

PERENCANAAN JALUR KOOPERATIF MULTI-UAV MENGUNAKAN METODE HIBRIDA CA* DAN ADOPSO

DINDA FARAHDILLA DHARMA



PROGRAM MAGISTER ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Perencanaan Jalur Kooperatif Multi-UAV Menggunakan Metode Hibrida CA* dan ADOPSO” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Dinda Farahdilla Dharma
G6501231036

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RINGKASAN

DINDA FARAHDILLA DHARMA. Perencanaan Jalur Kooperatif Multi-UAV Menggunakan Metode Hibrida CA* dan ADOPSO. Dibimbing oleh KARLISA PRIANDANA dan MEDRIA KUSUMA DEWI HARDHIENATA.

Perencanaan lintasan multi-UAV tidak hanya memerlukan lintasan yang bebas dari rintangan, tetapi juga koordinasi antar-UAV agar konflik selama pergerakan dapat dihindari. Cooperative A* (CA*) menangani kebutuhan tersebut melalui pencarian pada ruang-waktu dan mekanisme reservation table. Namun, lintasan CA* masih mengikuti pusat cell grid sehingga jarak tempuh dan perubahan arah masih dapat diperbaiki. ADOPSO memiliki kemampuan untuk mengoptimalkan lintasan, tetapi pada penerapan non-cooperative setiap UAV direncanakan secara independen sehingga keamanan antar-UAV belum menjadi bagian dari proses perencanaan. Penelitian ini mengintegrasikan CA* dan ADOPSO untuk meningkatkan kualitas lintasan multi-UAV dengan tetap mempertahankan keamanan terhadap rintangan dan konflik antar-UAV. CA* digunakan untuk membentuk lintasan awal berdasarkan posisi dan timestep, sedangkan ADOPSO mengoptimalkan posisi key-point di dalam cell asal tanpa mengubah urutan cell, timestep, dan aksi wait yang telah ditentukan oleh CA*.

Pengujian dilakukan melalui simulasi pada lingkungan dua dimensi berukuran $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ yang direpresentasikan dalam grid 40×40 dengan ukuran cell $0,10\text{ m}$. Crazyflie 2.0 digunakan sebagai acuan ukuran fisik UAV dengan radius aman $0,0969\text{ m}$. Kinerja CA*+ADOPSO dibandingkan dengan CA*, HCA*, WHCA*, dan CA*+PSO pada variasi kerapatan rintangan, jumlah UAV, posisi target, serta ukuran rintangan. ADOPSO non-cooperative juga diuji untuk melihat pengaruh mekanisme kooperatif terhadap keamanan lintasan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa CA*+ADOPSO menghasilkan lintasan yang lebih pendek dan total sudut belok yang lebih kecil dibandingkan CA*, HCA*, dan WHCA* pada keseluruhan variasi pengujian. Secara keseluruhan, panjang lintasan CA*+ADOPSO sebesar $4,3393 \pm 0,0459\text{ m}$, sedangkan CA* sebesar $4,6502 \pm 0,0537\text{ m}$ atau berkurang sekitar $6,69\%$. Total sudut belok CA*+ADOPSO sebesar $9,2180 \pm 0,5937\text{ rad}$, sedangkan CA* sebesar $14,1800 \pm 0,7961\text{ rad}$ atau berkurang sekitar $34,99\%$. Dibandingkan CA*+PSO, kedua metode menghasilkan panjang lintasan yang hampir sama, tetapi CA*+ADOPSO memiliki total sudut belok yang sedikit lebih kecil.

Perbandingan dengan ADOPSO non-cooperative memperlihatkan perbedaan antara efisiensi lintasan individual dan keamanan multi-UAV. ADOPSO menghasilkan lintasan individual yang lebih pendek dengan waktu komputasi yang lebih kecil, tetapi konflik antar-UAV ditemukan pada $75,91\%$ pengujian. Sebaliknya, konflik antar-UAV tidak ditemukan pada CA*+ADOPSO, meskipun panjang lintasan dan waktu komputasinya lebih besar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi CA* dan ADOPSO dapat memperbaiki panjang dan perubahan arah lintasan CA* sekaligus mempertahankan koordinasi antar-UAV selama pergerakan.

Kata kunci: *adopso, cooperative a*, crazyflie nano quadcopter, multi-uav, perencanaan jalur*



SUMMARY

DINDA FARAHDILLA DHARMA. Cooperative Multi-UAV Path Planning Using a Hybrid CA* and ADOPSO Method. Supervised by KARLISA PRIANDANA, and MEDRIA KUSUMA DEWI HARDHIENATA.

Multi-UAV path planning requires not only obstacle-free paths but also coordination among UAVs to prevent conflicts during simultaneous movement. Cooperative A* (CA*) addresses this requirement through space-time search and a reservation table mechanism. However, CA* paths still follow the centers of grid cells, leaving room for improvement in path length and directional changes. ADOPSO can optimize path geometry, but in its non-cooperative implementation, each UAV is planned independently without incorporating inter-UAV safety into the planning process. This study integrates CA* and ADOPSO to improve multi-UAV path quality while maintaining safety against obstacles and inter-UAV conflicts. CA* generates the initial paths based on position and timestep, while ADOPSO optimizes the positions of selected key-points within their original cells without changing the cell sequence, timestep, or wait actions determined by CA*.

The experiments were conducted through simulations in a two-dimensional environment of 4 m × 4 m represented by a 40 × 40 grid with a cell size of 0.10 m. The physical dimensions of the Crazyflie 2.0 were used as the UAV reference, with a safety radius of 0.0969 m. The performance of CA*+ADOPSO was compared with CA*, HCA*, WHCA*, and CA*+PSO under variations in obstacle density, number of UAVs, target position, and obstacle size. Non-cooperative ADOPSO was also evaluated to examine the effect of incorporating a cooperative mechanism on multi-UAV path safety.

The results show that CA*+ADOPSO produced shorter paths and smaller total turning angles than CA*, HCA*, and WHCA* across the overall test cases. The overall path length of CA*+ADOPSO was 4.3393 ± 0.0459 m, compared with 4.6502 ± 0.0537 m for CA*, corresponding to a reduction of approximately 6.69%. The total turning angle was 9.2180 ± 0.5937 rad for CA*+ADOPSO and 14.1800 ± 0.7961 rad for CA*, representing a reduction of approximately 34.99%. Compared with CA*+PSO, both methods produced nearly identical path lengths, while CA*+ADOPSO achieved a slightly smaller total turning angle.

The comparison with non-cooperative ADOPSO further illustrates the difference between individual path efficiency and multi-UAV safety. ADOPSO produced shorter individual paths with lower computational time, but inter-UAV conflicts occurred in 75.91% of the experiments. In contrast, no inter-UAV conflicts were observed for CA*+ADOPSO, although it required longer paths and greater computational time than non-cooperative ADOPSO. These results indicate that integrating CA* and ADOPSO can improve the path length and directional changes of CA* paths while preserving inter-UAV coordination during simultaneous movement.

Keywords: adopso, cooperative a*, crazyflie nano quadcopter, multi-uav, path planning



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

PERENCANAAN JALUR KOOPERATIF MULTI-UAV MENGUNAKAN METODE HIBRIDA CA* DAN ADOPSO

DINDA FARAHDILLA DHARMA

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk melakukan penelitian dan
penulisan tesis pada
Program Studi Ilmu Komputer

**PROGRAM MAGISTER ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Eng. Annisa, S.Kom., M.Kom.



IPB University
— Bogor Indonesia —

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



Judul Tesis : Perencanaan Jalur Kooperatif Multi-UAV menggunakan Metode Hibrida CA* dan ADOPSO
Nama : Dinda Farahdilla Dharma
NIM : G6501231036

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Karlisa Priandana, ST. M. Eng

Pembimbing 2:
Medria Kusuma Dewi Hardhienata, S. Komp., Ph.D.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si.
NIP 198211172014041001

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP 196607021993021001

Tanggal Ujian:
20 Juli 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhānahu wa Ta‘ālā atas limpahan rahmat, karunia, kemudahan, serta pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah ini dengan baik. Setiap proses, tantangan, dan pencapaian yang dilalui dalam penyusunan karya ilmiah ini tidak terlepas dari kehendak dan pertolongan Allah Subhānahu wa Ta‘ālā. Kepada-Nya penulis senantiasa memohon petunjuk, kekuatan, dan kemudahan dalam setiap langkah. Penelitian yang dilaksanakan sejak Agustus 2024 hingga Juli 2026 ini mengangkat topik mengenai perencanaan jalur dengan judul “Perencanaan Jalur Kooperatif Multi-UAV Menggunakan Metode Hibrida CA* dan ADOPSO”. Dalam proses pelaksanaan penelitian hingga penyelesaian karya ilmiah ini, penulis memperoleh banyak dukungan, arahan, bantuan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis dengan tulus menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Karlisa Priandana, S.T., M.Eng. dan Ibu Medria Kusuma Dewi Hardhienata, S.Komp., Ph.D. selaku komisi pembimbing yang dengan penuh perhatian telah memberikan waktu, arahan, bimbingan, diskusi, serta berbagai masukan berharga selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini hingga dapat diselesaikan dengan baik.
2. Bapak Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si. selaku Ketua Program Studi Magister Ilmu Komputer sekaligus penguji tesis yang telah memberikan kritik, saran, serta masukan yang konstruktif dalam penyempurnaan karya ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Aziz Kustiyo, S.Si., M.Kom. selaku Sekretaris Program Studi, serta seluruh staf administrasi Program Studi Magister Ilmu Komputer yang telah memberikan bantuan dan kemudahan dalam berbagai keperluan akademik selama masa studi.
3. Ibu Dr. Novita, M.Pd., sosok yang telah penulis anggap sebagai keluarga dan senantiasa memberikan perhatian, dukungan, nasihat, serta semangat kepada penulis selama menjalani pendidikan magister. Terima kasih atas segala kebaikan, kepedulian, dan dukungan yang diberikan dalam setiap proses yang penulis lalui hingga dapat menyelesaikan studi ini.
4. Keluarga tercinta penulis, khususnya Ibunda Sri Wahyuni, S.Kep., Ns., M.Kes. Adik Dimas Anggara Dharma, dan Adik feby musdalifa lubis yang senantiasa menjadi sumber kekuatan melalui kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moral dan material yang tidak pernah berhenti mengiringi setiap langkah penulis selama menempuh pendidikan hingga penyelesaian tesis ini.
5. First Riyatna Rahman yang senantiasa membersamai penulis dalam berbagai proses, memberikan perhatian, semangat, dukungan, serta menjadi tempat berbagi cerita dalam menghadapi setiap tantangan selama penyelesaian studi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Ibu Yatiah atas doa, perhatian, serta dukungan yang diberikan kepada penulis.
6. Sahabat seperjuangan penulis dan teman-teman Magister Ilmu Komputer angkatan 2023–2024 yang telah menjadi bagian dalam perjalanan studi penulis, baik sebagai teman berdiskusi, berbagi pengalaman, maupun saling memberikan semangat selama menjalani proses pendidikan magister.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



7. Seluruh pihak lainnya yang tidak dapat Penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan semangat, bantuan, dan dukungan berarti selama Penulis menempuh pendidikan magister ini.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Dinda Farahdilla Dharma

Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Crazyflie Nano Quadcopter</i> sebagai Model UAV	5
2.2 <i>Path Planning</i> dalam Sistem Multi-UAV	5
2.3 Metode ADOPSO	6
2.4 Metode <i>Cooperative</i>	9
III METODE	12
3.1 Tahapan Penelitian	12
3.2 Evaluasi Metode	21
3.3 Peralatan Penelitian	22
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Skenario 1: Pengaruh Kerapatan Rintangan	23
4.2 Skenario 2: Pengaruh Jumlah UAV	25
4.3 Skenario 3: Pengaruh Posisi Target	27
4.4 Skenario 4: Pengaruh Ukuran Rintangan	28
4.5 Analisis Perbandingan Kinerja Metode	31
V SIMPULAN DAN SARAN	34
5.1 Simpulan	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN	39
RIWAYAT HIDUP	45



DAFTAR TABEL

1	Penelitian terdahulu metode path planning	6
2	Parameter Pengujian	16
3	Parameter Optimasi pada ADOPSO, CA*+PSO dan CA*+ADOPSO	16
4	Parameter HCA* dan WHCA*	16
5	Pseudocode pada CA*+ADOPSO	20
6	Hasil pengujian pada variasi kerapatan rintangan	23
7	Hasil pengujian pada variasi jumlah UAV	26
8	Hasil pengujian pada variasi posisi target	27
9	Hasil pengujian pada variasi ukuran rintangan seragam	29
10	Hasil pengujian pada ukuran rintangan campuran	30
11	Perbandingan wakt komputasi seluruh skenario	32

DAFTAR GAMBAR

1	Representasi lingkungan perencanaan UAV dalam bentuk kontinu dan <i>grid</i>	2
2	<i>Crazyflie Nano Quadcopter 2.0</i> (Silano <i>et al.</i> 2018)	5
3	contoh pencarian lintasan menggunakan A* (Zhou <i>et al.</i> 2020)	7
4	Ilustrasi proses optimasi titik lintasan pada ADOPSO	8
5	Ilustrasi perencanaan jalur pada Metode <i>Cooperative</i>	9
6	Tahapan penelitian	12
7	Kondisi konflik antar-UAV	13
8	Ilustrasi <i>Obstacle</i>	14
9	Ilustrasi konversi posisi <i>grid</i> ke koordinat dunia	18
10	Pembentukan ruang pencarian lokal CA*+ADOPSO	19
11	Perwakilan peta pada variasi kerapatan rintangan: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, dan (d) 40%.	23
12	Perwakilan hasil CA*+ADOPSO pada variasi kerapatan rintangan: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, dan (d) 40%.	24
13	Perwakilan hasil CA*+ADOPSO pada variasi jumlah UAV: (a) 3 UAV, (b) 5 UAV, dan (c) 7 UAV.	25
14	Pengaruh jumlah UAV terhadap waktu komputasi	26
15	Perwakilan hasil CA*+ADOPSO pada variasi posisi target: (a) target kiri, (b) target tengah, dan (c) target kanan.	27
16	Perwakilan hasil CA*+ADOPSO pada ukuran rintangan seragam:	28
17	Perwakilan hasil CA*+ADOPSO pada ukuran rintangan campuran	30
18	Perbandingan panjang lintasan setiap metode	31
19	Perbandingan total sudut belok setiap metode	32



DAFTAR LAMPIRAN

1	Contoh perhitungan konversi terhadap <i>cell</i>	40
2	Keseluruhan Peta pada Tingkat Kerapatan	40
3	Hasil Gambar CA*+ADOPSO pada Tingkat Kerapatan (<i>running</i> ke 50)	42
4	Hasil Gambar CA*+ADOPSO pada jumlah UAV (<i>running</i> 50)	43
5	Hasil Gambar CA*+ADOPSO pada variasi posisi target (<i>running</i> 50)	44

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.