

# Pemodelan dan Simulasi *Path Planning* Robot Mobil Menggunakan Metode *Ant System* Pada Lingkungan Terstruktur

<sup>1</sup>Rama Saktriawindarta, <sup>2</sup>Suhendri, <sup>3</sup>Nurita Evitarina

<sup>1,2,3</sup>Universitas Pertiba, Indonesia

<sup>1</sup>[ramasaktriawindarta@gmail.com](mailto:ramasaktriawindarta@gmail.com); <sup>2</sup>[akh.suhendri@gmail.com](mailto:akh.suhendri@gmail.com); <sup>3</sup>[nuritaevitarina94@gmail.com](mailto:nuritaevitarina94@gmail.com);

## Article Info

### Article history:

Received, 2026-01-06

Revised, 2026-01-15

Accepted, 2026-01-20

### Kata Kunci:

*ant system*  
*path planning*  
robot mobil  
simulasi

### Keywords:

*ant system*  
*mobile robot*  
*path planning*  
*simulation*

## ABSTRAK

*Path planning* merupakan permasalahan *fundamental* dalam navigasi robot mobil yang menuntut kemampuan perencanaan jalur optimal serta penghindaran rintangan secara efisien. Penelitian ini mengimplementasikan metode *Ant System* untuk menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil melalui pendekatan pemodelan dan simulasi pada *environment* terstruktur. Proses perencanaan jalur dilakukan dengan memanfaatkan mekanisme *pheromone* dan *heuristic* untuk menentukan lintasan optimal dari *initial state* menuju *goal state*. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali simulasi dengan variasi jumlah koordinat antara, iterasi, dan jumlah semut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Ant System* mampu menghasilkan jalur robot tanpa tabrakan dengan jarak lintasan berada pada rentang 31,4915 hingga 32,6788 satuan jarak. Analisis hasil menunjukkan bahwa kesesuaian antara jumlah koordinat antara, iterasi, dan semut berpengaruh signifikan terhadap kualitas lintasan, di mana kombinasi parameter yang seimbang menghasilkan jalur yang lebih smooth dan stabil. Secara keseluruhan, metode yang diusulkan mencapai tingkat keberhasilan sebesar 100% dalam menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil pada *environment* yang digunakan.

## ABSTRACT

*Path planning* is a *fundamental* problem in mobile robot navigation that requires efficient route optimization while avoiding obstacles. This study implements the *Ant System* method to solve the mobile robot path planning problem using a modeling and simulation approach in a structured environment. The path planning process utilizes *pheromone* mechanisms and *heuristic* information to determine an optimal path from the initial state to the goal state. A total of ten simulation experiments were conducted with variations in the number of intermediate coordinates, iterations, and ants. The results show that the proposed method successfully generated collision-free paths in all experiments, with path lengths ranging from 31.4915 to 32.6788 units. The analysis indicates that the balance between the number of intermediate coordinates, iterations, and ants significantly affects path quality, where well-balanced parameters produce smoother and more stable trajectories. Overall, the *Ant System* method achieved a 100% success rate, demonstrating its effectiveness and reliability for mobile robot path planning in structured environments.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) license.



## Penulis Korespondensi:

Rama Saktriawindarta,  
Universita Pertiba Indonesia,  
Email: [ramasaktriawindarta@gmail.com](mailto:ramasaktriawindarta@gmail.com)

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telah menjadi pendorong utama dalam evolusi berbagai disiplin ilmu pengetahuan, yang muncul dari kebutuhan untuk menyelesaikan permasalahan kompleks yang sulit ditangani menggunakan pendekatan konvensional. Integrasi ide-ide inovatif dan teori fundamental ke dalam solusi praktis telah

menghasilkan nilai guna yang signifikan di berbagai bidang, seperti *medical*, *science*, dan *engineering*. Salah satu wujud perkembangan tersebut adalah pemanfaatan simulasi dan pemodelan komputasional berbasis kecerdasan buatan, yang memungkinkan peneliti merepresentasikan sistem nyata serta menganalisis respons terhadap berbagai skenario tanpa harus melakukan implementasi fisik yang memerlukan biaya dan waktu yang besar [1].

Dalam konteks robotika *modern*, *mobile* robot atau robot bergerak menjadi salah satu fokus penelitian yang berkembang pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan otomasi pada era Industri 4.0 dan 5.0. Robot mobil didefinisikan sebagai perangkat otonom yang mampu merespons masukan sensorik melalui sistem berbasis kecerdasan buatan tanpa intervensi manusia secara langsung, serta memiliki kemampuan beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang dinamis dan tidak terduga [2]. Penerapan robot mobil saat ini telah meluas, mencakup *automated guided vehicles* (AGV) pada *smart manufacturing*, sistem robot pengangkut pada *warehouse automation*, kendaraan otonom untuk transportasi, hingga robot eksplorasi untuk misi *aerospace* dan penyelamatan bencana [3], [4].

Salah satu permasalahan fundamental yang masih menjadi tantangan utama dalam robotika mobil adalah *path planning*, yaitu kemampuan robot untuk merencanakan dan mengeksekusi jalur optimal dari *initial state* menuju *goal state* dengan tetap menghindari tabrakan terhadap objek statis maupun dinamis di lingkungannya [5]. Permasalahan *path planning* termasuk dalam kategori optimasi kombinatorial yang kompleks, khususnya pada lingkungan berdimensi tinggi dan memiliki hambatan yang dapat berubah secara *real-time*. Secara matematis, permasalahan ini dapat dimodelkan menggunakan teori *graf* berbobot (*weighted graph*), namun kompleksitas perhitungannya meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya ukuran ruang pencarian [6]. Penelitian terkini menunjukkan bahwa kompleksitas perencanaan jalur semakin meningkat ketika robot dihadapkan pada lingkungan dinamis, di mana hambatan dapat berubah posisi dan konfigurasi secara kontinu. Berbeda dengan lingkungan statis yang memiliki konfigurasi tetap, lingkungan dinamis menuntut kemampuan *replanning* serta adaptasi secara *real-time* agar robot tetap dapat mencapai tujuan dengan aman dan efisien [7]. Studi oleh Zhang et al. (2023) mengonfirmasi bahwa robot mobil modern memerlukan sistem navigasi yang dapat menangani ketidakpastian lingkungan dengan tingkat akurasi tinggi dan latensi rendah [8].

Sistem navigasi robot mobil pada umumnya mengintegrasikan dua pendekatan utama, yaitu *global path planning* untuk menghasilkan jalur optimal berdasarkan peta lingkungan secara keseluruhan, dan *local path planning* untuk melakukan penghindaran hambatan secara *real-time* [9]. Namun, integrasi kedua pendekatan tersebut masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait konsistensi jalur, efisiensi komputasi, serta kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang cepat. Penelitian oleh Wang et al. (2024) menunjukkan bahwa algoritma hibrida yang menggabungkan kecerdasan *swarm* dengan pembelajaran mesin mampu memberikan kinerja yang lebih menjanjikan dibandingkan metode konvensional [10].

Selama dekade terakhir, berbagai pendekatan komputasi *evolusioner* dan *metaheuristik* telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan *path planning*, di antaranya *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Artificial Bee Colony* (ABC), serta berbagai variannya [11], [12]. Meskipun demikian, hasil penelitian terkini menunjukkan bahwa *Ant Colony Optimization* (ACO) dan variannya masih menjadi salah satu pendekatan yang paling efektif untuk perencanaan jalur robot mobil, terutama karena kemampuannya dalam menangani ruang pencarian yang bersifat diskrit dan kontinu secara simultan [13]. *Ant Colony Optimization* (ACO), yang pertama kali diperkenalkan oleh Dorigo pada tahun 1992, terinspirasi dari perilaku kolektif koloni semut dalam menemukan jalur terpendek antara sarang dan sumber makanan [14]. Mekanisme *stigmergi* yang diterapkan melalui proses deposisi dan penguapan *pheromone* memungkinkan terjadinya komunikasi tidak langsung antaragen, sehingga koloni dapat secara kolektif mengarah pada solusi yang optimal. Penelitian oleh Liu et al. (2023) menunjukkan bahwa pengembangan *Improved Ant Colony Optimization* (IACO) dengan mekanisme adaptif mampu meningkatkan kecepatan konvergensi hingga 40% dibandingkan ACO klasik [15].

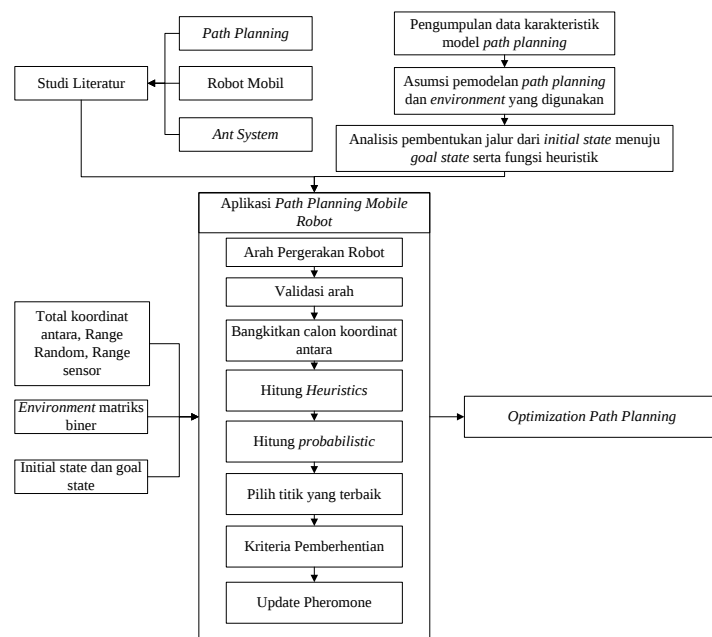
Seiring perkembangannya, *Ant System* sebagai bagian dari keluarga ACO telah mengalami berbagai modifikasi. *Max-Min Ant System* (MMAS) yang diusulkan oleh Stützle dan Hoos membatasi nilai *pheromone* untuk mencegah terjadinya stagnasi prematur [16]. Sementara itu, *Ant Colony System* (ACS) memperkenalkan mekanisme *local pheromone update* dan aturan *pseudo-random proportional rule* untuk meningkatkan eksploitasi solusi yang baik [17]. Penelitian terbaru oleh Kumar et al. (2024) juga menunjukkan bahwa hibridisasi ACO dengan *Deep Reinforcement Learning* mampu meningkatkan kemampuan adaptasi robot dalam lingkungan yang sangat dinamis [18]. Keunggulan utama *Ant Colony Optimization* dalam menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil terletak pada beberapa aspek penting. Pertama, sifat paralel dan terdistribusi memungkinkan eksplorasi berbagai bagian ruang solusi secara simultan, sehingga meningkatkan peluang diperolehnya solusi global optimal [19]. Kedua, mekanisme pembaruan *pheromone* yang adaptif memungkinkan algoritma menyeimbangkan proses eksplorasi dan eksploitasi secara dinamis.

Ketiga, fleksibilitas ACO dalam menangani berbagai fungsi objektif dan *constraint* menjadikannya sesuai untuk permasalahan optimasi multi-objektif [20]. Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa integrasi ACO dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *edge computing* membuka peluang baru bagi implementasi path planning secara *real-time* pada robot mobil [21]. Studi oleh Chen et al. (2024) berhasil mengimplementasikan ACO pada *platform embedded* dengan konsumsi daya rendah, sehingga robot dapat melakukan perencanaan jalur secara otonom tanpa ketergantungan pada komputasi berbasis *cloud* [22]. Selain itu, pemanfaatan konsep *Digital Twin* untuk simulasi dan validasi algoritma ACO sebelum implementasi fisik terbukti mampu mengurangi waktu pengembangan sistem hingga 60%[23].

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, implementasi ACO untuk *path planning* robot mobil masih menghadapi sejumlah tantangan, seperti penentuan parameter optimal ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ) yang sangat bergantung pada karakteristik permasalahan, waktu komputasi yang relatif tinggi pada lingkungan berskala besar, serta kebutuhan akan mekanisme replanning yang efisien pada lingkungan dinamis [24]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan menganalisis metode *Ant System* dalam menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil melalui pendekatan pemodelan dan simulasi. Dengan memanfaatkan prinsip *stigmergi* dan kecerdasan kolektif yang diadopsi dari koloni semut serta mengintegrasikan teknik optimasi terkini, diharapkan dapat diperoleh jalur optimal dari *initial state* menuju *goal state* dengan efisiensi komputasi yang baik serta kemampuan adaptasi terhadap kompleksitas lingkungan robot mobil di era industri modern.

## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan eksperimental berbasis pemodelan dan simulasi untuk mengevaluasi kinerja metode *Ant System* dalam menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil. Alur metodologi penelitian disusun secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar Metode Penelitian.



Gambar 1 Desain Penelitian yang Akan Dilakukan

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur, yang bertujuan untuk mengkaji konsep-konsep dasar terkait path planning, karakteristik robot mobil, serta prinsip kerja *Ant System*. Studi literatur ini menjadi landasan dalam menentukan pendekatan metode yang digunakan serta parameter-parameter penting dalam perancangan sistem. Selanjutnya dilakukan analisis objek penelitian, yang mencakup pemahaman karakteristik robot mobil dan sistem navigasinya. Pada tahap ini juga ditentukan asumsi pemodelan *path planning* dan *environment* yang digunakan. *Environment* direpresentasikan dalam bentuk matriks *biner*, di mana nilai tertentu merepresentasikan area yang dapat dilalui robot dan nilai lainnya merepresentasikan rintangan. Selain itu, dilakukan analisis pembentukan jalur dari *initial state* menuju *goal state* dengan mempertimbangkan pembacaan sensor sebagai fungsi *heuristik*.

Tahap berikutnya adalah aplikasi path planning menggunakan metode *Ant System* pada robot mobil. Proses ini dimulai dengan penentuan arah pergerakan robot berdasarkan posisi robot terhadap *goal state*. Arah pergerakan yang dihasilkan kemudian divalidasi menggunakan sensor robot untuk memastikan bahwa jalur yang dipilih tidak melanggar *constraint* lingkungan, seperti menabrak dinding atau rintangan. Setelah validasi arah dilakukan, sistem membangkitkan sejumlah koordinat antara secara acak berdasarkan parameter total koordinat antara, *range random*, dan jangkauan sensor yang telah ditentukan. Koordinat antara ini berfungsi sebagai titik bantu dalam membentuk lintasan dari titik awal menuju tujuan. Selanjutnya, setiap kemungkinan jalur dihitung nilai heuristiknya berdasarkan jarak dan kondisi lingkungan.

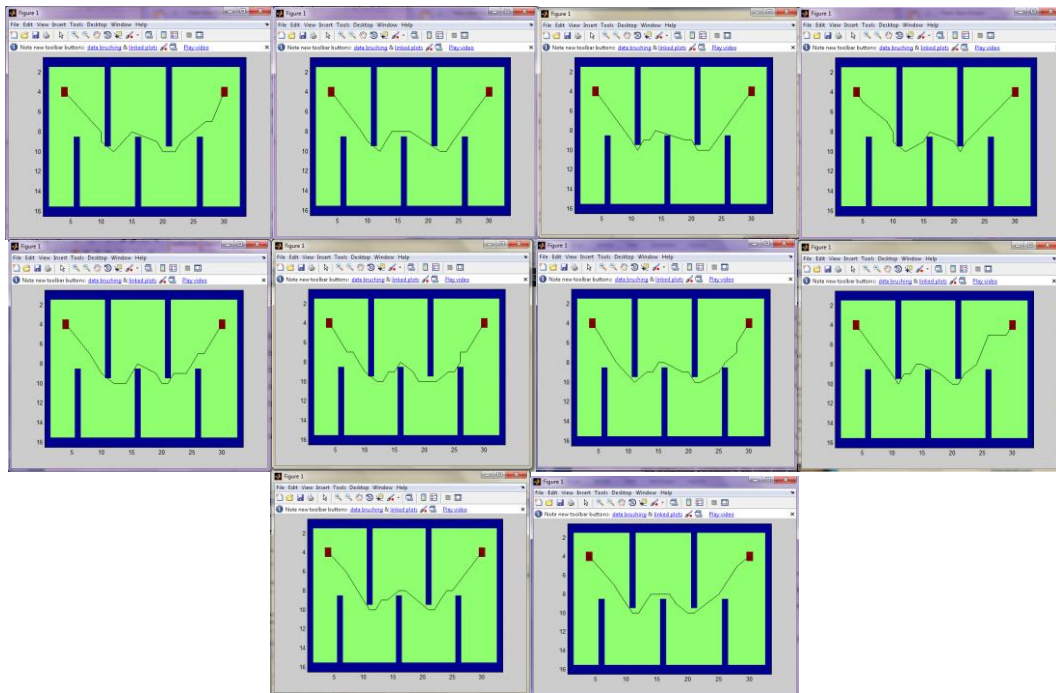
Berdasarkan nilai *heuristik* dan informasi *pheromone*, sistem menghitung probabilitas pemilihan jalur menggunakan aturan transisi *Ant System*. Dari hasil perhitungan tersebut, jalur dengan nilai probabilitas terbaik dipilih sebagai kandidat solusi. Proses ini dilakukan secara iteratif hingga memenuhi kriteria pemberhentian, yaitu tercapainya jumlah iterasi maksimum atau konvergensi solusi. Pada setiap iterasi, dilakukan pembaruan *pheromone* (*update pheromone*) untuk memperkuat jalur-jalur yang menghasilkan solusi terbaik dan melemahkan jalur yang kurang optimal. Mekanisme ini memungkinkan sistem untuk menyeimbangkan eksplorasi dan eksploitasi solusi secara adaptif.

Seluruh proses tersebut menghasilkan optimasi *path planning*, yaitu jalur robot mobil yang paling optimal berdasarkan kriteria jarak terpendek dan keamanan lintasan. Hasil optimasi kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh parameter *Ant System*, jumlah koordinat antara, serta iterasi terhadap kualitas jalur yang dihasilkan.

### 3. HASIL DAN ANALISIS

Penelitian ini mengimplementasikan metode *Ant System* untuk menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil melalui pendekatan pemodelan dan simulasi, sebagaimana alur metode yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Seluruh tahapan metode, mulai dari pembentukan *environment*, penentuan *initial state* dan *goal state*, pembangkitan koordinat antara, hingga pembaruan *pheromone*, diterapkan secara sistematis dalam perangkat lunak simulasi.

Pengujian path planning dilakukan sebanyak 10 kali simulasi dengan variasi jumlah koordinat antara, jumlah iterasi, dan jumlah semut. Berdasarkan hasil simulasi, seluruh pengujian berhasil menghasilkan jalur robot dari *initial state* menuju *goal state* tanpa mengalami tabrakan dengan dinding atau rintangan. Jalur yang dihasilkan pada setiap pengujian ditunjukkan melalui Gambar 2, dengan representasi lintasan berupa tabulist dan nilai total jarak tempuh.



Gambar 2 Hasil Pengujian

[illegible]

50

Tabel 2. Hasil Pengujian Path Planning

| Pengujian | Koordinat Antara | Iterasi | Semut | Jarak   |
|-----------|------------------|---------|-------|---------|
| 1         | 10               | 100     | 100   | 32,0819 |
| 2         | 10               | 200     | 100   | 31,4915 |
| 3         | 10               | 300     | 100   | 31,7857 |
| 4         | 10               | 400     | 100   | 31,4986 |
| 5         | 15               | 500     | 300   | 31,9547 |
| 6         | 20               | 600     | 300   | 32,6788 |
| 7         | 15               | 700     | 200   | 32,1302 |
| 8         | 15               | 800     | 200   | 32,1213 |
| 9         | 15               | 900     | 200   | 31,6164 |
| 10        | 15               | 1000    | 200   | 31,6722 |

Berdasarkan hasil pengujian, pengujian ke-1 hingga ke-4 yang menggunakan 10 koordinat antara menghasilkan lintasan yang cenderung berkelok-kelok dengan jarak yang relatif serupa, yaitu pada rentang 31,4915–32,0819. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah koordinat antara yang tidak seimbang dengan jumlah iterasi dan semut menyebabkan eksplorasi solusi belum berjalan secara optimal. Pola serupa juga terlihat pada pengujian ke-5 hingga ke-9. Sebaliknya, pada pengujian ke-10, kombinasi 15 koordinat antara, 1000 iterasi, dan 200 semut menghasilkan lintasan yang lebih smooth dan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa kesesuaian antara jumlah koordinat antara, iterasi, dan semut berpengaruh signifikan terhadap kualitas jalur yang dihasilkan. Selain itu, pada kondisi iterasi dan jumlah semut yang relatif kecil, penggunaan koordinat antara dalam jumlah minimum ( $\geq 6$  koordinat) cenderung menghasilkan jarak yang lebih optimal dibandingkan penggunaan koordinat antara yang berlebihan.

Berdasarkan 10 kali simulasi, seluruh pengujian berhasil menghasilkan jalur robot dari initial state menuju goal state tanpa mengalami tabrakan. Dengan demikian, tingkat keberhasilan metode *Ant System* dalam penelitian ini mencapai 100%, yang menunjukkan bahwa metode yang diusulkan efektif dan andal untuk menyelesaikan permasalahan path planning robot mobil pada environment terstruktur.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan dan simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode *Ant System* efektif dalam menyelesaikan permasalahan *path planning* robot mobil pada environment terstruktur. Seluruh pengujian berhasil menghasilkan lintasan dari *initial state* menuju *goal state* tanpa tabrakan, dengan kualitas jalur dipengaruhi oleh kesesuaian antara jumlah koordinat antara, iterasi, dan jumlah semut. Penggunaan parameter yang tidak seimbang cenderung menghasilkan lintasan berkelok-kelok, sedangkan kombinasi parameter yang tepat mampu menghasilkan jalur yang lebih smooth dan stabil. Dengan tingkat keberhasilan mencapai 100%, metode *Ant System* terbukti andal dan berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada sistem navigasi robot mobil, khususnya untuk skenario dengan kompleksitas lingkungan yang lebih tinggi.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini, serta para responden yang telah berpartisipasi.

#### REFERENSI

- [1] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th ed. Pearson, 2021.
- [2] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed. MIT Press, 2011.
- [3] G. Fragapane, D. Ivanov, M. Peron, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, "Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics," *Ann Oper Res*, vol. 308, pp. 125–143, 2022.
- [4] M. Xu, Z. Wang, Z. Qiao, Y. Wu, X. Feng, and W. Wang, "A comprehensive survey of unmanned ground vehicles on mapping and exploration," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 9, no. 1, pp. 3268–3284, 2024.
- [5] H. Sang, Y. You, X. Sun, Y. Zhou, and F. Liu, "The hybrid path planning algorithm based on improved A\* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations," *Ocean Engineering*, vol. 223, p. 108709, 2021.
- [6] S. M. LaValle, *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.
- [7] J. Zhang, H. Huang, and K. Li, "Dynamic path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm," *J Phys Conf Ser*, vol. 2450, no. 1, p. 12072, 2023.
- [8] Y. Zhang, G. Li, Y. Sun, and H. Zhang, "Intelligent path planning by an improved RRT algorithm for autonomous mobile robot," *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 3954, 2023.

- [9] S. Wang, Y. Zhang, and L. Zhou, "A hybrid global-local path planning method for mobile robots in dynamic environments," *Rob Auton Syst*, vol. 171, p. 104573, 2024.
- [10] H. Wang, W. Li, X. Hou, Q. Zhang, and Z. Tian, "A hybrid path planning method for unmanned ground vehicles based on improved PSO and DWA," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 15234–15248, 2024.
- [11] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal of Global Optimization*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, 2007.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942–1948.
- [13] X. Li, L. Guo, and Z. Zhang, "Adaptive ant colony optimization for path planning of mobile robots: A review," *Swarm Evol Comput*, vol. 78, p. 101285, 2023.
- [14] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colnori, "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, 1996.
- [15] Y. Liu, X. Wu, J. Guo, and S. Sun, "An improved ant colony optimization algorithm for robot path planning," *Soft comput*, vol. 27, no. 5, pp. 2829–2845, 2023.
- [16] T. Stützle and H. H. Hoos, "MAX-MIN ant system," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, no. 8, pp. 889–914, 2000.
- [17] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, 1997.
- [18] A. Kumar, D. Sharma, and R. Verma, "Hybrid ACO-deep reinforcement learning for dynamic path planning in autonomous mobile robots," *Expert Syst Appl*, vol. 238, p. 121847, 2024.
- [19] M. Dorigo and T. Stützle, "Ant colony optimization: Overview and recent advances," in *Handbook of Metaheuristics*, 3rd ed., Springer, 2019, pp. 311–351.
- [20] C. A. C. Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd ed. Springer, 2007.
- [21] N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Idries, and F. Mohammed, "Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 153, p. 119293, 2020.
- [22] Z. Chen, Y. Wu, and X. Liu, "Edge computing-based real-time path planning for mobile robots using improved ant colony optimization," *IEEE Internet Things J*, vol. 11, no. 3, pp. 4521–4533, 2024.
- [23] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital twin in industry: State-of-the-art," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019.
- [24] F. J. Ajeil, I. K. Ibraheem, A. T. Azar, and A. J. Humaidi, "Grid-based mobile robot path planning using aging-based ant colony optimization algorithm in static and dynamic environments," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1880, 2020.