Journal of Science and Social Research ISSN 2615 – 4307 (Print)
Oct 2026, IX (5): 9549 – 9555 ISSN 2615 – 3262 (Online)
Available online at http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR

MEKANISME HISTERISIS DARURAT UNTUK *ARTIFICIAL POTENTIAL FIELD* (APF) PADA MULTI-ROBOT OMNIDIREKSIONAL

Putra Wisnu Agung Sucipto[1], Annisa Firansanti[2]
[1]Universitas Negeri Malang, Malang
[2]Universitas Muhammadiyah Indonesia, Indonesia
e-mail: [1]putrawisnu.ft@um.ac.id

Abstract: *The APF method is well-suited for controlling omnidirectional multi-robot formations due to its simplicity. However, the resultant force—derived from repulsive forces that appear and disappear abruptly—can cause oscillations when a robot is near the threshold of its avoidance radius. This research proposes integrating an emergency hysteresis mechanism into the APF framework to mitigate such oscillations. The mechanism is defined by two threshold variables, $R_{EMERGENCY_ON}$ and $R_{EMERGENCY_OFF}$, without altering the underlying force structure. Once triggered by an interaction with a neighboring robot, the emergency mode remains active until a safe inter-robot distance is restored. Experiments were conducted using the Webots simulator with six omnidirectional Robotino robots, which maintained a hexagonal formation at a maximum speed of 3.7 m/s. The results demonstrate that this mechanism reduces steady-state position error, maintains a safe minimum distance well above the threshold, and transforms oscillations into a monotonic pattern as the robots approach their final targets. In conclusion, this mechanism is simple in design and effectively enhances the stability of the standard APF. From a practical, it can be directly incorporated into an APF-based system without imposing a significant computational burden. Future research should focus on validation using physical robots and involving dynamic obstacles.*

Keyword: *APF; Hysteresis; Multi-robot Omnidirectional robot; Oscillation; Multi-robot formation;*

Abstrak: APF sangat cocok untuk mengendalikan formasi multi robot omnidireksional, karena kesederhanaannya. Namun, kerana resultan gayanya dipasok oleh kemunculan gaya tolak yang mucul dan hilang mendadak, lahir osilasi, ketika robot berada di ambang radius penghindaran. Penelitian ini mengusulkan pemasangan mekanisme histerisis darurat ke dalam tubuh APF untuk mengurangi osilasi tersebut. Tanpa mengubah struktur gayanya, mekanisme ini didefinisikan oleh $R_{EMERGENCY_ON}$ dan $R_{EMERGENCY_OFF}$ sebagai variabel ambang batas. Sehingga, situasi darurat ketika tetangga robot datang berinteraksi, tetap bisa dalam keadaan aktif hingga robot berada dalam jarak aman antar sesamanya. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan memakai simulator Webots, memakai enam robot omnidireksional Robotino, formasi heksagon bisa terbentuk walau kecepatan diatur maksimum 3,7 m/s. Hasil menunjukkan bahwa mekanisme ini mampu menurunkan *error* posisi tunak, menahan robot pada jarak minimum aman jauh di atas ambangnya, dan menahan osilasi serta mengubahnya menjadi pola monoton saat robot mengejar target. Simpulannya, mekanisme ini memiliki organ yang sederhana dan mampu memperbaiki stabilitas APF standar. Secara praktikal, bisa ditempelkan langsung pada APF tanpa menambah beban komputasi yang signifikan. Pada penelitian selanjutnya dibutuhkan validasi pada robot fisik dan skenario rintangan dinamis.

Kata kunci: APF; Histerisis; Multi-robot Omnidireksional; Osilasi; Formasi Multi-robot;

PENDAHULUAN

Robot omnidireksional memiliki

kemam-puan holonomik yang memadukan translasi dan rotasinya namun bekerja secara independen (Chen et al., 2026). Cara kerja robot ini membuatnya handal untuk bekerja pada lingkungan yang tidak terstruktur (Taheri & Zhao, 2020). Akan tetapi, Ketika harus memilih antara mengatur posisi atau arah hadap, kadangkala muncul tantangan. Secara simultan, tak boleh ada keraguan untuk me-masok perintah secara proporsional disaat ada dua pilihan besaran yang musti dikendalikan agar robot menjangkau target (Takahashi et al., 2013).

Mengarahkan robot omni agar menghadap ke sebuah orientasi sesaat posisinya diatur, sangat penting. Begitu pula sebaliknya, ketika mengatur posis lebih dahulu dibanding arah hadap (Cortés-Antonio et al., 2025). Tetapi, ketika me-makai APF, (Hu et al., 2023; Hwang et al., 2022), akan ada tantangan dari gaya tolak tetangga yang muncul sama besar dengan gaya tarik target (Hu et al., 2023; Grover et al., 2021). Pada situasi ini, tak ada jalan untuk mundur karena dorongan tetangga, tetapi kuat juga tarikan dari target. Jika tak mengambil Keputusan maka semakin lama formasi robot terbentuk, atau bisa saja tak tercapai.

Kedua gaya ini juga akan memasok osilasi, ketika robot berada di ambang radius penghindaran (Ruiz-Fernandez et al., 2025; Zhang et al., 2025). Akan ada tolakan dan tarikan yang menyebabkan peralihan sinyal kendali (Grover et al., 2021; Dai et al., 2015). Sehingga, durasi menuju kon-vergensi menjadi lebih Panjang dan mening-katkan konsumsi energi (Hwang et al., 2022; Meng et al., 2025).

Menyelesaikan tantangan ini bisa dik-erjakan dengan bantuan proses komputasi penalaan parameter. Metodenya bisa memakai gradien mulus di dekat target (Hernández et al., 2026), matriks modulasi asimetris (Chen et al., 2026), atau target referensi dinamis (Xiao et al., 2025). Hanya saja, organ dalam APF harus diganti total. Belum ada solusi sederhana yang hanya menambahkan satu mekanisme pada APF standar tanpa mengu-bah struktur persamaan.

Artikel ini mengusulkan mekanisme alter-nitif pengaturan keadaan histerisis ini. Kontribusi kami terletak pada 1) mekanisme transfer memakai blok histerisis dengan batas atas dan bawah ke mekanisme dalam organ APF dan 2) menerapkan ini sebagai cara pembentukan formasi dengan kecepatan ting-gi. Harapannya, histerisis darurat yang sederhana ini bisa memperbaiki kestabilan APF.

Osilasi dan histerisis merupakan tantangan yang dihadapi oleh penelitian-penelitian pen-gendalian robot omnidireksional. Terdapat tan-tangan kinematika juga daya tahan yang me-nyertainya. Karam et al. (2026) mengusulkan kontrol formasi berbasis adaptive-τ Tustin dif-ferentiator. Keadaan masing-masing anggota ditentukan dari hasil estimasi kecepatan pem-impin. Hanya saja para pengikut mesti mem-iliki model dinamika yang identik dengan pem-impin. Bi et al. (2026) mengusulkan pengen-dalian formasi dengan predefined-time untuk sistem multi-robot omnidireksional yang mem-iliki batasan output. Akan tetapi, keduanya tidak membahas osilasi yang muncul saat robot berada di ambang radius penghindaran.

Di sisi lain, Crespo et al. (2025) memperke-nalkan matriks formasi dan null-space. Struktur formasi yang lebih kaku dan terukur bisa dikendalikan berbasis jarak. Hanya saja Ketika ada transisi antara pengaturan jarak dan orientasi untuk menjangkau sebuah posisi, kestabilan transisi belum didalami. Konver-gensi merupakan target utama semua pen-gendali ini, tetapi aspek kestabilan di titik am-bang perlu mendapatkan perhatian mendalam.

Histerisis terjadi pada APF saat gaya tarik dan tolak berinteraksi. Metode ini populer ka-rena kesederhanaannya dalam menyusun magnitude dan arah hadap. Namun, saat histeris aktif dikala sempitnya batas kedua gay aini, osilasi robot terbentuk sesaat setelah mode penghindaran rintangan dijalankan.

Journal of Science and Social Research ISSN 2615 – 4307 (Print)
Oct 2026, IX (5): 9549 – 9555 ISSN 2615 – 3262 (Online)
Available online at http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR

Hwang et al. (2022) dan Meng et al. (2025) telah mengakui masalah ini. Hwang et al. (2022) mengusulkan tambahan redaman, tetapi bisa saja itu memperlambat konvergensi. Sedangkan, Meng et al. (2025) mena-warkan scale-shift governor yang mengatur skala waktu lintasan. Tetapi, untuk perangkat dengan prosesor daya rendah, ini membebani.

Kedua solusi ini tak lahir sendirian. Ada pula Solusi lain yang juga bersifat kompleks dan tidak sederhana. Hernández et al. (2026) menyarankan perhitungan gradien mulus di dekat target untuk mencegah osilasi. Chen et al. (2026) juga menawarkan solusi menghilangkan histerisis yang digambarkan sebagai pelana kuda. Titik pelananya bisa di-hilangkan memakai matriks modulasi as-imetris dinamis. Tentu dengan komputasi geometris yang tidak sederhana, belum lagi pen-alaan parameter.

Histerisis adalah mekanisme state machine yang mencegah peralihan mendadak antara dua mode. Dalam konteks multi-robot, histe-resis telah dipakai untuk berbagai tujuan. Histerisis kerap diperlukan, utamanya ketika harus ada peralihan formasi. Tetapi chattering harus bisa ditangani, sebagaimana yang dilakukan oleh Dai et al. (2015). Hu et al. (2024) memakai histerisis untuk formasi *circumnavigation switching* pada sistem ODIN, agar mempercepat konvergensi. Sementara itu, Xiao et al. (2025) memandang penting histerisis untuk mengurangi beban komunikasi.

Meskipun demikian, histerisis yang di-manfaatkan untuk mengelola gaya dalam APF agar tak terjadi osilasi pada titik pelananya, belum ada. Semua histerisis bekerja untuk kegunaan pada level perilaku, kontrol switch-ing, dan komunikasi.

Celah inilah yang akan ditempati oleh luaran penelitian ini yang akan mempertimbangkan : 1) aspek kestabilan transisi gaya yang perlu pematangan walaupun kematangan urusan konvergensi telah banyak dibahas, 2) Solusi osilasi berupa metode yang sederhana dan ringan secara komputasi diantara komputasi geometri yang kompleks, dan 3) pemanfaatan histerisis ke dalam diri resultan gaya APF standar di dalam pelana ra-dius penghindaran. Secara kongkrit, penelitian ini mengisi ruang sempit itu dalam bentuk transfer mekanisme histerisis darurat, tanpa mengubah struktur gaya tarik-menarik APF.

METODE

Robot omnidireksional tiga roda memiliki kinematika:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{r}\begin{bmatrix} \cos(0°) & \sin(0°) \\ \cos(120°) & \sin(120°) \\ \cos(240°) & \sin(240°) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad ...(1$$

dengan r adalah jari-jari roda. Di sisi lain, APF dibentuk oleh gaya tarik menuju target:

$$F_{att,i} = k_{att} \cdot \left(p_{target,i} - p_i\right) \quad ...(2)$$

dan gaya tolak dari tetangga:

$$F_{rep,i} = \sum_{j \neq i} k_{rep} \cdot \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|} \cdot g\left(d_{ij}\right) \quad ...(3)$$

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

$$g\left(d_{ij}\right) = \begin{cases} \left(R_{avoid} - d_{ij}\right) \cdot k_{avoid}, & \text{jika } d_{ij} < R_{avo} \\ 0, & \text{jika } d_{ij} \geq R_{avo} \end{cases} \quad ...(4)$$

dimana, resultan gayanya adalah :

$$v_{cmd,i} = F_{att,i} + F_{rep,i} \quad ...(5)$$

Mekanisme histerisis darurat **u**ntuk setiap robot *i*, diaktifkan oleh ketentuan

$$H_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{jika } \exists j: d_{ij}(k) < R_{\text{ON}} \\ 0, & \text{jika } \forall j: d_{ij}(k) > R_{\text{OFF}} \\ H_i(k-1), & \text{selainnya (zona histerisis)} \end{cases}$$

Ketika H_i = 1, gaya darurat berikut ini diaktifkan

$$F_{\text{emerg},i} = \sum_{j \neq i} k_{\text{emergency}} \frac{p_i - p_j}{\| p_i - p_j \|} \quad ...(7)$$

dengan resultan gayanya adalah :

$$v_{\text{cmd},i} = \begin{cases} F_{\text{emerg},i}, & H_i = 1 \\ F_{\text{att},i} + F_{\text{rep},i}, & H_i = 0 \end{cases} \quad ...(8)$$

Kecepatan sudut robot dinyatakan sebagai:

$$\omega_i = k_\theta \cdot e_{\theta,i} \quad ...(9)$$

dengan k_θ adalah gain *heading* yang mempertimbangkan proporsionalitas *error heading* sehingga :

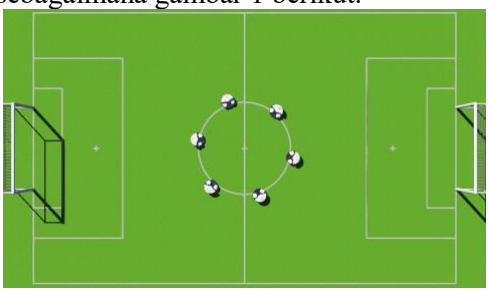
Journal of Science and Social Research ISSN 2615 – 4307 (Print)
Oct 2026, IX (5): 9549 – 9555 ISSN 2615 – 3262 (Online)
Available online at http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR

$$\omega_i = \begin{cases} k_\theta \cdot e_{\theta,i}, & \text{jika } d_{i,\text{target}} < R_{\text{heading}} \\ 0, & \text{jika } d_{i,\text{target}} \geq R_{\text{heading}} \end{cases} \quad ...(10$$

dengan $d_{i,\text{target}}$ adalah jarak Euclidean robot i ke target posisinya, dan R_{heading} adalah radius aktivasi kontrol *heading*. Kecepatan sudut ini kemudian dibatasi oleh ω_{max},

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\max}, & \text{jika } k_\theta \cdot e_{\theta,i} > \omega_{\max} \\ -\omega_{\max}, & \text{jika } k_\theta \cdot e_{\theta,i} < -\omega_{\max} \\ k_\theta \cdot e_{\theta,i}, & \text{selainnya} \end{cases} \quad ...(1$$

Eksperimen atas penggunaan mekanisme ini, dilakukan memakai simulator *Webots* dengan konfigurasi final formasi yang harus dibentuk adalah sebagaimana gambar 1 berikut.



Gambar 1 Bentuk formasi final robot

Formasi pada gambar 1, dikonstruksi robot dengan radius 1,545 m dari pusat lapangan pada koordinat (-0,07, 0,00). Setiap robot wajib menduduki posisi dan arah hadap sebagaimana dijelaskan pada Tabel I.

Tabel 1 Target posisi dan haluan setiap robot

Robot	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

Selain target posisi dan daluan, diatur pula parameter algoritma untuk mengevaluasi keberhasilan perbandingan kinerja. Inisiasi parameter itu dibutuhkan agar terdapat acuan yang sama untuk masukan setiap algoritma. Detail parameter itu dijelaskan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2 Parameter masukan algoritma

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Gain gaya tarik	k_{att}	2.0	—
Gain gaya tolak	k_{rep}	2.0	—
Gain fungsi bobot penghindaran	k_{avoid}	5.0	—
Radius penghindaran	R_{avoid}	1.8	m
Gain gaya darurat	$k_{emergenc}$	9.0	—
Radius aktivasi darurat	$R_{\text{EMERGY_}}$	0.55	m
Radius nonaktivasi darurat	$R_{\text{EMERGY_}}$	0.70	m
Kecepatan linear maksimum	$V_{\max}$	3.7	m/s
Gain heading	k_θ	3.0	—
Kecepatan sudut maksimum	$\omega_{\max}$	4.0	rad/s
Radius aktivasi heading	R_{heading}	0.80	m
Kecepatan sudut motor maksimum	$V_{\text{motor,max}}$	137	rad/s

Keseluruhan eksperimen ini dijalankan dengan prosedur sebagai berikut 1) inisialisasi posisi awal robot, 2) menjalankan simulasi untuk menguji penggunaan dengan metode yang diusulkan terhadap APF Standar, ORCA, CBF, *Leader-Follower*, *Virtual Structure*, dan *Behavior-Based*, 3) merekam data posisi, *heading*, dan 4) membandingkan hasil kinerja algoritma. Keempat prosedur operasi ini dijalankan dalam skenario robot dengan kecepatan kencang pada nilai kecepatan maksimum sebesar 3,7 m/s.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3 menguraikan hasil temuan terkait kinerja APF Standar dan algoritma yang diusulkan pada pekerjaan ini. Selama durasi melayang menuju target, peluruhan

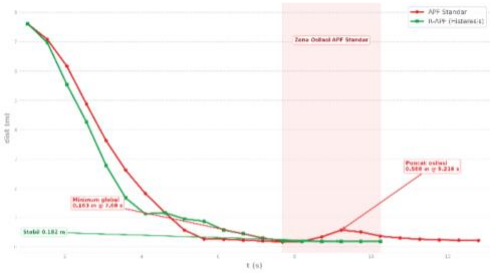
Journal of Science and Social Research ISSN 2615 – 4307 (Print)
Oct 2026, IX (5): 9549 – 9555 ISSN 2615 – 3262 (Online)
Available online at http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR

jarak robot ke target menunjukan pola osilatif dari kedua algoritma ini. Grafik pada gambar 2 memperlihatkan sejak t = 1.024 s sampai 12.8 s, dari awalnya sama di 7.61 m. Mekanisme APF + Histerisis (hijau) turun lebih cepat di awal, dibanding APF standar (merah).

Tabel 3 Perbedaan performa APF Standar dan APF + Histerisis

Metrik	APF Standar	APF + Histerisis	Perubahan
Waktu konvergensi (s)	3.1–5.9	3.36	Sedikit lebih cepat
Error posisi tunak (m)	0.217	0.182	Turun 16%
Jumlah tabrakan	2	0	Hilang
Jarak minimum terhadap target (m)	0.317	0.650	Aman
Frekuensi *chattering*	0	0	Sama

Secara grafis, kemampuan kedua ini mengatur robot agar mengejar target dijelaskan pada gambar 2. Pada zona merah (rentang 7.68 sampai 10.24 s), APF Standar mengalami lonjakan naik lagi setelah menyentuh 0.163 m, sampai 0.568 m. Disaat APF + Histerisis tetap terus bergerak mendatar menjaga diri pada jarak 0.182 m. Jika di rekapitulasi, dua pola osilasinya adalah untuk APF Standar terlihat: 0.163 → 0.182 → 0.336 → 0.568 → 0.505 → 0.362, dengan gerak naik-turun jelas, sebagai bukti osilasi. Sedangkan pada APF + Histerisis, pola monoton yang terlihat: 0.572 → 0.444 → 0.294 → 0.209 → 0.184 → 0.182 → 0.182 → 0.182, yang memperlihatkan nilai yang turun terus, tidak naik. Secara grafis, kedua pol aini dijelaskan pada gambar 3.



Gambar 2 Perbedaan jarak ke target APF Standar dan APF + Histerisis



Gambar 3 Bukti pola osilasi (APF Standar, garis merah) dan monoton (APF + Histerisis, garis hijau)

Data ini memperkuat dugaan bahwa tanpa histerisis, gaya tolak muncul dan hilang secara mendadak, sementara dengan histerisis, jarak turun monoton sesuai dengan harapan. Bisa dikatakan bahwa Ketika d_{ij} melewati R_{avoid} menyebabkan robot bolak-balik di sekitar ambang. Sementara APF + Histerisis dengan histerisis, gaya darurat tetap aktif hingga, sehingga robot tidak "ragu" untuk menjauh.

Pada step 128, APF standar mengalami tabrakan di tandai dengan jarak ke rintangan = 0.317 m. Sementara itu, APF + Histerisis membuat robot berada jauh dari rintangan dengan catatan jaraka **0.650 m** yang lebih dari titik ambang pada 0.35 m.

Tabrakan bisa tak terjadi pada APF + Histerisis karena robot tetap dalam mode darurat. Mode ini aktih hingga benar-benar jarak aman 0.70 m terpenuhi. Sehingga tabrakan terhindar, dibandingkan dengan tanpa histerisis yang membuat robot bisa keluar dari radius penghindaran saat belum benar-benar aman. Dari sini dapat diketahui bahwa dengan bermodalkan hanya perbandingan nilai, histerisis menambah satu state per robot , tetapi tidak menambah komputasi yang signifikan. Berkurangnya osilasi membuat waktu konvergensi menjadi sedikit lebih cepat.

SIMPULAN

Artikel ini mengusulkan mekanisme peralihan saat keadaan histerisis darurat terjadi pada APF. Mekanisme ini bisa mengurangi osilasi mode perilaku robot. Selain itu, membuat kemampuan untuk menghindari rintangan bekerja dengan sigap, saat tabrakan pada saat pembentukan formasi multi-robot omnidireksional berlangsung. Berdasarkan eksperimen di simulator, diperoleh simpulan bahwa algoritma ini mengurangi osilasi, ditandai dengan pergeseran monoton jarak robot ke target yang tidak bolak balik, pengurangan benturan antar robot, kesalahan posisi akhir bisa turun dan hilangnya kebuntuan gerak robot karena tarikan antar gaya APF. Pekerjaan ini baru saja diuji pada simulator dan memerlukan validasi pada robot fisik. Pada pekerjaan yang akan datang diperlukan pengujian pada rintangan dinamis dengan situasi histerisis yang kompleks. Pengujian pola formasi heksagon perlu diperkaya dengan pola lain.

DAFTAR PUSTAKA

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), 2387. https://doi.org/10.3390/s26082387

Cortés-Antonio, P., Melin, P., Valdez, F., & Castillo, O. (2025). On the omnidirectional maneuvers for differential drive robots. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (pp. 231–241). Springer.

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

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

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

Hwang, J., Lee, J., & Park, C. (2022). Collision avoidance control for formation flying of multiple spacecraft using artificial potential field. *Advances in Space Research, 69*(5), 2197–2209. https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.12.015

Meng, B., Chen, L., Gui, H., & Zhong, R. (2025). Scale-shift governor with analytical solutions for spacecraft formation collision avoidance. *Advances in Space Research, 75*(6), 5026–5036. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.075

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-

Taheri, H., & Zhao, C. X. (2020). Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches. *Mechanism and Machine Theory, 153*, 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 *Intelligent Autonomous Systems* (pp. 51–64). Springer. 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*, 106384. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106384

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