penelitian, dihitung penulis berdasarkan konfigurasi formasi heksagon, 2026

Titik tengah formasi di letakkan di tengah lapangan pada koordinat (-0,07;0,00). Secara visual, bentuk formasi final robot dan kedudukan serta posisi masing-masing robot dalam formasi, sebagaimana ketentuan tabel 1 dijelaskan pada gambar 1.



Gambar 1. Bentuk formasi final robot
Sumber: Dokumentasi penulis dari simulasi Webots, 2026

Prosedur eksperimen pada penelitian ini adalah sebagai berikut: 1) inisialisasi posisi awal robot di sebuah koordinat posisi; 2) menetapkan titik akhir kedudukan dan haluan robot sebagaimana varian formasi; 3) menjalankan simulasi dengan metode yang diusulkan dan algoritma penantang; 4) merekam data posisi, *heading*, dan kecepatan motor setiap 32 langkah waktu; dan 5) membandingkan capaian kinerja antara metode yang diusulkan dan penantangnya. Sebagai metode navigasi reaktif, R-APF perlu dievaluasi kemampuannya dengan metode-metode yang basis pendekatannya serupa, yaitu APF standar, *leader-follower*, dan *behavior-based*. Lalu, dilakukan pengujian keandalan bebas-*deadlock* dan konvergensi terhadap ORCA, CBF, dan *Virtual Structure*. Tujuannya adalah untuk melihat kemampuan navigasi reaktif tanpa perencana global dalam menjamin kelancaran gerak saat menjaga batasan geometris tanpa perlu mengoptimasi ruang kendali. Setiap kali percobaan, akan ada 6 Robotino yang berjalan untuk sebuah algoritma, dari total 7 algoritma untuk 3 varian target kedudukan dan haluan akhir yang harus diraih.

Kami menerapkan skenario robot dengan kecepatan tinggi untuk menguji kinerja algoritma. Agar terjamin keadilan, selain kecepatan, ada 12 parameter identik yang diterapkan pada masing-masing algoritma penantang. Parameter tersebut adalah: 1) kecepatan linear maksimum = 3,7 m/s; 2) jarak aman = 1,8 m; 3) gain pengendali karena tarikan = 2,0; 4) gain pengendali karena tolakan = 2,0; 5) gain pengendali untuk penghindaran = 5,0; 6) gain pengendali situasi darurat = 9,0; 7) radius keadaan darurat aktif = 0,55 m; 8) radius keadaan darurat nonaktif = 0,70 m; 9) gain pengendali *heading* = 3,0; 10) kecepatan sudut maksimum = 4,0 rad/s; 11) radius aktivasi *heading* = 0,80 m; dan 12) kecepatan motor maksimum = 137 rad/s. Selain itu, berdasarkan eksperimen awal, ditemukan bahwa konfigurasi roda Robotino yang digunakan memiliki *offset* sudut referensi sebesar 32° terhadap sumbu koordinat dunia. Oleh karena itu, diperlukan koreksi rotasi sebelum diterapkan dengan ketentuan:

$$\begin{bmatrix} v_x' \\ v_z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & -\sin(\theta_c) \\ \sin(\theta_c) & \cos(\theta_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad ...(19)$$

dimana $\theta_c = -32°$ adalah sudut koreksi yang diperoleh dari kalibrasi eksperimental.

Seluruh metode pembanding diimplementasikan pada langkah waktu yang sama. APF Standar, *Leader-Follower*, dan *Behavior-Based* diterapkan mengikuti formulasi baku algoritmanya. Sementara itu,

parameter internal algoritma penantang disetel untuk menjamin konvergensi dan jarak aman, yang meliputi: 1) horizon waktu prediksi pada ORCA sebesar 2,0 s; 2) gain fungsi penghalang CBF = 2,0; 3) *Virtual Structure* dilengkapi dengan matriks dari umpan balik posisi; dan 4) ambang jarak peralihan perilaku *Behavior-Based* sebesar 1,3 m.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil percobaan yang merangkum agregat keseluruhan kinerja R-APF dan penantangnya dalam membentuk formasi "heksagon" dengan tiga target skenario posisi robot dijelaskan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan kinerja R-AP dan algoritma penantang

Algoritma	Waktu Konvergensi	Rata-rata Error Tunak *(m)*	Total *Deadlock*	Total Pelanggaran Jarak Aman	Total *Chattering*	Robot Gagal Konvergen
R-APF (Usulan)	7,027	0,00001	0	1	42	0 / 18
CBF	6,315	0,00077	0	1	0	0 / 18
Virtual Structure	5,718	0,00368	0	1	0	0 / 18
ORCA	7,681	0,00179	0	2	0	0 / 18
Behavior-Based	6,256	0,00559	0	0	62	0 / 18
APF Standar	7,597*	0,21261	0*	0	0	17 / 18
Leader-Follower	5,290*	0,67099	17	0	0	17 / 18

Sumber: Hasil simulasi Webots, diolah penulis, 2026

Data pada tabel ini bersumber dari hasil simulasi di Webots, diolah dari pengujian 7 algoritma yang diterapkan di 6 Robotino dengan 3 varian konfigurasi posisi akhir robot. Catatan tambahan untuk sel dengan isi berupa 0* artinya adalah robot terhenti sebelum ambang jarak > 0,30 m. Berdasarkan data eksperimen itu, terdapat bukti bahwa *deadlock controller* karena navigasi reaktif dan terpusat oleh APF Standar dan *Leader-Follower* membuat formasi rentan gagal terbentuk. APF Standar 95% cenderung gagal konvergen karena vektor gaya tarik target dan tolak sesama robot dalam kerumunan yang bertumpuk simetris saling memicu *local minimal* karena saling meniadakan dalam resultanya. Robot berhenti di luar zona target dengan kesalahan posisi sebesar 0,21261 m. Kondisi kinerja ini sama dengan *Leader-Follower* yang gagal pula membentuk konvergensi karena robot berhenti di luar radius target sejauh 0,67099 m.

Kenyataan berbeda terjadi ketika algoritma *Behavior-Based* bekerja. Semua robot dapat mencapai targetnya masing-masing, sehingga formasi terbentuk dengan sempurna. Arsitektur berbasis peralihan aturan rupanya dapat membuat robot tidak saling bertabrakan. Walaupun ada ketidakstabilan dinamis yang ditandai dengan 62 kali terjadinya peralihan mode perilaku. Hal ini terjadi karena saat saling berhadapan di sekitar target posisi, mereka harus menjaga posisi aman. Artinya, kita bisa saja tidak perlu menggunakan konsep seperti persamaan gaya yang dapat dihitung resultannya untuk memasok sinyal pengendali ke aktuator robot. Melainkan, hanya perlu menggunakan pernyataan operasi matematika diskrit untuk mengganti-ganti mode gerak aman. Sayangnya, masih ada kesalahan posisi sebesar 0,00559 m.

Selanjutnya, seluruh robot dapat pula dibuat konvergen menggunakan ORCA, CBF, dan *Virtual*

Structure untuk mempertahankan formasi di posisi target. Ketiga metode ini solid mempercepat konvergensi tanpa perlu terjadi *deadlock*. Hanya saja, kompromi kinetik dan keselamatannya berbeda. Algoritma *Virtual Structure* sebagai metode yang mampu membuat konvergensi dengan catatan waktu tercepat (5,718 s) mengalami 1 kali pelanggaran batas jarak aman (< 0,35 m) saat mengejar target di skenario 1 dengan kesalahan posisi sebesar 0,00368 m. Algoritma CBF berada di posisi kedua dalam upaya mempercepat konvergensi (6,315 s), menjaga kemungkinan potensi tidak menabrak rekan sesama tim karena tercatat hanya 1 kali melanggar jarak aman saat menjalankan skenario tiga dengan sisa jarak ke target 0,00077 m. Metode ini lebih cepat dibandingkan ORCA yang tercatat memerlukan waktu konvergensi selama 7,681 detik dengan 2 kali tabrakan saat menghindari rintangan silang, serta meninggalkan sisa jarak ke target 0,00179 m.

Berdasarkan bukti kinerja keenam algoritma pembanding tersebut, apabila dibandingkan dengan R-APF yang mampu membuat formasi tanpa *deadlock* (0 kejadian) dengan 100% tingkat keberhasilan konvergensi dalam waktu rata-rata 7,027 detik, dapat diungkap pola penghindaran tabrakan dan pemeliharaan formasi dari dua sudut pandang pendekatan. Pada pendekatan pertama, APF standar, *leader-follower*, dan *behavior-based* memerlukan koordinasi lintas organ algoritma secara terpusat maupun terdistribusi, atau melalui peralihan aturan (*rule-based*). Artinya, perhitungan vektor reaktif dapat dipilih selain logika diskrit untuk membuat perhitungan numerik agar robot tidak saling bertabrakan. Sementara itu, di balik ORCA, CBF, dan *Virtual Structure*, pembuatan sinyal kendalinya melalui optimasi terkendala dan pencerminan batas geometris. Akan tetap ada tinjauan vektor, tetapi hasilnya tidak langsung reaktif dilempar ke aktuator; hasil tersebut perlu disaring dan dipilih yang paling optimal dalam ruang kendali sebagai pendekatan untuk mengamankan robot agar tidak terjadi benturan.

R-APF terlihat mampu bekerja dalam kedua sudut pandang itu, dengan posisi tunak akhir terbaik yang mencapai 0,000001 m dari target di seluruh varian pengujian. Nilai ini secara kompromistis menempatkannya lebih unggul dibandingkan seluruh algoritma pembanding. Dari sudut pandang perhitungan resultan vektor gaya reaktif, R-APF mampu membuat perhitungan numerik agar robot tidak saling bertabrakan dibandingkan APF standar, sejalan dengan logika diskrit yang dipakai oleh *Behavior-Based*. Berbagi tanggung jawab mampu membuat robot konvergen, saling menjaga agar tidak saling bertabrakan dalam tim, dan mampu menekan frekuensi *chattering* lebih sedikit dibandingkan *Behavior-Based* (42 kali berbanding 62 kali). Di sisi lain, R-APF mampu menjaga potensi tabrakan tetap minimal dengan catatan hanya terjadi 1 kejadian saat menjalankan skenario persilangan padat di target posisi 3, setara dengan ORCA dan CBF. Walau ketiganya berpotensi gagal menjaga tabrakan, R-APF tervalidasi mampu membuat robot konvergen ke target, setara dengan yang dilakukan oleh ORCA, CBF, dan *Virtual Structure*. Tanpa perencana global dan tanpa sedotan waktu yang lama untuk membuat peta global, R-APF tetap dapat menjamin kelancaran gerak yang setara dengan pendekatan optimasi ruang kendali.

Secara intrinsik, ada empat mekanisme yang diduga berperan memasok keberhasilan ini, yaitu : 1) distribusi tanggung jawab resiprokal, sebagaimana persamaan (8), yang harus memenuhi persamaan (7) agar tak saling menahan ketika berdekatan dengan targetnya masing-masing; 2) pengaman eksplisit saat jarak robot sangat dekat dalam keadaan darurat dengan histerisis mampu mencegah *chattering*; 3) pengaturan haluan yang terintegrasi dalam kerangka gaya mampu mengoreksi translasi saat potensi *error heading* membesar dan mendorong robot tersesat; dan 4) proporsionalitas gaya tolak yang tidak berlebihan memakai distribusi a_{ij}, membuat gerak menghindari rintangan pada saat kecepatan tinggi, terbentuk halus tanpa osilasi. Kami melakukan uji pengunaan R-APF tanpa *alpha* dan fungsi histerisis untuk melihat

seberapa dekat robot menjangkau targetketika ada dan tidak kedua organ itu dalam R-APF. Hasilnya tersaji pada tabel 3 yang menunjukan bahwa penghilangan kedua organ ini menurukan akurasi posisi dibandingkan

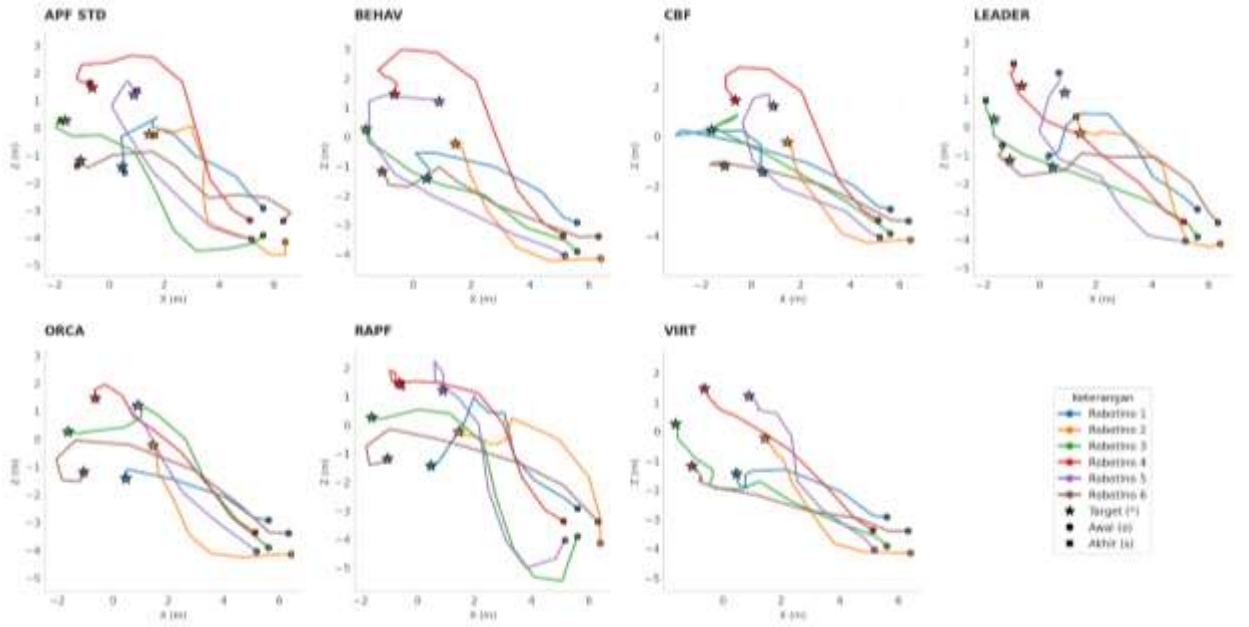
ketika memakainya secara utuh dalam R-APF. Menghilangkan alpha akan berdampak pada *error* posisi akhir membesar dan memperlambat konvergensi. Disisi lain jika mekanisme darurat/histeresis dihilangkan akan mengurangi jarak aman antar-robot.

Tabel 3. Perbandingan *ablation* organ alpha dan histerisis R-APF

Algoritma R-APF	Waktu Konvergensi (s)	Rata-rata *Error* Posisi Akhir (m)	Total Deadlock	Jarak Antar-Robot Minimum (m)	Total Pelanggaran Jarak Aman (< 0,35 m)	Total *Chattering*
Asli	7,027	0,00001	0	—	1	42
Tanpa alpha	8,403*	0,21255	0	0,5482	0	12
Tanpa Histeresis	7,379*	0,18210	0	0,3474	1	0

Sumber: Hasil simulasi Webots, diolah penulis, 2026

Jejak transisi posisi robot dari waktu ke waktu dijelaskan pada grafik dalam Gambar 3. Dapat dilihat bahwa Robotino dengan R-APF sejak awal sudah mengatur kerumunan agar memproduksi ruang aman bagi sesamanya. Tidak terlihat manuver saling silang di awal-awal pergerakannya, dibandingkan dengan algoritma penantang. R-APF bekerja dengan mengorbankan sedikit kecepatan untuk menjaga keselamatan penuh, walaupun semua algoritma dapat menjamin terselesaikannya misi perjalanan. Algoritma *Virtual Structure* memiliki garis lintasan yang jauh lebih pendek dibandingkan lainnya, namun harus dibayar dengan rapatnya ruang gerak saat pergerakan awal ketika robot mulai bermanuver.



Gambar 2. Grafik perbandingan lintasan gerak Robotino 1-6 dari posisi awal menuju target memakai R-APF dan penantangnya
Sumber: Hasil simulasi Webots, diolah penulis (Sucipto et al., 2027).

Konvergensi dan bebas tabrakan merupakan urusan yang harus dikompromikan secara wajar oleh

pemberi misi kerja. R-APF cocok untuk kerja multi-robot yang membutuhkan keselamatan tinggi dengan kecepatan moderat, seperti robot sepak bola, pemadam kebakaran, dan penjelajahan di ruang sempit. Sementara itu, ORCA dan CBF lebih cocok untuk pengujian simulatif multi-robot dengan kecepatan tinggi dengan risiko tabrakan yang dapat ditoleransi, seperti simulasi grafis atau animasi kerumunan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengusulkan sebuah varian lain dari APF yang dipekerjakan dalam pembentukan formasi multi-robot. Varian ini disebut R-APF, yang menawarkan distribusi tanggung jawab secara resiprokal ketika gaya-gaya virtual mulai berinteraksi antarrobot. Berdasarkan hasil eksperimen, R-APF berhasil mengeliminasi insiden tabrakan, *deadlock*, *chattering*, dan robot tidak konvergen. Meskipun waktu konvergensi lebih lama dibandingkan CBF dan *Virtual Structure*, *error* posisi tunak bisa sangat kecil dibandingkan yang lain. Terhadap APF Standar, pengaruh gaya tolak yang memicu tabrakan antarrobot dapat diantisipasi. *Chattering* yang terjadi dapat diantisipasi dengan mekanisme darurat dibandingkan *Behavior-Based*. Melalui tanggung jawab resiprokal, R-APF dapat membuat sinyal kendali instan tanpa gagal konvergen, namun juga mengeliminasi *deadlock* tanpa perencanaan ulang peta global. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk menguji R-APF pada robot fisik yang nyata karena saat ini masih berjalan di simulator.

KONTRIBUSI PENULIS

Artikel ini dibangun dari kontribusi para penulis. Penulis pertama berkontribusi dalam penyusunan ide dan gagasan naskah awal, termasuk konseptualisasi metodologi dan analisis data. Penulis kedua berkontribusi dalam penguatan substantif terhadap naskah. Penulis ketiga berperan dalam penyuntingan dan penyempurnaan naskah. Penulis keempat sampai ketujuh berperan dalam pekerjaan simulasi dan pengujian. Keseluruhan bangunan naskah ini telah mendapatkan persetujuan versi akhir, proporsi peran, serta tanggung jawab pekerjaan yang berkaitan dengan penelitian ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik secara finansial maupun non finansial, yang dapat mempengaruhi pelaksanaan penelitian, analisis data, penyusunan, maupun publikasi artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL (AI)

Kami memakai teknologi kecerdasan artifisial (AI) sebagai alat bantu dalam penggambaran ilustrasi grafis untuk penyuntingan gambar dan komponen kalimat dalam tata bahasa. AI tidak digunakan untuk aktivitas pabrikasi data. Seluruh isi artikel, interpretasi hasil, serta tanggung jawab atas keakuratan dan integritas naskah tetap berada pada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

An, X., Wu, C., Lin, Y., Lin, M., Yoshinaga, T., & Ji, Y. (2023). Multi-robot systems and cooperative object transport: Communications, platforms, and challenges. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, *4*, 23–36. https://doi.org/10.1109/OJCS.2023.3238324

Bi, W., Bi, W., Wang, W., Sui, S., & Philip Chen, C. L. (2026). Adaptive predefined-time formation control for multi-omnidirectional mobile robot systems with output constraints. *International Journal of Robust and Nonlinear Control, 36*(1), 19–30. https://doi.org/10.1002/rnc.70036

Chen, R., Zhang, Z., Zhang, Z., Li, J., & Zhang, H. (2026). Unified modulation matrix-based shared control for teleoperated multi-robot formation and obstacle avoidance. *Sensors, 26*(8), Article 2387. https://doi.org/10.3390/s26082387

Chen, Y., Guo, M., & Li, Z. (2024). Deadlock resolution and recursive feasibility in MPC-based multirobot trajectory generation. *IEEE Transactions on Automatic Control, 69*(9), 6058–6073. https://doi.org/10.1109/TAC.2024.3393126

Crespo, M., Junco, S., & Nacusse, M. (2025). Distance-based control in multi-agent systems via the formation matrix and its null-space. In *2025 IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* (pp. 135–140). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICAR65334.2025.11338725

Dai, Y., Kim, Y., Wee, S., Lee, D., & Lee, S. (2015). A switching formation strategy for obstacle avoidance of a multi-robot system based on robot priority model. *ISA Transactions, 56*, 123–134. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.10.008

Drew, D. S. (2021). Multi-agent systems for search and rescue applications. *Current Robotics Reports, 2*(2), 189–200. https://doi.org/10.1007/s43154-021-00048-3

Duong, T. P., Tran, H. T., Nguyen, V. Q., Dinh, L. Q., Le, U. V., & Nguyen, M. T. (2025). Distributed MPC with SQP for coordinated V-formation of omnidirectional robots in static obstacle fields. In *2025 8th International Conference on Control, Robotics and Informatics (ICCRI)* (pp. 26–30). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCRI67201.2025.11262493

Grover, J. S., Liu, C., & Sycara, K. (2021). Deadlock analysis and resolution for multi-robot systems. In *[Judul buku]* (pp. 294–312). [Penerbit]. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66723-8_18

Hacene, N., & Mendil, B. (2019). Motion analysis and control of three-wheeled omnidirectional mobile robot. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 30*(2), 194–213. https://doi.org/10.1007/s40313-019-00439-0

Hernández, E. E., Mirhajianmoghadam, H., Espinoza, E. S., & Carrillo, L. R. G. (2026). Predictive flocking of an omnidirectional multi-agent system for lattice formation: Sigma-norm design and comparative performance assessment. *IEEE Access, 14*, 3910–3925. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3650189

Hu, C., Hua, Y., Wang, Q., Dong, X., Yu, J., & Ren, Z. (2023). Potential field-based formation tracking control for multi-UGV system with detection behavior and collision avoidance. *Journal of the Franklin Institute, 360*(17), 13284–13317. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.09.060

Hu, J., Chen, B., & Ghosh, B. K. (2024). Formation–circumnavigation switching control of multiple ODIN systems via finite-time intermittent control strategies. *IEEE Transactions on Control of Network Systems, 11*(4), 1986–1997. https://doi.org/10.1109/TCNS.2024.3371597

Karam, Z. A., Hassan, M. Y., & Humaidi, A. J. (2026). Mobile robot formation control based on adaptive-τ Tustin differentiator for estimation of leader velocity. *International Review of Applied Sciences*

and Engineering, 17(2), 264–278. https://doi.org/10.1556/1848.2026.01262

Li, X., Lin, Y., Du, Z., Lin, M., & Wu, C. (2024). Intelligent multi-robot collaborative transport system. *Urban Lifeline, 2*(1), Article 16. https://doi.org/10.1007/s44285-024-00026-z

Liu, Y., Li, Y., & Shi, L. (2025). Leader-following formation control of omnidirectional mobile robots with actuator saturation. In *2025 44th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 6082–6087). IEEE. https://doi.org/10.23919/CCC64809.2025.11179333

Mo, Z., Liu, W., & Sun, H.-J. (2025). Behavioral control for multiple omnidirectional mobile robots via fully actuated system approach. *International Journal of Systems Science, 56*(13), 3177–3193. https://doi.org/10.1080/00207721.2025.2506004

Mo, Z., Liu, W., Wu, Y.-Y., & Sun, H.-J. (2024). Fully actuated behavioral control for multiple omnidirectional mobile robots system with uncertain dynamics. In *2024 3rd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (FASTA)* (pp. 189–194). IEEE. https://doi.org/10.1109/FASTA61401.2024.10595242

Ruiz-Fernandez, L. E., Ruiz-Leon, J., Gomez-Gutierrez, D., & Murrieta-Cid, R. (2025). Decentralized multi-robot formation control in environments with non-convex and dynamic obstacles based on path planning algorithms. *Intelligent Service Robotics, 18*(2), 215–232. https://doi.org/10.1007/s11370-024-00582-x

Şenbaşlar, B., Hönig, W., & Ayanian, N. (2023). RLSS: Real-time, decentralized, cooperative, networkless multi-robot trajectory planning using linear spatial separations. *Autonomous Robots, 47*(7), 921–946. https://doi.org/10.1007/s10514-023-10104-w

Taheri, H., & Zhao, C. X. (2020). Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches. *Mechanism and Machine Theory, 153*, Article 103958. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103958

Takahashi, M., Suzuki, T., Matsumura, T., & Yorozu, A. (2013). Dynamic obstacle avoidance with simultaneous translational and rotational motion control for autonomous mobile robot. In *[Judul buku]* (pp. 51–64). [Penerbit]. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31353-0_4

Xiao, Z., Zhang, D., & Tao, J. (2025). Adaptive event-triggered set-membership formation of heterogeneous multi-agent systems with application to omnidirectional robots. *Control Engineering Practice, 162*, Article 106384. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106384

Zhang, J., Fu, Y., & Fu, J. (2024). Adaptive fixed-time output-feedback optimal time-varying formation control for multiple omnidirectional robot systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 32*(3), 792–803. https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2023.3308573

Zhang, W., Street, C., & Mansouri, M. (2024). A decoupled solution to heterogeneous multi-formation planning and coordination for object transportation. *Robotics and Autonomous Systems, 180*, Article 104773. https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104773

Zhang, Z., Zhang, Y., Zhao, X., Tao, B., & Ding, H. (2025). Deadlock-aware control for multirobot coordination with multiple safety constraints. *IEEE Transactions on Robotics, 41*, 5209–5228. https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3600159