

IMPLEMENTASI DAN EVALUASI SISTEM VISI KOMPUTER BERBASIS HSV DENGAN DUKUNGAN HOUGH TRANSFORM PADA QUADCOPTER OTONOM UNTUK MISI LINE FOLLOWING: STUDI VALIDASI AWAL PADA LINGKUNGAN LUAR RUANG

Muhammad Hably Hukma¹, Budi Hartono^{1*}

¹ Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Aeronautika, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat
Email korespondensi: buhar@polban.ac.id

Abstrak. Navigasi autonomous quadcopter di lingkungan tanpa sinyal GPS, seperti inspeksi hanggar pesawat, memerlukan sistem visi komputer yang andal mendeteksi jalur panduan secara *real-time* meski kondisi pencahayaan berubah. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sistem visi komputer berbasis segmentasi warna HSV yang didukung *Hough Transform* sebagai metode cadangan untuk mendeteksi jalur garis putih lurus dan berbelok pada quadcopter otonom, sebagai studi validasi awal luar ruang. Sistem dibangun menggunakan Pixhawk 2.4.8, Raspberry Pi 5, dan kamera Logitech C270, dengan algoritma dua ROI dan pengendali PD, divalidasi melalui simulasi Gazebo SITL pengujian terbang pada tiga variasi ketinggian (1 m, 1,5 m, dan 2 m). Setiap variasi diuji sedikitnya 10 kali, dengan satu pengujian representatif digunakan sebagai data analisis. Hasil sesi terbaik tiap ketinggian menunjukkan quadcopter mampu menjalankan *autonomous takeoff*, *hover*, *line following*, dan *landing*, dengan tingkat deteksi garis 93,24% (1 m), 87,04% (1,5 m), dan 90,29% (2 m), serta yaw rate maksimum 24,13°/s saat tikungan. Proporsi metode deteksi bergeser signifikan terhadap ketinggian: HSV hanya 1,4% pada 1 meter namun meningkat menjadi 79,6% pada 2 meter, dengan *Hough Transform* mendominasi pada ketinggian rendah. Kombinasi kedua metode terbukti saling melengkapi dan meningkatkan keandalan deteksi jalur pada kondisi yang diuji.

Kata kunci: quadcopter, computer vision, HSV, Hough Transform, line following.

Abstract. Autonomous quadcopter navigation in GPS-denied environments, such as aircraft hangar inspection, requires a computer vision system that reliably detects guide paths in real time despite changing lighting. This study evaluates a computer vision system combining HSV color segmentation with Hough Transform as a backup method to detect straight and curved white-line paths, as a preliminary outdoor validation study. The system uses a Pixhawk 2.4.8, Raspberry Pi 5, and Logitech C270 camera, with a dual-ROI algorithm and a PD controller, validated through Gazebo SITL simulation and flight tests at three altitudes (1 m, 1.5 m, and 2 m). Each altitude was tested at least 10 times, with one representative test used for analysis. The best session at each altitude showed the quadcopter completing autonomous takeoff, hover, line following, and landing, with detection rates of 93.24% (1 m), 87.04% (1.5 m), and 90.29% (2 m), and a maximum yaw rate of 24.13°/s during turns. The proportion of detection methods shifted significantly with altitude: HSV accounted for only 1.4% at 1 m but rose to 79.6% at 2 m, with Hough dominating at lower altitudes. The combination proved complementary, improving path detection reliability under the tested conditions.

Keywords: Quadcopter, Computer Vision, HSV, Hough Transform, Line Following.

*Penulis Korespondensi

Diterima : 21 Juli 2026 Disetujui : 09 Agustus 2026 Dipublikasikan : 30 September 2026

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), khususnya quadcopter, telah meluas ke berbagai sektor industri, termasuk

pemetaan wilayah dan operasi pencarian-penyelamatan. Berdasarkan data *Knowledge Sourcing Intelligence*, pasar drone di Indonesia diproyeksikan tumbuh dengan *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) sebesar 6,30% hingga mencapai US\$12,83 juta pada 2030, meningkat dari

US\$9,45 juta pada 2025 (Intelligence, 2025). Pertumbuhan ini turut mendorong perluasan aplikasi drone ke ranah *Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO) penerbangan, termasuk inspeksi struktur komposit pesawat yang selama ini masih banyak mengandalkan metode manual, suatu pendekatan yang memakan waktu, rentan kesalahan manusia, dan sulit mendeteksi cacat internal seperti delaminasi (Liao et al., 2024).

Perkembangan teknologi *computer vision* turut berperan penting dalam meningkatkan kemampuan navigasi otonom UAV. Dengan memanfaatkan kamera sebagai sensor utama, sistem *computer vision* memungkinkan UAV mengenali objek, mendeteksi jalur, melakukan lokalisasi, serta mengambil keputusan secara *real-time* tanpa bergantung sepenuhnya pada sensor navigasi konvensional. Dibandingkan sensor aktif seperti LiDAR atau radar, kamera memiliki keunggulan berupa biaya yang lebih rendah, bobot ringan, serta kemudahan integrasi dengan *embedded system*, sehingga banyak diterapkan pada berbagai aplikasi UAV berbasis visi seperti *visual navigation*, *object tracking*, *inspection*, dan *line following* (Arafat et al., 2023).

Salah satu kendala utama penerapan drone pada misi inspeksi di dalam hanggar tertutup adalah ketergantungan pada sistem navigasi berbasis *Global Positioning System* (GPS) satelit, yang sinyalnya minim atau tidak tersedia di ruang tertutup (Chang et al., 2023). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa navigasi berbasis visi komputer merupakan salah satu solusi yang menjanjikan untuk menggantikan ketergantungan terhadap GPS dengan memanfaatkan kamera sebagai sensor utama untuk melakukan lokalisasi dan pengenalan lintasan secara *real-time* (Lu et al., 2022). Sistem navigasi *line following* berbasis visi komputer menjadi solusi alternatif, memungkinkan drone mendeteksi dan mengikuti jalur panduan secara otonom tanpa bergantung pada

sinyal satelit (Belmonte et al., 2019). Quadcopter dipilih sebagai platform penelitian karena kemampuan manuvernya yang lincah dan kestabilan terbangnya pada ruang terbatas (Peksa & Mamchur, 2024).

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem navigasi otonom berbasis *computer vision* pada quadcopter untuk mendukung berbagai misi, seperti *line following*. Salah satu metode navigasi visual yang banyak dikembangkan adalah visual *line following*, yaitu teknik yang memungkinkan UAV mendeteksi dan mengikuti lintasan berdasarkan citra yang diperoleh kamera. Soh dan Ho mengembangkan sistem navigasi *Micro Aerial Vehicle* (MAV) berbasis kamera tunggal menggunakan kombinasi segmentasi warna HSV (*Hue, Saturation, Value*) dan *Hough Line Transform* untuk mengikuti jalur pada lingkungan gudang. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode mampu mendukung navigasi otonom pada simulasi Gazebo, namun validasi masih terbatas pada lingkungan simulasi dan belum dievaluasi melalui pengujian terbang nyata (Soh & Ho, 2023). Penelitian *line following* pada quadcopter juga telah dilakukan oleh Besari menggunakan *Hough Line Transform* sebagai metode utama deteksi garis pada navigasi *indoor*, dengan rata-rata simpangan posisi sebesar 7,28 cm (Besari, 2024). Penelitian lain oleh Rasyid telah mengimplementasikan sistem *line following* berbasis segmentasi HSV (*Hue, Saturation, Value*) pada quadcopter menggunakan Raspberry Pi 4 (Miftah Rasyid, 2025). Namun, sistem tersebut dirancang hanya untuk lintasan lurus dan belum mampu menangani jalur dengan sudut belokan. Meskipun demikian, penelitian Besari masih berfokus pada deteksi garis menggunakan *Hough Transform*, sedangkan penelitian Rasyid hanya menerapkan segmentasi HSV pada lintasan garis lurus sehingga belum mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan deteksi ketika menghadapi perubahan arah lintasan

maupun kondisi segmentasi yang kurang optimal.

Kesenjangan (*gap*) inilah yang mendasari penelitian ini: mengembangkan sistem visi komputer yang tidak hanya mengandalkan segmentasi warna HSV, tetapi juga dilengkapi metode *Hough Transform* sebagai mekanisme cadangan ketika deteksi berbasis warna gagal akibat gangguan pencahayaan atau *noise* visual, sekaligus menambahkan kemampuan navigasi pada jalur berbelok melalui pendekatan dua *Region of Interest* (ROI) dan kendali *yaw* adaptif.

2. Metodologi

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan di lapangan belakang Hanggar Teknik Aeronautika, Politeknik Negeri Bandung, pada sore hari antara pukul 16.00 hingga 17.00 WIB.

Pengujian terbang nyata dilakukan di lapangan terbuka, bukan di dalam hanggar, sebagai pertimbangan keselamatan pada tahap validasi awal sistem. Sinyal GPS pada lokasi pengujian tetap tersedia namun tidak digunakan sebagai referensi navigasi utama; GPS hanya berfungsi sebagai data pembandingan (*ground truth*) untuk mengevaluasi akurasi *trajectory* hasil visi komputer, bukan sebagai input kendali sistem *line following*.

2.2 Gambaran Umum Quadcopter

Platform yang digunakan pada penelitian ini adalah quadcopter berbasis *frame* DJI F450 dengan konfigurasi quad-X, menggunakan *flight controller* Pixhawk 2.4.8 yang menjalankan *firmware* ArduCopter, dengan spesifikasi motor *brushless* Sunnysky X2216 1400KV, *Electronic Speed Controller* (ESC) Diatone Mamba 40A 4-in-1, modul GPS M7N, baterai LiPo 4S 5000 mAh, TF mini LiDAR untuk sensor ketinggian, dan kamera *webcam* Logitech C270 sebagai sensor visual utama yang dipasang pada

bagian bawah (*downward-looking*) quadcopter dengan orientasi tegak lurus terhadap permukaan tanah, serta Raspberry Pi 5 sebagai *companion computer* untuk pemrosesan visi komputer. Sebelum digunakan pada pengujian *line following*, platform ini telah melalui tahap pengembangan awal meliputi perakitan, kalibrasi (*accelerometer*, *compass*, radio, dan ESC), *PID tuning*, dan uji terbang manual, sehingga pada saat penelitian ini dilaksanakan platform dinyatakan stabil secara aerodinamis dan siap digunakan khusus untuk validasi sistem visi komputer. Komunikasi antara Raspberry Pi dan *flight controller* dilakukan melalui protokol MAVLink dengan menghubungkan keduanya menggunakan kabel dari *flight controller* ke GPIO Raspberry Pi, memungkinkan *companion computer* mengirimkan perintah kecepatan dan arah secara *real-time* berdasarkan hasil deteksi visi komputer. Konfigurasi fisik dari platform quadcopter yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Sedangkan, pada Tabel 1 menunjukkan konfigurasi yang digunakan pada quadcopter.



Gambar 1 Konfigurasi perangkat keras quadcopter

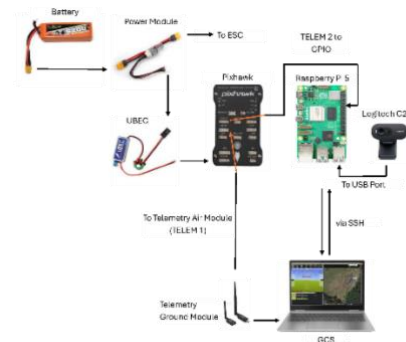
Tabel 1 Konfigurasi Platform Quadcopter

Parameter	Konfigurasi
<i>Frame</i>	DJI F450
<i>Flight controller</i>	Pixhawk 2.4.8
<i>Firmware</i>	ArduCopter 4.6.0
Massa total	2,3 kg
<i>Payload</i>	Raspberry Pi 5 + Logitech C270
<i>Propeller</i>	80 x 4.5 inci
Kamera	Logitech C270
Posisi kamera	<i>Downward- looking</i>
Komunikasi	MAVLink
<i>Baud rate</i>	115200 bps
<i>Setpoint</i>	$v_x, v_y, yaw\ rate$
MAVLink	
Frekuensi pengiriman	10 Hz
<i>Failsafe</i>	<i>Battery Failsafe</i> LAND, RC <i>Failsafe Enabled</i>

2.3 Arsitektur sistem

Sistem navigasi yang dikembangkan terdiri atas tiga bagian utama, yaitu sistem akuisisi citra, sistem pengolahan citra, dan sistem kendali penerbangan. Akuisisi citra dilakukan menggunakan kamera Logitech C270 yang dipasang pada bagian bawah quadcopter untuk memperoleh citra lintasan secara *real-time*. Citra kemudian diproses oleh Raspberry Pi 5 menggunakan perangkat lunak berbasis Python 3.11 dan pustaka OpenCV 4.12 untuk mendeteksi jalur garis putih. Hasil pengolahan citra berupa nilai deviasi posisi garis terhadap pusat citra digunakan sebagai masukan sistem kendali untuk menghasilkan perintah kecepatan maju dan koreksi *yaw*. Selanjutnya, perintah kendali dikirimkan ke *flight controller* Pixhawk 2.4.8 melalui protokol MAVLink sehingga quadcopter mampu mengikuti lintasan secara *autonomous*. Skematik integrasi perangkat keras sistem pengolahan citra dan

quadcopter secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Arsitektur sistem pengolahan citra

2.4 Metode Deteksi

2.4.1. Segmentasi HSV

Deteksi jalur dilakukan menggunakan metode segmentasi warna HSV sebagai algoritma utama. Setiap citra yang diperoleh kamera terlebih dahulu dikonversi dari ruang warna RGB ke HSV agar proses segmentasi warna putih menjadi lebih stabil terhadap perubahan intensitas cahaya (Kadhim & Abbas, 2023). Selanjutnya dilakukan proses *thresholding* berdasarkan rentang nilai HSV yang telah ditentukan untuk menghasilkan citra biner (Kusnandar et al., 2024). Citra biner kemudian diproses menggunakan operasi morfologi untuk mengurangi *noise* sehingga objek garis dapat dipisahkan dari latar belakang (Sihombing et al., 2018). Objek hasil segmentasi selanjutnya dianalisis menggunakan *contour* detection (Hossen et al., 2022), untuk memperoleh posisi pusat garis (*centroid*) yang digunakan dalam perhitungan deviasi arah quadcopter (Islam & Horio, 2023).

2.4.2. Hough Transform

Apabila proses segmentasi HSV tidak menghasilkan *contour* yang memenuhi kriteria, sistem secara otomatis

mengaktifkan *Hough Line Transform* sebagai metode pendukung atau *fallback*. Pada tahap ini citra dikonversi menjadi *grayscale*, kemudian dilakukan proses *Gaussian Blur* untuk mengurangi *noise* dan *Canny Edge Detection* untuk memperoleh tepi objek (Duda & Hart, 1972). Hasil deteksi tepi diproses menggunakan *Hough Line Transform* untuk mengestimasi kembali posisi garis sehingga sistem tetap memperoleh referensi arah ketika segmentasi HSV gagal mendeteksi jalur secara valid.

2.5 Konfigurasi Pipeline Visi Komputer Real-Time

Sistem visi komputer dijalankan secara *real-time* pada Raspberry Pi 5 menggunakan kamera Logitech C270 sebagai sensor visual. Pipeline pemrosesan citra terdiri atas proses akuisisi citra, konversi ruang warna, deteksi garis menggunakan segmentasi HSV sebagai metode utama, aktivasi *Hough Transform* sebagai metode *fallback*, perhitungan error lateral, serta pengiriman perintah kendali menuju *flight controller* Pixhawk 2.4.8 melalui komunikasi MAVLink. Konfigurasi *pipeline* yang digunakan selama pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Konfigurasi Pipeline

Parameter	Konfigurasi
Kamera	Logitech C270
Resolusi	640 x 480 piksel
Format citra	BGR, dikonversi ke HSV
FPS kamera	30 FPS
Exposure	Default kamera
White balance	Default kamera
Focus	Fixed focus
Pencahayaannya	Cahaya alami (outdoor)
Waktu komputasi algoritma	0,99–12,49 ms/frame

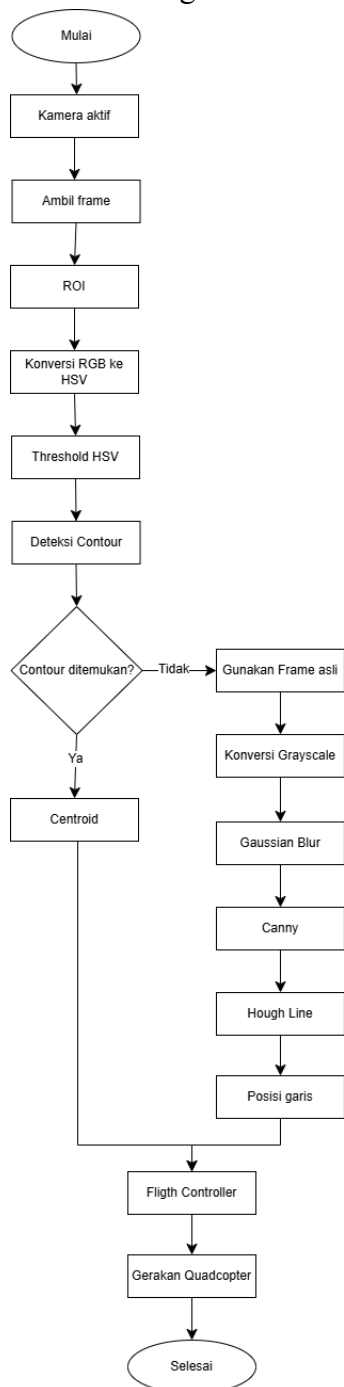
Latensi <i>end-to-end</i>	Tidak diukur
Sinkronasi <i>timestamp</i>	Tidak diukur

2.6 Cara Kerja Sistem Visi Komputer

Sistem visi komputer dirancang melalui beberapa tahap berurutan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pertama, citra dari kamera dibagi menjadi dua *Region of Interest* (ROI): ROI atas untuk memprediksi arah garis ke depan, dan ROI bawah untuk menentukan posisi garis saat ini. Citra pada tiap ROI dikonversi ke ruang warna HSV, kemudian dilakukan proses *masking* untuk mengekstraksi objek garis putih dari latar belakang. Objek yang tersegmentasi selanjutnya diperiksa menggunakan metode kontur; apabila kontur memenuhi kriteria luas area minimum dan *aspect ratio* yang ditentukan, sistem menghitung titik pusat garis (*centroid*) sebagai dasar koreksi arah quadcopter berdasarkan posisi *centroid* terhadap sumbu vertikal citra.

Apabila deteksi berbasis kontur HSV gagal misalnya akibat gangguan *noise* visual atau perubahan intensitas cahaya sistem secara otomatis beralih ke metode cadangan berbasis *Hough Line Transform*. Pada mekanisme ini, *frame* asli dikonversi menjadi citra *grayscale*, dihaluskan dengan *Gaussian Blur* untuk mengurangi *noise*, kemudian diproses dengan *Canny Edge Detection* untuk melacak tepi garis. Hasil deteksi tepi tersebut diekstraksi menggunakan *Hough Line Transform* untuk mengestimasi ulang posisi dan sudut garis lintasan. Apabila garis tetap tidak terdeteksi dalam durasi tertentu, quadcopter melakukan *hover* dan, jika kondisi berlangsung melebihi batas waktu yang ditentukan, sistem menjalankan pendaratan otonom sebagai mekanisme keselamatan.

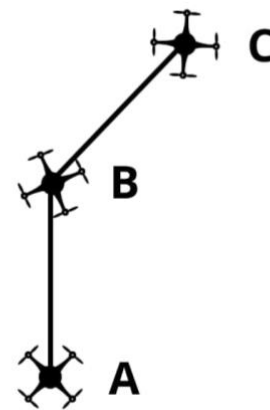
Sebagai pengendali gerak, digunakan *PD Controller* untuk koreksi posisi lateral berdasarkan *error* antara titik pusat garis hasil deteksi dan titik tengah citra (resolusi 640×480 piksel, titik tengah pada koordinat horizontal 320 piksel), serta kendali *yaw* adaptif yang aktif ketika sistem mendeteksi perubahan bentuk garis pada ROI atas sebagai indikasi tikungan.



Gambar 3 Flowchart algoritma *line following*

2.7 Misi Terbang *Line Following*

Dalam pelaksanaan misi, quadcopter diprogram untuk melakukan *take-off* dan *hovering* pada ketinggian tertentu. Setelah mencapai ketinggian yang ditentukan, quadcopter akan melakukan *hovering* sembari mengaktifkan modul kamera untuk memindai area bawah. Jika sistem berhasil mendeteksi objek berupa garis putih, quadcopter akan beralih ke mode navigasi otonom untuk menelusuri jalur garis tersebut. Quadcopter diharapkan mampu bergerak mengikuti garis tersebut dengan mempertahankan kecepatan dan ketinggian yang telah ditentukan sebelumnya. Gambar 4 di bawah ini menunjukkan ilustrasi jalur dari misi terbang *line following*. Quadcopter akan mengikuti garis putih yang merentang dari titik A ke titik B sejauh 4 meter, kemudian lanjut mengikuti garis putih yang merentang dari titik B ke titik C sejauh 4 meter.



Gambar 4 Ilustrasi jalur misi terbang *line following*

2.8 Prosedur Validasi

Prosedur validasi dilakukan bertahap: (1) validasi algoritma pada simulasi Gazebo SITL yang terhubung dengan ArduPilot SITL, menggunakan kamera eksternal yang digerakkan manual mengikuti lintasan cetak untuk mensimulasikan pergerakan quadcopter tanpa dipengaruhi dinamika terbang aktual; (2) kalibrasi rentang warna HSV menggunakan program *trackbar* interaktif pada laptop, dilakukan pada tiga ketinggian berbeda (1 m, 1,5 m, dan 2 m) sesuai rencana pengujian; (3) uji terbang

nyata *autonomous line following* pada objek garis berdimensi 25 cm × 800 cm berwarna putih *doff* (untuk meminimalkan pantulan cahaya), pada tiga variasi ketinggian tersebut.

2.9 Parameter Evaluasi

Pada penelitian ini yang dianalisis meliputi: tingkat deteksi garis (*detection rate*), dihitung dari rasio jumlah *frame* berhasil mendeteksi garis terhadap total *frame*), rata-rata deviasi *error* posisi garis terhadap titik tengah citra (dalam piksel, dikonversi ke satuan sentimeter menggunakan faktor konversi berdasarkan *horizontal field of view* kamera 60° pada resolusi 640×480), kecepatan lateral (*vy*), kecepatan maju (*vx*), *yaw rate* dan orientasi (ATT.Yaw), serta proporsi penggunaan metode deteksi (HSV berbanding *Hough Transform*) pada tiap ketinggian pengujian. Adapun keberhasilan misi ditentukan berdasarkan nilai *detection rate*, di mana metode dinyatakan berhasil apabila memiliki *detection rate* $\geq 80\%$, sedangkan nilai di bawah ambang tersebut dikategorikan tidak berhasil karena kontinuitas deteksi dianggap belum memadai untuk mendukung navigasi *line following* secara konsisten. Pengujian dilakukan pada tiga variasi ketinggian, yaitu 1 m, 1,5 m, dan 2 m. Untuk setiap variasi ketinggian dilakukan pengujian berulang sedikitnya 10 kali guna memastikan sistem dapat menjalankan misi *line following* secara konsisten. Seluruh pengujian diamati untuk mengevaluasi keberhasilan misi. Dari seluruh sesi pengujian yang dilakukan, penelitian ini menyajikan hasil analisis berdasarkan satu sesi penerbangan representatif pada masing-masing variasi ketinggian yang berhasil menyelesaikan misi secara utuh serta memiliki data *log* lengkap sehingga seluruh parameter evaluasi dapat dianalisis secara konsisten.

2.10 Batasan Penelitian

Penelitian ini merupakan tahap validasi awal untuk mengevaluasi

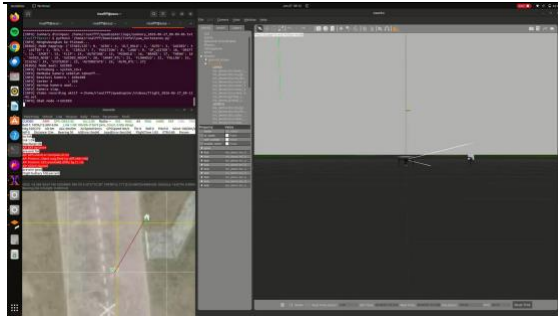
kemampuan algoritma visi komputer dalam melaksanakan misi *line following* secara *autonomous* pada lingkungan luar ruang. Pengujian di lapangan terbuka dipilih sebagai tahap awal pengembangan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan penerbangan dan kemudahan evaluasi sistem. Oleh karena itu, hasil penelitian ini belum dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi operasional inspeksi hanggar pesawat yang memiliki karakteristik pencahayaan dan ruang gerak yang berbeda. Validasi pada lingkungan indoor yang menyerupai kondisi hanggar menjadi bagian dari pengembangan penelitian selanjutnya. Selain itu, meskipun setiap variasi ketinggian telah diuji berulang sedikitnya 10 kali, penelitian ini hanya menyajikan satu sesi penerbangan yang paling representatif sebagai data analisis. Oleh karena itu, analisis statistik terhadap seluruh hasil pengujian belum dilakukan dan menjadi peluang penelitian selanjutnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

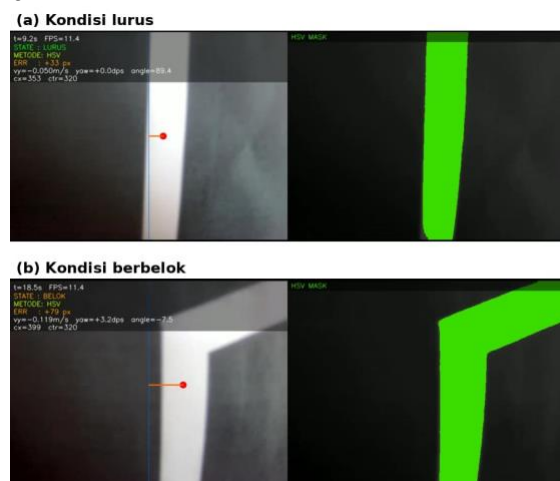
3.1.1. Validasi Simulasi Gazebo SITL

Pada simulasi ini digunakan model quadcopter yang terhubung dengan Ardupilot SITL dan Gazebo sebagai lingkungan virtual seperti yang di tampilan pada Gambar 5 dan menggunakan kamera eksternal yang terhubung dengan sistem pemrosesan yang berfungsi sebagai sensor utama untuk memperoleh citra yang kemudian diproses secara *real time*. Tahapan simulasi diawali dengan proses takeoff hingga mencapai ketinggian yang ditentukan. Setelah posisi quadcopter stabil, sistem mulai melakukan deteksi garis pada lintasan.



Gambar 5 Lingkungan simulasi menggunakan Gazebo SITL

Berdasarkan hasil simulasi, algoritma segmentasi HSV mampu mendeteksi garis putih secara kontinu baik pada lintasan lurus maupun saat memasuki tikungan. Posisi *centroid* berhasil diperoleh pada setiap *frame* yang memenuhi kriteria segmentasi sehingga sistem mampu menghasilkan nilai *error* terhadap titik tengah citra sebagai masukan pengendali. Tampilan hasil deteksi garis pada kedua kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Tampilan kamera dan *mask* HSV pada kondisi (a) lintasan lurus dan (b) lintasan berbelok

Validasi awal pada simulasi Gazebo SITL menunjukkan algoritma segmentasi HSV mampu mendeteksi garis putih secara kontinu pada lintasan lurus maupun tikungan, dengan tingkat deteksi 99,68% dari 313 *frame* pengamatan dan rata-rata deviasi *error* 63,32 piksel. Hasil ini mengonfirmasi bahwa algoritma layak dilanjutkan ke tahap uji terbang nyata pada tiga variasi ketinggian: 1 m, 1,5 m, dan 2 m.

3.1.2. Tingkat Deteksi dan Deviasi *Error* Pada Tiga Ketinggian

Rekapitulasi hasil uji terbang *autonomous line following* pada ketiga ketinggian disajikan pada Tabel 3. Data menunjukkan bahwa tingkat deteksi garis tidak berubah secara monoton terhadap ketinggian: nilai tertinggi diperoleh pada ketinggian 1 m (93,24%), diikuti 2 m (90,29%), dan terendah pada 1,5 m (87,04%). Sebaliknya, rata-rata deviasi *error* dalam satuan piksel maupun sentimeter meningkat secara konsisten seiring bertambahnya ketinggian (28,90 piksel/5,21 cm pada 1 m; 62,86 piksel/17,03 cm pada 1,5 m; 80,14 piksel/28,93 cm pada 2 m), sejalan dengan melebarnya bidang pandang kamera pada ketinggian yang lebih tinggi sehingga setiap piksel merepresentasikan area permukaan yang lebih besar.

Pada penelitian ini, deviasi *error* didefinisikan sebagai selisih posisi garis panduan terhadap titik tengah citra kamera yang merepresentasikan posisi tepat di bawah badan quadcopter. Kamera pada quadcopter menghadap ke bawah dan merekam citra garis panduan di permukaan tanah. Sistem menghitung seberapa jauh posisi garis tersebut bergeser dari titik tengah citra kamera yang merepresentasikan posisi tepat di bawah badan quadcopter. Apabila garis terlihat tepat di tengah citra, berarti quadcopter sedang terbang tepat di atas garis; semakin jauh garis bergeser dari tengah citra misalnya ke kiri atau ke kanan, semakin jauh pula posisi quadcopter bergeser menyamping dari garis panduan. Nilai inilah yang disebut deviasi *error*, yang kemudian dikonversi dari satuan piksel menjadi sentimeter agar dapat dibandingkan dengan lebar garis panduan yang digunakan.

Merujuk pada Tabel 3, rata-rata deviasi *error* pada ketinggian 1 m dan 1,5 m (5,21 cm dan 17,03 cm) masih jauh lebih kecil dibandingkan lebar garis panduan (25 cm), yang menunjukkan bahwa quadcopter secara konsisten berhasil terbang tepat di

atas atau sangat dekat dengan garis sepanjang misi. Pada ketinggian 2 m, rata-rata deviasi error meningkat menjadi 28,93 cm yang artinya mendekati atau sedikit melampaui lebar garis, namun tingkat deteksi tetap tinggi (90,29%) karena bidang pandang kamera yang lebih luas pada ketinggian tersebut tetap mampu menangkap garis meskipun posisi quadcopter tidak selalu tepat berada di tengah-tengah garis.

Jumlah frame yang diperoleh pada setiap variasi ketinggian menunjukkan perbedaan, yaitu 222 frame pada ketinggian 1 m, 270 frame pada 1,5 m, dan 103 frame pada 2 m. Perbedaan tersebut sejalan dengan durasi rekaman video yang digunakan sebagai data analisis, yaitu masing-masing 22 detik, 29 detik, dan 11 detik. Berdasarkan jumlah frame dan durasi rekaman, FPS efektif selama proses pengolahan berada pada kisaran 9–10 FPS,

yang menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan pemrosesan citra secara real-time selama misi line following. Penelitian ini tidak melakukan pencatatan *dropped frames* secara khusus sehingga parameter tersebut tidak dapat dianalisis secara kuantitatif. Selain itu, pengujian pada ketinggian 2 m menggunakan Raspberry Pi 4 sebagai pengganti Raspberry Pi 5 akibat kendala *overvoltage* pada perangkat utama. Meskipun demikian, algoritma deteksi, konfigurasi kamera, parameter pengujian, dan flight controller tetap dipertahankan sehingga perbedaan jumlah frame tidak dapat secara langsung dikaitkan dengan perubahan platform komputasi.

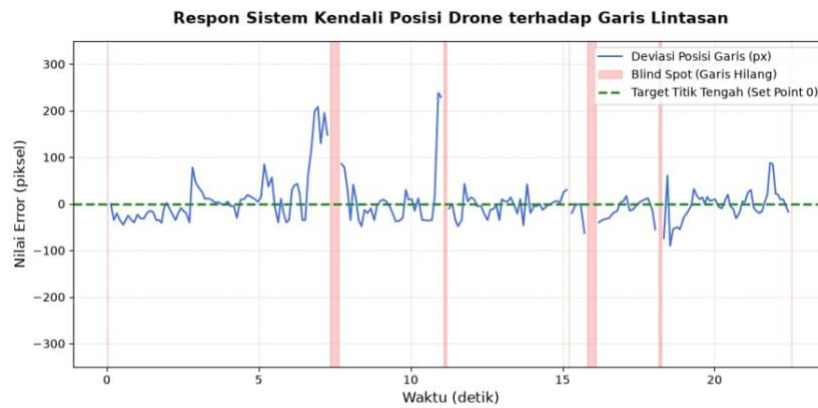
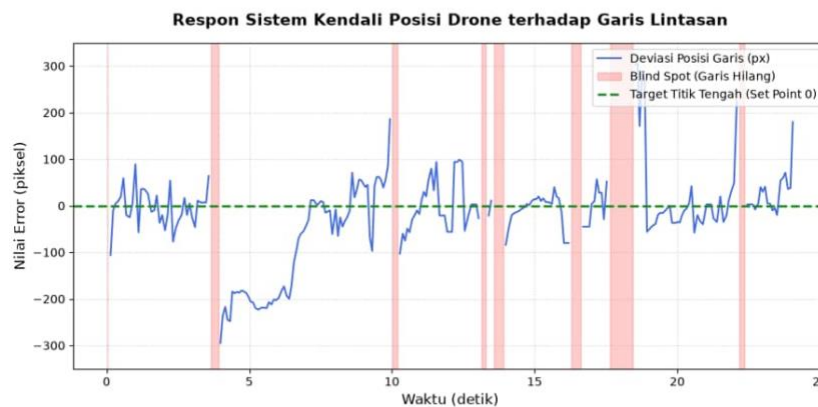
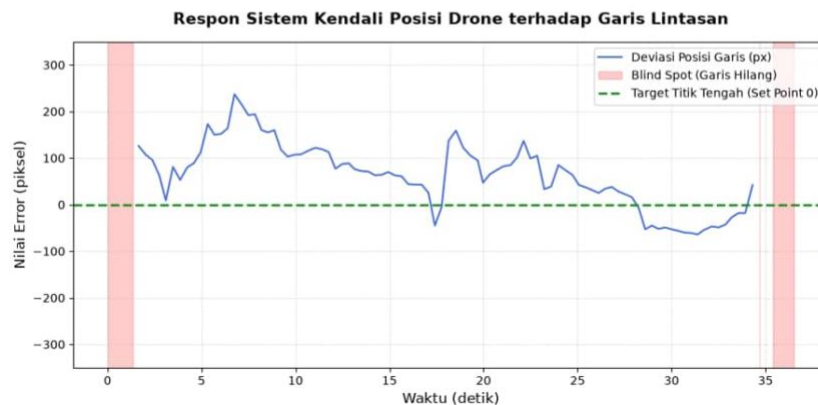
Tabel 3 Rekapitulasi hasil uji terbang *autonomous line following* pada tiga variasi ketinggian

Parameter	1 meter	1,5 meter	2 meter
Total frame diproses (frame)	222	270	103
Frame terdeteksi (frame)	207	235	93
Tingkat deteksi (%)	93,24	87,04	90,29
Rata-rata error (piksel)	28,90	62,86	80,14
Rata-rata error (cm)	5,21	17,03	28,93
Yaw rate maksimum (°/s)	15,07	13,08	24,13
Yaw rate rata-rata (°/s)	3,83	3,48	1,08
Proporsi metode HSV (%)	1,4	7,7	79,6
Proporsi metode Hough (%)	98,6	92,3	20,4

3.1.3. Proporsi Penggunaan Metode Deteksi

Grafik deviasi *error* posisi garis pada ketiga ketinggian ditunjukkan pada Gambar 7, memperlihatkan fluktuasi *error* yang semakin besar seiring bertambahnya

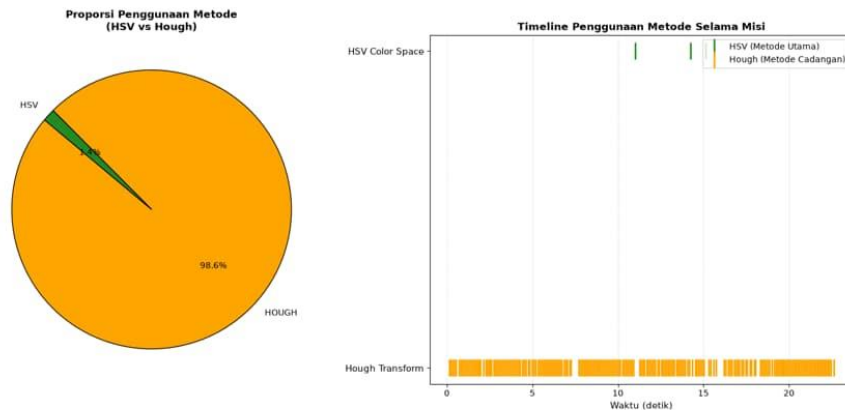
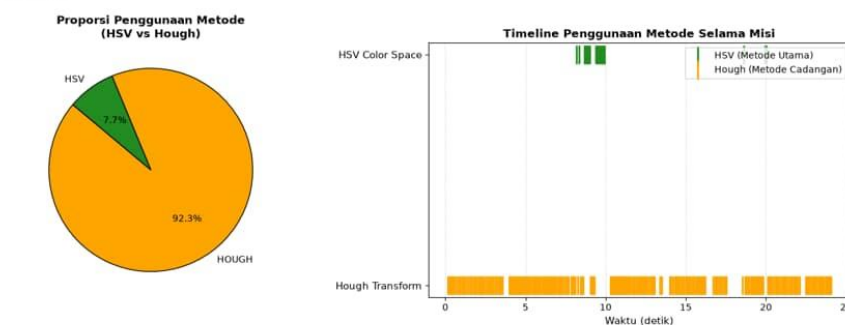
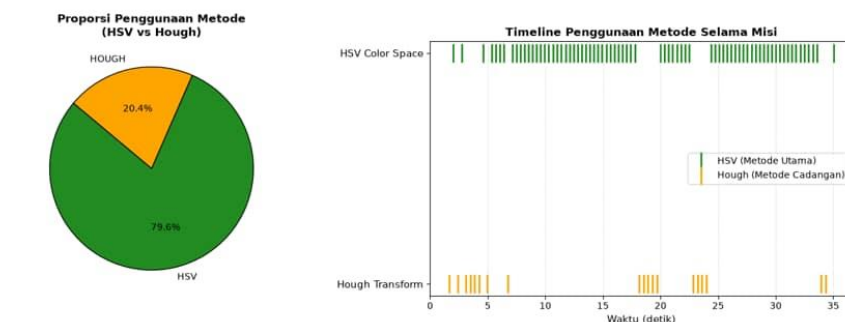
ketinggian terbang, nilai deviasi yang semakin kecil menunjukkan bahwa posisi quadcopter semakin berada di atas garis panduan, sedangkan nilai deviasi yang semakin besar menunjukkan bahwa quadcopter bergerak semakin menjauh dari garis sehingga diperlukan koreksi arah oleh sistem kendali.

(a) 1 m**(b) 1,5 m****(c) 2 m**

Gambar 7 Grafik deviasi *error* posisi garis pada ketinggian (a) 1 m, (b) 1,5 m, dan (c) 2 m

Temuan yang paling menonjol adalah pergeseran proporsi metode deteksi terhadap ketinggian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, yang terdiri dari dua bagian: diagram lingkaran yang menunjukkan persentase waktu terbang di mana masing-masing metode HSV atau *Hough Transform* berhasil mendeteksi garis, dan diagram *timeline* yang menunjukkan kapan tepatnya tiap metode

aktif digunakan sepanjang durasi misi. Pada ketinggian 1 meter, metode HSV hanya berkontribusi 1,4% sedangkan *Hough Transform* mendominasi sebesar 98,6%. Proporsi HSV meningkat menjadi 7,7% pada ketinggian 1,5 meter, dan meningkat tajam menjadi 79,6% pada ketinggian 2 meter, kondisi terbalik dari ketinggian 1 meter, di mana *Hough Transform* hanya digunakan sebesar 20,4%.

(a) 1 m**(b) 1,5 m****(c) 2 m**

Gambar 8 Proporsi penggunaan metode deteksi (HSV vs *Hough*) pada ketinggian (a) 1 m, (b) 1,5 m, dan (c) 2 m

3.1.4. Perbandingan Performa Metode Deteksi Garis

Untuk memberikan gambaran mengenai kontribusi metode gabungan, dilakukan perbandingan performa antara HSV-only, Hough-only, dan HSV+Hough menggunakan data pengujian yang sama pada setiap variasi ketinggian. Evaluasi

dilakukan berdasarkan empat parameter, yaitu *detection rate*, deviasi posisi garis, waktu komputasi, dan keberhasilan misi. Pada penelitian ini, suatu metode dinyatakan berhasil apabila memiliki *detection rate* $\geq 80\%$, sedangkan nilai di bawah ambang tersebut dikategorikan tidak berhasil. Hasil perbandingan ketiga metode ditunjukkan pada Tabel 4.

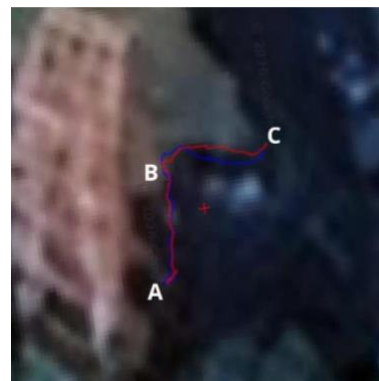
Tabel 4 Perbandingan Performa Metode Deteksi Garis pada Berbagai Ketinggian

Ketinggian	Metode	Detection Rate (%)	Deviasi (px)	Waktu Komputasi (ms)	Keberhasilan Misi
1 meter	HSV <i>only</i>	64,86	48,11	1,377	Tidak berhasil
	Hough <i>only</i>	100	76,04	12,485	Berhasil
	HSV+Hough	100	59,34	7,095	Berhasil
1,5 meter	HSV <i>only</i>	74,81	62,72	1,116	Tidak berhasil
	Hough <i>only</i>	100	83,38	9,63	Berhasil
	HSV+Hough	100	69,55	3,26	Berhasil
2 meter	HSV <i>only</i>	73,53	76,76	0,993	Tidak berhasil
	Hough <i>only</i>	100	41,41	6,419	Berhasil
	HSV+Hough	100	67,13	3,192	Berhasil

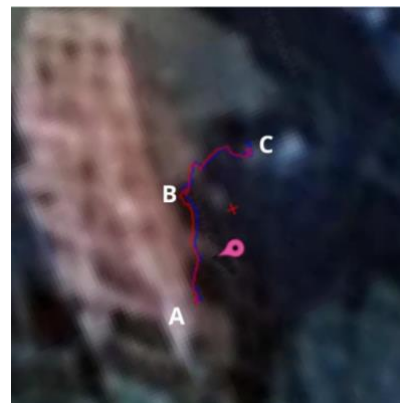
Berdasarkan Tabel 4, metode HSV-*only* menghasilkan *detection rate* sebesar 64,86–74,81% pada seluruh variasi ketinggian sehingga belum memenuhi kriteria keberhasilan misi. Sebaliknya, metode Hough-*only* dan HSV+Hough mampu mempertahankan *detection rate* sebesar 100% pada seluruh pengujian. Dari sisi waktu komputasi, HSV-*only* memiliki waktu pemrosesan paling rendah, sedangkan Hough-*only* membutuhkan waktu komputasi paling tinggi. Adapun metode HSV+Hough menghasilkan waktu komputasi yang berada di antara kedua metode tersebut. Untuk parameter deviasi posisi garis, nilai yang diperoleh bervariasi pada setiap ketinggian pengujian.

3.1.5. Trajectory Lintasan Quadcopter

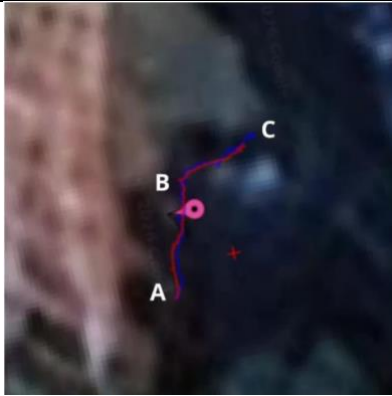
Data *trajectory* dari Mission Planner (Gambar 9-11) menunjukkan lintasan GPS garis berwarna biru dan estimasi posisi *flight controller* garis berwarna merah saling berhimpit pada ketiga ketinggian, dengan sedikit selisih antara kedua garis pada area tikungan sebelum kembali mengikuti arah jalur hingga misi selesai yang menunjukkan bahwa pergerakan quadcopter selama misi line following konsisten dan sesuai rencana, termasuk saat bermanuver mengikuti tikungan..



Gambar 9 Trajectory lintasan quadcopter pada ketinggian 1 m



Gambar 10 Trajectory lintasan quadcopter pada ketinggian 1,5 m



Gambar 11 *Trajectory* lintasan quadcopter pada ketinggian 2 m

3.2 Pembahasan

Perubahan proporsi penggunaan metode HSV dan *Hough Transform* seiring bertambahnya ketinggian menunjukkan bahwa, pada ketinggian rendah (1 m), bidang pandang kamera relatif sempit sehingga garis sering tidak terekam secara utuh dalam satu *frame*, menyebabkan proses segmentasi HSV lebih sering gagal membentuk *contour* yang memenuhi kriteria luas area dan *aspect ratio*, sehingga sistem lebih banyak mengaktifkan *Hough Transform* sebagai cadangan. Sebaliknya, pada ketinggian 2 m, garis lintasan dapat terekam secara lebih utuh dalam bidang pandang yang lebih luas, sehingga segmentasi warna menjadi lebih stabil dan HSV menjadi metode dominan. Pola ini menunjukkan bahwa kedua metode bersifat saling melengkapi terhadap kondisi geometris pengamatan, bukan terhadap pencahayaan semata sebagaimana diasumsikan pada hipotesis awal sebuah nuansa penting yang memperkaya pemahaman tentang kapan masing-masing metode paling efektif digunakan.

Sementara itu, tingkat deteksi garis yang tidak monoton terhadap ketinggian yaitu 93,24% pada 1 m, turun ke 87,04% pada 1,5 m, kemudian naik ke 90,29% pada 2 m yang mengindikasikan bahwa performa sistem tidak semata-mata ditentukan oleh satu metode dominan, melainkan oleh interaksi antara kualitas segmentasi HSV, efektivitas *fallback Hough*, dan kondisi lingkungan aktual seperti pantulan cahaya, bayangan, tekstur rumput pada setiap sesi

pengujian. Peningkatan deviasi *error* secara konsisten terhadap ketinggian sejalan dengan prinsip optik kamera: semakin tinggi posisi kamera, semakin luas area yang direpresentasikan oleh satu piksel, sehingga nilai *error* dalam piksel yang serupa dapat merepresentasikan pergeseran fisik yang jauh lebih besar pada ketinggian yang lebih tinggi. *Yaw rate* maksimum yang justru meningkat pada ketinggian 2 m sebesar 24,13°/s dibandingkan 1 m (15,07°/s) turut mengonfirmasi bahwa deviasi posisi yang lebih besar pada ketinggian tinggi memerlukan koreksi orientasi yang lebih agresif saat memasuki tikungan.

Hasil perbandingan performa antara HSV-only, Hough-only, dan HSV+Hough pada Tabel 4 memberikan bukti kuantitatif mengenai manfaat metode gabungan, yang sebelumnya hanya terindikasi dari seringnya aktivasi Hough Transform pada Gambar 8. Kegagalan HSV-only memenuhi kriteria keberhasilan misi pada seluruh ketinggian (*detection rate* 64,86–74,81%) menunjukkan bahwa segmentasi warna saja tidak cukup andal menghadapi variasi kondisi lapangan yang sesungguhnya. Di sisi lain, meskipun Hough-only mampu menyamai *detection rate* 100% milik HSV+Hough, metode ini memerlukan waktu komputasi yang jauh lebih tinggi pada seluruh ketinggian (misalnya 12,49 ms/frame berbanding 7,10 ms/frame pada ketinggian 1 m), sejalan dengan rentang waktu komputasi algoritma yang dilaporkan pada Tabel 4. Hal ini mengonfirmasi bahwa strategi menjadikan HSV sebagai metode utama dan Hough Transform sebagai cadangan bukan sekadar redundansi, melainkan memberikan keseimbangan yang lebih baik antara keandalan deteksi dan efisiensi komputasi pertimbangan penting mengingat keterbatasan sumber daya komputasi pada *embedded system* seperti Raspberry Pi yang harus memproses citra secara *real-time*.

Dibandingkan penelitian Rasyid (2025) yang membatasi pengujian pada lintasan linear menggunakan Raspberry Pi

4, penelitian ini menunjukkan peningkatan kapabilitas melalui penambahan dua ROI dan kendali *yaw* adaptif, yang menunjukkan mampu mengenali transisi lurus-ke-belok secara *real-time* pada ketiga ketinggian uji, Perubahan orientasi hadap quadcopter (ATT.Yaw) turut mengonfirmasi ketepatan waktu aktivasi kendali *yaw* adaptif: pada ketinggian 1 m, ATT.Yaw berubah dari sekitar 270° menuju 359° saat memasuki tikungan; pada 1,5 m dari 276° menuju 45°; dan pada 2 m dari 290° menuju 350°. Ketiganya berimpit dengan lonjakan *yaw rate* pada Tabel 3, menunjukkan bahwa sistem secara konsisten mengubah arah hadap quadcopter tepat saat garis lintasan berbelok ditunjukkan oleh perubahan ATT.Yaw yang konsisten mengikuti arah lintasan pada setiap sesi pengujian. Implikasi praktis dari temuan perubahan proporsi metode ini adalah pentingnya mempertimbangkan ketinggian terbang optimal serta desain *dual-method fallback* pada aplikasi inspeksi hanggar nyata, mengingat jarak kamera terhadap objek akan memengaruhi metode deteksi mana yang lebih dominan bekerja. Studi lanjutan pada lingkungan *indoor* dengan pencahayaan terkendali menjadi langkah krusial sebelum sistem ini diadopsi penuh untuk aplikasi MRO.

4. Simpulan dan Saran

4.1 Simpulan

Sistem visi komputer berbasis segmentasi HSV yang didukung Hough Transform sebagai mekanisme cadangan berhasil diimplementasikan pada quadcopter otonom untuk misi *line following* pada jalur lurus dan berbelok, dan diuji pada tiga variasi ketinggian terbang (1 m, 1,5 m, dan 2 m) sebagai studi validasi awal di lingkungan luar ruang. Pada sesi penerbangan representatif tiap ketinggian, sistem mencapai tingkat deteksi garis sebesar 93,24% pada 1 m, 87,04% pada 1,5 m, dan 90,29% pada 2 m, dengan deviasi error yang meningkat konsisten terhadap

ketinggian dan kendali *yaw* adaptif yang secara konsisten aktif tepat saat quadcopter memasuki tikungan.

Hasil perbandingan performa antara HSV-only, Hough-only, dan HSV+Hough pada data pengujian yang sama membuktikan bahwa manfaat metode gabungan bukan sekadar akibat seringnya *fallback* aktif, melainkan memiliki dasar kuantitatif yang jelas: metode HSV-only gagal memenuhi kriteria keberhasilan misi pada seluruh ketinggian (*detection rate* 64,86–74,81%), sedangkan Hough-only dan HSV+Hough sama-sama mencapai *detection rate* 100% dan berhasil menyelesaikan misi. Namun, metode HSV+Hough menghasilkan waktu komputasi yang jauh lebih rendah dibandingkan Hough-only, menunjukkan bahwa strategi menjadikan HSV sebagai metode utama dan Hough Transform sebagai cadangan mampu mempertahankan keandalan deteksi setara dengan Hough-only, namun dengan efisiensi komputasi yang lebih baik—suatu keunggulan yang relevan untuk implementasi *real-time* pada *embedded system* dengan sumber daya komputasi terbatas seperti Raspberry Pi.

Mengingat evaluasi ini menyajikan satu sesi penerbangan representatif per ketinggian dari rangkaian pengujian berulang (≥ 10 kali) tanpa analisis statistik menyeluruh terhadap seluruh sesi, serta dilakukan di lingkungan luar ruang sebagai tahap validasi awal, simpulan ini terbatas pada pembuktian kelayakan teknis (*proof of concept*) sistem dan belum dapat digeneralisasi untuk mengklaim kesiapan sistem pada aplikasi inspeksi hanggar pesawat yang sesungguhnya.

4.2 Saran

Pengembangan lanjutan disarankan mengarah pada: (1) penerapan metode deteksi yang lebih adaptif terhadap perubahan pencahayaan, bayangan, dan tekstur permukaan lintasan pada setiap ketinggian operasi; (2) pengujian pada variasi kondisi lingkungan yang lebih luas,

termasuk pencahayaan *indoor* terkendali yang merepresentasikan kondisi hanggar sesungguhnya; (3) penggunaan *single board computer* dengan kapasitas komputasi lebih tinggi seperti NVIDIA Jetson Orin Nano untuk mendukung metode deteksi yang lebih kompleks serta mempertahankan *frame rate* yang stabil pada ketinggian yang lebih tinggi; (4) penggunaan kamera yang dirancang khusus untuk aplikasi *computer vision* guna meningkatkan stabilitas kualitas citra dibandingkan *webcam* konvensional, khususnya untuk menjaga tingkat deteksi tetap tinggi pada seluruh rentang ketinggian

operasi; dan (5) analisis statistik dari beberapa kali pengulangan pengujian pada tiap ketinggian, disertai pencatatan kondisi lingkungan secara kuantitatif misalnya intensitas cahaya dalam lux, untuk mengetahui tingkat konsistensi performa sistem antarsesi secara lebih meyakinkan.

Daftar Pustaka

- Arafat, M. Y., Alam, M. M., & Moh, S. (2023). Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges. In *Drones* (Vol. 7, Number 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/drones7020089>
- Belmonte, L. M., Morales, R., & Fernández-Caballero, A. (2019). Computer vision in autonomous unmanned aerial vehicles-A systematic mapping study. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Number 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9153196>
- Besari, D. W. (2024). *Pengembangan Sistem Navigasi Line Following Drone Berbasis Visi Komputer dengan Kemampuan Berpindah Ketinggian Lantai*.
- Chang, Y., Cheng, Y., Manzoor, U., & Murray, J. (2023). A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments. In *Robotics and Autonomous Systems* (Vol. 170). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104533>
- Duda, R. O., & Hart, P. E. (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Commun. ACM*, 15(1), 11–15. <https://doi.org/10.1145/361237.361242>
- Hossen, M. K., Bari, S., Barman, P. P., Roy, R., & Das, P. (2022). Application of Python-OpenCV to detect contour of shapes and colour of a real image. *International Journal of Novel Research in Computer Science and Software Engineering*, 20–25. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6576264>
- Intelligence, K. S. (2025). *Indonesia Drone Market Report Growth, Trends, Forecast 2030*.
- Islam, M. R., & Horio, K. (2023). Real Time-Based Face Recognition, Tracking, Counting, and Calculation of Spent Time of Person Using OpenCV and Centroid Tracker Algorithms. *2023 5th International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)*, 210–216.

- <https://doi.org/10.1109/ICCCI59363.2023.10210102>
- Kadhim, H. J., & Abbas, A. H. (2023). Detect Lane Line for Self-Driving Car Using Hue Saturation Lightness and Hue Saturation Value Color Transformation. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 19(16), 4–19. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i16.43359>
- Kusnandar, T., Santoso, J., & Surendro, K. (2024). Enhancing Color Selection in HSV Color Space. *Ingenierie Des Systemes d'Information*, 29(4), 1483–1491. <https://doi.org/10.18280/isi.290421>
- Liao, K. C., Liou, J. L., Hidayat, M., Wen, H. T., & Wu, H. Y. (2024). Detection and Analysis of Aircraft Composite Material Structures Using UAV. *Inventions*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/inventions9030047>
- Lu, H., Shen, H., Tian, B., Zhang, X., Yang, Z., & Zong, Q. (2022). Flight in GPS-denied environment: Autonomous navigation system for micro-aerial vehicle. *Aerospace Science and Technology*, 124.
- <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107521>
- Miftah Rasyid, M. (2025). *Quadcopter V10: Kaji Pengolahan Citra untuk Misi Terbang Line Following Quadcopter v10: Study of Image Processing System for Line Following Flight Missions*.
- Peksa, J., & Mamchur, D. (2024). A Review on the State of the Art in Copter Drones and Flight Control Systems. In *Sensors* (Vol. 24, Number 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s24113349>
- Sihombing, O., Buulolo, E., & Siburian, H. (2018). IMPLEMENTASI METODE OPERASI MORFOLOGIS DALAM PERBAIKAN HASIL SEGMENTASI CITRA DIGITAL GORGA BATAK. *KOMIK (Konferensi Nasional Teknologi Informasi Dan Komputer)*, 2. <https://doi.org/10.30865/komik.v2i1.906>
- Soh, L. S., & Ho, H. W. (2023). *Autonomous Navigation of Micro Air Vehicles in Warehouses Using Vision-based Line Following*. <http://arxiv.org/abs/2310.00950>