

Kinerja *Optical Flow* dalam Estimasi Kecepatan Terbang SUAV Menggunakan Metode Farneback

Aziz Fathurrahman¹, Ony Arifianto¹, Yazdi Ibrahim Jenie¹, Hari Muhammad¹

¹ Program Studi Teknik Dirgantara, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

[Diserahkan: 21 Agustus 2024, Direvisi: 8 November 2024, Diterima: 15 Januari 2025]

Penulis Korespondensi: Aziz Fathurrahman (email: 33621003@mahasiswa.itb.ac.id)

INTISARI — Makalah ini mengevaluasi kinerja metode *optical flow* Farneback untuk memperkirakan kecepatan terbang pesawat udara tanpa awak kecil (*small unmanned aerial vehicle*/SUAV) dalam lingkungan simulasi 3D MATLAB-Unreal Engine. *Optical flow* menawarkan solusi yang menjanjikan untuk estimasi kecepatan, yang sangat penting untuk navigasi otonom. Sebuah model kamera monokular yang menghadap ke bawah disimulasikan pada SUAV selama kondisi penerbangan lurus stabil pada ketinggian 100 m dan kecepatan udara 25 m/s. Tiga pemandangan penerbangan yang disimulasikan—hutan, perkotaan, dan perairan—mewakili tekstur yang kurang, sedang, dan kaya untuk menilai kinerja metode ini. Hasilnya menunjukkan bahwa estimasi median dari bidang *optical flow* menghasilkan estimasi kecepatan yang akurat pada pemandangan tekstur sedang hingga kaya. Pada pemandangan perkotaan dan hutan, akurasi estimasi kecepatan rata-rata adalah 0,6 m/s ($\sigma = 0,2$ m/s) dan 0,3 m/s ($\sigma = 0,4$ m/s). Pengaruh variasi sudut kemiringan kamera dan ketinggian terhadap akurasi estimasi juga dianalisis. Kedua faktor tersebut memperkenalkan bias, dengan akurasi menurun menjadi 1,7 m/s ($\sigma = 0,2$ m/s) dan 1,9 m/s ($\sigma = 0,2$ m/s) untuk kemiringan kamera $+10^\circ$ dan -10° . Demikian pula, perbedaan ketinggian $+10$ m dan -10 m menghasilkan akurasi yang berkurang menjadi 1,9 m/s ($\sigma = 0,2$ m/s) dan 4,3 m/s ($\sigma = 0,1$ m/s). Studi ini menunjukkan potensi metode Farneback untuk menentukan kecepatan terbang dalam kondisi penerbangan lurus stabil dengan akurasi layak.

KATA KUNCI — Estimasi Kecepatan Terbang, UAV Kecil, *Optical Flow*, Evaluasi Kinerja.

I. PENDAHULUAN

Minat terhadap pesawat udara tanpa awak (*unmanned aerial vehicle*, UAV) atau *drone* telah meningkat dalam dekade terakhir karena kemampuannya yang serbaguna untuk melakukan berbagai tugas yang membutuhkan pengangkutan beban di udara. UAV telah menunjukkan aplikasinya yang bermanfaat di bidang militer dan sipil, seperti pengawasan udara [1], pengiriman paket [2], pemantauan lalu lintas [3], operasi SAR [4], pertanian presisi [5], dan penginderaan jauh [6]. Terutama untuk UAV kecil (*small UAV*, SUAV) [7], domain aplikasi UAV telah berkembang secara signifikan berkat harga yang terjangkau dan kemudahan penggunaannya dibandingkan UAV yang lebih besar. Oleh karena itu, terdapat peningkatan signifikan dalam minat penelitian yang berfokus pada SUAV yang bertujuan untuk meningkatkan fungsionalitasnya melalui pengembangan menuju otonomi penuh [8].

Namun, SUAV otonom memerlukan sistem navigasi yang akurat dan andal untuk memastikan penyelesaian misi secara aman serta menghindari risiko terhadap SUAV itu sendiri maupun lingkungannya. Permasalahan utama dalam navigasi SUAV berfokus pada peningkatan sistem navigasi satelit Global Navigation Satellite System (GNSS) agar tetap menghasilkan keluaran navigasi yang akurat ketika sumber data tidak tersedia akibat gangguan tak terduga atau serangan yang disengaja di lingkungan yang tidak mendukung GNSS (*GNSS-denied environment*), seperti interferensi sinyal (*jamming*) atau pemalsuan sinyal (*spoofing*). Oleh karena itu, pendekatan berbasis *sensor fusion* menjadi solusi yang penting dengan mengacu pada persamaan dasar navigasi serta karakterisasi kesalahan yang terjadi pada setiap sensor [9], [10]. Untuk membangun sistem navigasi yang lebih akurat dan andal, pendekatan *sensor fusion* mengintegrasikan informasi dari

berbagai sensor. *Sensor fusion* memungkinkan pemanfaatan berbagai jenis sensor dalam sistem navigasi. Secara konvensional, sistem navigasi SUAV umumnya terdiri atas unit pengukuran inersia (*inertial measurement unit*, IMU) dan GNSS. Meskipun IMU memiliki laju pengambilan sampel yang relatif tinggi, akurasinya menurun seiring waktu akibat bias dan derau (*noise*) yang melekat pada sensor tersebut [11]. Sementara itu, GNSS memiliki akurasi yang lebih stabil, tetapi sangat bergantung pada sinyal eksternal dari satelit, yang dapat mengalami degradasi, gangguan, atau bahkan pemalsuan dalam kondisi tertentu [12]. Beberapa sensor alternatif yang dapat digunakan sebagai pelengkap IMU dan GNSS mencakup altimeter barometrik, kompas magnetik, Wi-Fi, Bluetooth, *radio-frequency identification* (RFID), *ultra-wideband* (UWB), ultrasonik, *light detection and ranging* (LiDAR), jaringan 5G, dan kamera [11]. Meskipun terdapat banyak pilihan sensor tambahan untuk mendukung IMU dan GNSS, penelitian ini berfokus pada penggunaan kamera terpasang (*on-board*) karena tidak bergantung pada sumber sinyal eksternal dan memiliki potensi besar untuk pengembangan lebih lanjut. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa serangga terbang menggunakan penglihatan untuk navigasi [13]. Oleh karena itu, navigasi berbasis pengolahan citra merupakan solusi alami bagi wahana udara. Berbagai algoritma navigasi berbasis sensor telah dikembangkan dan penelitian ini berfokus pada metode *optical flow*, karena penelitian terbaru lebih banyak berfokus pada navigasi dalam ruangan, sedangkan kajian mengenai *optical flow* untuk navigasi luar ruangan masih terbatas [8].

Estimasi *optical flow* untuk navigasi SUAV merupakan bidang penelitian yang terus berkembang. Studi awal mengenai estimasi *optical flow* untuk wahana udara pertama kali dikemukakan oleh Grindley pada tahun 1942, Calvert pada tahun 1947, dan Gibson pada tahun 1950, yang menyoroti

pentingnya petunjuk visual bagi pilot dalam mengendalikan pesawat selama proses pendaratan [14]–[16]. Selain itu, beberapa penelitian telah menemukan bahwa estimasi *optical flow* dapat digunakan dalam pengendalian gerakan selama pendaratan dengan memanfaatkan laju ekspansi citra untuk memperkirakan waktu kontak dengan permukaan. Fakta ini mendorong lebih banyak studi terkait pemanfaatan *optical flow* dalam pengendalian dan navigasi wahana udara, khususnya SUAV.

Estimasi *optical flow* untuk berbagai subtugas navigasi SUAV telah diteliti, baik dengan menggunakan sensor pencitraan saja maupun dikombinasikan dengan sensor lainnya. Aplikasi tersebut mencakup estimasi jarak [17], penahan ketinggian dan penghindaran rintangan [18], estimasi kecepatan dan ketinggian [19], serta pendaratan vertikal [20]. Penelitian ini berfokus pada estimasi kecepatan terbang dalam pemandangan penerbangan luar ruangan karena *optical flow* berpotensi menjadi kandidat yang baik untuk meningkatkan akurasi estimasi kecepatan terbang IMU dengan mengurangi kesalahan akibat bias dan derau IMU. Kecepatan terbang yang diestimasi kemudian digunakan untuk merekonstruksi jalur penerbangan SUAV sebagai bagian dari sistem navigasi.

Penelitian sebelumnya telah melakukan evaluasi kuantitatif terhadap akurasi estimasi *optical flow* dalam menentukan kecepatan terbang pada pemandangan penerbangan luar ruangan [13]. Pada kecepatan tinggi, efek *motion blur* dapat secara signifikan menurunkan akurasi estimasi *optical flow*. Oleh karena itu, diperlukan algoritma khusus yang mampu mengatasi efek kabur (*blur*) atau alternatif sensor lain untuk aplikasi UAV berkecepatan tinggi. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa metode Farneback lebih menjanjikan dalam estimasi *optical flow* dibandingkan metode Lucas-Kanade dan Horn-Schunck [21]. Namun, belum ditemukan penelitian yang secara khusus mengkaji kinerja metode Farneback dalam aplikasi SUAV. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan metode *optical flow* Farneback dalam menentukan kecepatan terbang SUAV untuk navigasi luar ruangan melalui simulasi numerik. Dengan kemajuan teknologi komputasi, simulasi numerik kini dapat menyediakan berbagai skenario penerbangan untuk menguji akurasi estimasi *optical flow*. Hasil estimasi *optical flow* dibandingkan dengan hasil analitis (sebagai nilai sebenarnya) dalam kondisi penerbangan lurus dan stabil.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja pendekatan *optical flow* dalam menentukan kecepatan terbang SUAV untuk navigasi luar ruangan. Beberapa langkah dilakukan dalam penelitian ini. Pertama, SUAV dimodelkan melakukan penerbangan lurus dan stabil dari titik A ke titik B sebagai contoh fase penerbangan dalam misi pengiriman kargo, dengan menggunakan persamaan kinematika. Dalam penelitian ini, digunakan SUAV jenis *fixed-wing* dengan lebar sayap 2 m dan bobot lepas landas maksimum (*maximum takeoff weight*, MTOW) sebesar 18 kg. Selanjutnya, estimasi *optical flow* dimodelkan berdasarkan video yang direkam. Kemudian, dunia virtual 3D digunakan untuk simulasi dengan tiga pemandangan: lingkungan perkotaan, hutan, dan perairan. Terakhir, berbagai faktor yang dapat memengaruhi kinerja *optical flow* diamati dan dibandingkan, termasuk ketinggian serta sudut kemiringan kamera terhadap parameter navigasi, khususnya kecepatan dan posisi SUAV dalam kerangka referensi cakrawala lokal.

II. NAVIGASI SUAV OPTICAL FLOW

Optical flow didefinisikan sebagai pergerakan semu dari intensitas citra atau intensitas kecerahan yang terjadi akibat proyeksi dua dimensi (*2D projection*) dari gerakan relatif tiga dimensi (*3D motion*) titik-titik dalam suatu adegan ke kamera (sebagai sensor citra). Dalam kondisi ideal, *optical flow* berkorelasi dengan medan kecepatan pada bidang citra (atau perpindahan visual titik-titik citra) yang diperoleh dari proyeksi dua dimensi kecepatan objek yang bergerak dalam ruang tiga dimensi. Pergerakan ini pada bidang citra dapat digunakan untuk menyimpulkan pergerakan kamera relatif terhadap objek di dunia nyata.

A. KONFIGURASI KAMERA DOWNWARD-LOOKING PADA SUAV

Konfigurasi kamera *downward-looking* atau kamera yang menghadap ke bawah (Gambar 1) dianggap sebagai konfigurasi yang paling umum digunakan dalam berbagai penelitian navigasi SUAV terbaru. Pengaturan kamera ini menyederhanakan permasalahan estimasi kecepatan SUAV karena sumbu kamera (x_c , y_c , dan z_c) sejajar dengan sumbu badan SUAV (x_b , y_b , dan z_b), sehingga pergerakan kamera mewakili pergerakan SUAV dalam sumbu utamanya. Kamera *downward-looking* menangkap atau mengambil sampel citra pada setiap waktu pengambilan sampel. Dalam penelitian ini, laju pengambilan sampel sebesar 30 Hz dipilih sebagai laju pengambilan sampel standar untuk kamera monokular yang dipasang pada SUAV. Citra yang diperoleh dari kamera kemudian digunakan untuk memperkirakan *optical flow*.

B. OPTICAL FLOW YANG DIHASILKAN OLEH PERGERAKAN KAMERA

Berdasarkan definisi *optical flow* yang telah dijelaskan pada awal Bagian II, *optical flow* antara dua citra berturut-turut dapat dihitung dari pergerakan piksel dengan nilai intensitas kecerahan yang sama dari bingkai citra sebelumnya ke bingkai citra berikutnya (dua bingkai berturut-turut), sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 2. Konservasi intensitas suatu piksel antara dua bingkai citra berturut-turut dimodelkan dalam (1) [22].

$$I(x_c, y_c, t) = I(x_c + dx_c, y_c + dy_c, t + dt) \quad (1)$$

dengan $I(x_c, y_c, t)$ merupakan intensitas suatu piksel pada koordinat (x_c, y_c) dalam bingkai citra sebelum waktu (t) dan $I(x_c + dx_c, y_c + dy_c, t + dt)$ merupakan intensitas piksel pada koordinat $(x_c + dx_c, y_c + dy_c)$ dan waktu posterior $(t + dt)$.

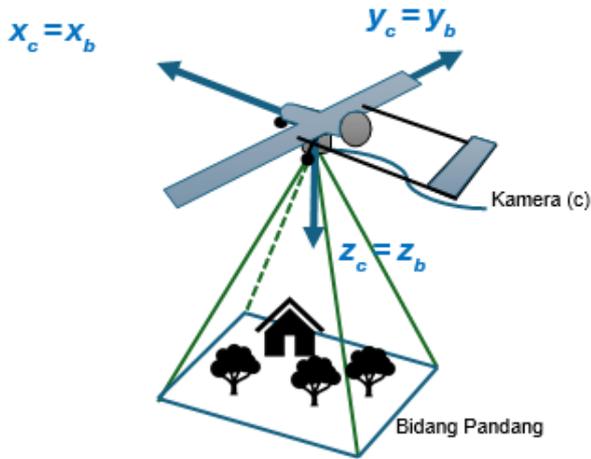
Berdasarkan prinsip konservasi intensitas, sebuah persamaan batasan gradien yang umum dikenal dalam *optical flow* [23] dapat diturunkan sebagai berikut.

$$OF_x \left(\frac{\partial I}{\partial x_c} \right) + OF_y \left(\frac{\partial I}{\partial y_c} \right) + \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

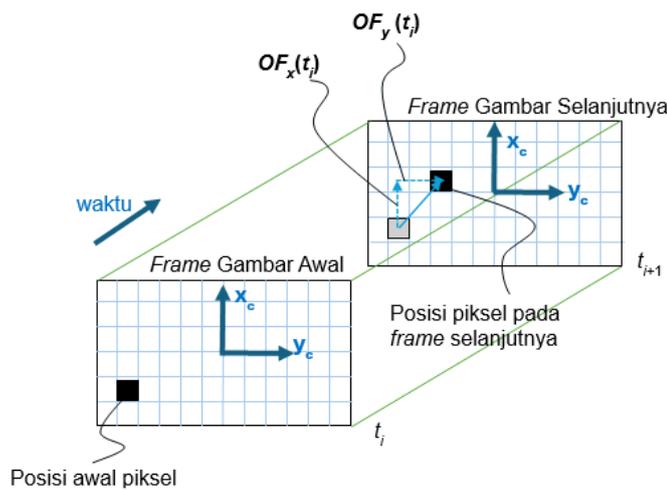
dengan OF_x dan OF_y merupakan komponen *optical flow* pada koordinat x_c dan y_c dari suatu titik pada bingkai citra.

Dalam kondisi penerbangan sebenarnya, SUAV dapat bergerak dalam enam derajat kebebasan (*six degrees of freedom*, 6DOF), yang terdiri atas tiga gerakan translasi (*3DOF translational motion*: u , v , dan w) dan tiga gerakan rotasi (*3DOF rotational motion*: p , q , dan r) dalam sumbu utamanya. Oleh karena itu, hubungan antara *optical flow* suatu titik dalam bidang citra dan pergerakan SUAV umumnya dimodelkan dalam (3) sebagai berikut.

$$\begin{pmatrix} OF_x \\ OF_y \end{pmatrix} = T_{OF} + R_{OF} \quad (3)$$



Gambar 1. Pemasangan kamera yang direpresentasikan oleh sumbu kamera (c) dan orientasi dari UAV dipresentasikan oleh sumbu benda (b), dengan z_c adalah arah dari lensa kamera.



Gambar 2. Optical flow antara dua bingkai citra.

dengan komponen translasi (T_{OF}) dinyatakan sebagai (4)

$$T_{OF} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} -f & 0 & x_c \\ 0 & -f & y_c \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (4)$$

dan komponen rotasi (R_{OF}) dinyatakan dalam (5)

$$R_{OF} = \begin{bmatrix} \frac{x_c y_c}{f} & -(f + \frac{x_c^2}{f}) & y_c \\ (f + \frac{y_c^2}{f}) & -\frac{x_c y_c}{f} & -x_c \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (5)$$

dengan OF_x dan OF_y merupakan komponen *optical flow* pada koordinat x dan y suatu titik dalam bingkai citra. Sementara itu, vektor $(u \ v \ w)^T$ dan $(p \ q \ r)^T$ masing-masing merupakan kecepatan translasi dan laju rotasi dalam koordinat utama SUAV serta f adalah panjang fokus kamera. Dalam kondisi penerbangan lurus dan stabil (tanpa rotasi dan dengan ketinggian konstan) dengan konfigurasi kamera *downward-looking*, (3) dapat disederhanakan menjadi (6).

$$\begin{pmatrix} OF_x \\ OF_y \end{pmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} -f & 0 \\ 0 & -f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (6)$$

dengan R_{OF} diabaikan dan $w = 0$.

Gerakan kamera *downward-looking*, yang mengikuti gerakan SUAV, menghasilkan medan *optical flow* pada bidang citra. Dalam penelitian ini, digunakan resolusi citra sebesar 720×1.280 piksel atau yang dikenal sebagai kualitas citra 720p.

Dari medan *optical flow* yang diperoleh (720×1.280 piksel), nilai median digunakan untuk merepresentasikan *global optical flow*. Kemudian, dari *global optical flow* (OF_x dan OF_y), (4) digunakan untuk memperoleh nilai u dan v . Penelitian ini hanya mempertimbangkan pergerakan SUAV dalam sumbu x_b dan y_b atau komponen kecepatan u dan v , sedangkan kondisi lainnya diasumsikan tetap. Dalam beberapa penelitian lain, *optical flow* umumnya dikombinasikan dengan sensor lain, seperti giroskop dan sensor ketinggian atau kedalaman, untuk memperoleh informasi mengenai gerakan rotasi (p , q , dan r) dan perubahan ketinggian ($-\Delta z_c$). Oleh karena itu, salah satu keterbatasan kamera *optical flow* dalam navigasi SUAV adalah keterbatasan informasi hingga hanya 2DOF, sehingga diperlukan tambahan sensor lain untuk memperkirakan pergerakan SUAV dalam 6DOF secara lengkap

Dalam kasus penerbangan lurus dan stabil, kamera monokular tunggal digunakan untuk memperkirakan kecepatan (u dan v) SUAV menggunakan teknik *optical flow*. Tiga pemandangan penerbangan virtual (lingkungan perkotaan, hutan, dan sungai) dipilih untuk menyimulasikan berbagai tingkat kekayaan tekstur dalam lingkungan penerbangan yang dapat memengaruhi akurasi teknik estimasi ini. Selain itu, pengaruh sudut kemiringan kamera dan ketinggian terhadap akurasi teknik ini juga dianalisis melalui simulasi.

III. MODEL MATEMATIS NAVIGASI SUAV BERBASIS OPTICAL FLOW

Gambar 3 menunjukkan proses simulasi pergerakan SUAV dan estimasi kecepatan SUAV dalam sumbu *north-east-down* (NED). Untuk menyimulasikan pergerakan SUAV, persamaan kinematika dan navigasi pesawat yang sudah dikenal diterapkan. Pergerakan SUAV divisualisasikan dalam adegan penerbangan virtual 3D. Model kamera yang menghadap ke bawah dikombinasikan dengan model SUAV untuk merekam video selama penerbangan, yang mewakili sistem kamera monokular tunggal yang terpasang pada SUAV.

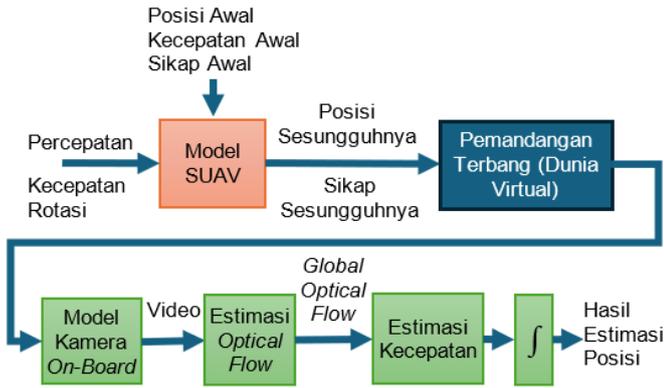
Posisi dan orientasi aktual dari SUAV diperlukan untuk menghasilkan adegan penerbangan dunia virtual yang sesuai bagi kamera untuk menangkap citra. Oleh karena itu, posisi dan orientasi aktual SUAV dimasukkan ke dalam model adegan penerbangan dunia virtual. Model kamera yang dipasang di pesawat akan mengirimkan rekaman video untuk estimasi *optical flow*. Estimasi *optical flow* menghasilkan *optical flow* yang rapat antara dua bingkai berturut-turut yang diperoleh dari video yang direkam. Oleh karena itu, *global optical flow* harus ditentukan untuk merepresentasikan pergerakan SUAV. *Global optical flow* adalah nilai *optical flow* tunggal untuk seluruh citra pada setiap bingkai dalam video yang direkam.

Global optical flow dapat direpresentasikan oleh nilai rata-rata atau median dari *optical flow* rapat sebagaimana dalam (7). Oleh karena itu, nilai rata-rata dan median dari *optical flow* rapat dibandingkan untuk meneliti akurasi yang lebih baik dalam merepresentasikan pergerakan kamera di dunia nyata.

$$\vec{OF}_{SUAV-mean} = \text{mean}(\vec{OF}_1, \vec{OF}_2, \vec{OF}_3, \dots, \vec{OF}_N) \quad (7)$$

$$\vec{OF}_{SUAV-median} = \text{median}(\vec{OF}_1, \vec{OF}_2, \vec{OF}_3, \dots, \vec{OF}_N)$$

dengan $\vec{OF}_{SUAV-mean}$ merupakan vektor *optical flow* yang diperoleh dari nilai rata-rata bidang *optical flow* yang terdiri atas komponen x dan y, $\vec{OF}_{SUAV-median}$ adalah *global optical flow* yang diperoleh dari nilai median bidang *optical flow* yang terdiri atas komponen x dan y, dan $\vec{OF}_1, \vec{OF}_2, \vec{OF}_3, \dots, \vec{OF}_N$ adalah



Gambar 3. Diagram skematik simulasi dan estimasi.

vektor *optical flow* dari setiap piksel, dari piksel 1 hingga piksel N , dengan N adalah 720×1.280 .

A. MODEL SUAV

Berdasarkan persamaan kinematika yang dikenal luas, seperti tampak pada (8), dan persamaan navigasi pesawat udara, seperti pada (9), SUAV dimodelkan sebagai pesawat berbadan kaku dengan massa konstan.

$$\begin{aligned}\dot{u} &= -qw + rv - g \sin \theta + a_{xb} \\ \dot{v} &= -ru + pw + g \cos \theta \sin \varphi + a_{yb} \\ \dot{w} &= -pv + qu + g \cos \theta \cos \varphi + a_{zb} \\ \dot{\varphi} &= p + q \sin \varphi \tan \theta + r \cos \varphi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \varphi - r \sin \varphi \\ \dot{\psi} &= q \sin \varphi \sec \theta + r \cos \varphi \sec \theta\end{aligned}\quad (8)$$

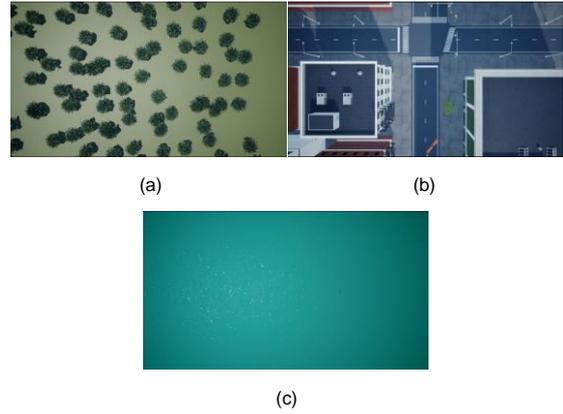
dengan \dot{u} , \dot{v} , dan \dot{w} adalah turunan waktu u , v , dan w secara berturut-turut; g adalah percepatan gravitasi pada ketinggian 100 m yang dimodelkan sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$; serta φ , θ , dan ψ adalah sudut ketinggian atau orientasi antara sumbu utama dan sumbu NED yang semua dimodelkan sebagai nol.

Semua gaya dan momen bekerja pada SUAV di pusat gravitasinya. Oleh karena itu, masukan dari model ini adalah percepatan yang sesuai (a_{xb} , a_{yb} , dan a_{zb}) dalam sumbu utama dan laju rotasi utama (p , q , dan r) yang dimodelkan sebagai nol. Dengan menggunakan persamaan kinematika, kecepatan dalam sumbu utama dan orientasi SUAV dapat diperoleh.

Selanjutnya, kecepatan dalam sumbu utama dan orientasi SUAV digunakan untuk memperoleh kecepatan dan posisi dalam sumbu 2D NED menggunakan persamaan navigasi untuk kecepatan *north* dan *east*, sementara kecepatan *down* diabaikan.

$$\begin{aligned}V_N &= u \cos \psi \cos \theta \\ &+ v (\cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi) \\ &+ w (\cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi) \\ V_E &= u \sin \psi \cos \theta \\ &+ v (\sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi) \\ &+ w (\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi)\end{aligned}\quad (9)$$

dengan V_N dan V_E masing-masing adalah komponen kecepatan dalam arah *north* dan *down*. Posisi dalam bidang *north-east*



Gambar 4. Pemandangan terbang dunia virtual, (a) pemandangan hutan mewakili pemandangan dengan tekstur yang kaya, (b) pemandangan perkotaan mewakili pemandangan dengan tekstur sedang, dan (c) pemandangan perairan mewakili pemandangan dengan tekstur yang rendah.

diperoleh dengan mengintegrasikan komponen kecepatan secara numerik.

Dalam penelitian ini, kondisi penerbangan lurus stabil dipilih untuk simulasi. Seperti yang diuraikan dalam Subbagian II.B, *optical flow* mampu secara jelas mendeteksi gerakan hingga 2DOF. Oleh karena itu, dalam kondisi penerbangan lurus stabil, *optical flow* dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan dan posisi model SUAV karena SUAV hanya bergerak dalam bidang x-y (*north-east* dalam sumbu NED). Kondisi penerbangan lurus stabil direpresentasikan oleh (10).

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 25 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ m/s} \\ \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ deg}\end{aligned}\quad (10)$$

Persamaan (10) merepresentasikan kondisi ketika kecepatan translasi dan sikap keduanya konstan. Oleh karena itu, tidak ada percepatan aktual dan laju rotasi yang terdeteksi oleh sensor. Orientasi SUAV dalam (10) menunjukkan bahwa sumbu utama dan NED sejajar. Dengan demikian, komponen kecepatan dalam sumbu utama dan NED adalah sama. Sebagai referensi, nilai sebenarnya dihitung secara analitis untuk simulasi selama 10 s dan kecepatan 25 m/s, sehingga SUAV berpindah sejauh 250 m ke arah utara dari posisi awalnya.

B. Pemandangan Penerbangan di Dunia Virtual

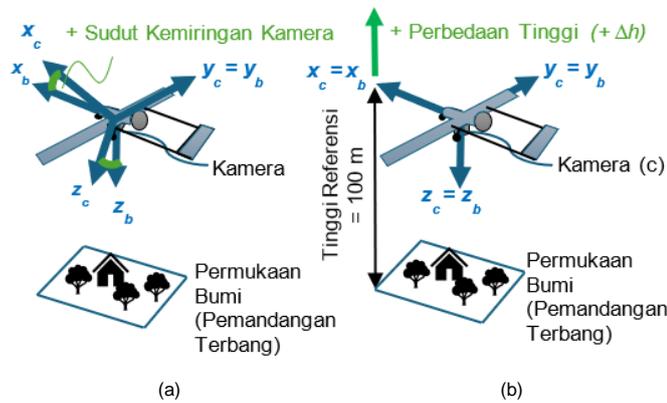
Pemandangan penerbangan di dunia virtual dibuat menggunakan Unreal Engine yang terintegrasi dengan MATLAB Simulink. Unreal Engine digunakan untuk memvisualisasikan pergerakan SUAV dan model kamera yang terpasang pada pesawat. Unreal Engine merupakan mesin permainan yang dikembangkan oleh Epic Games, yang memungkinkan pengguna melakukan *rendering* dunia virtual 3D untuk pemandangan penerbangan. Tiga pemandangan penerbangan digunakan dalam penelitian ini, yaitu pemandangan perkotaan di AS yang disediakan oleh MATLAB, pemandangan hutan, dan pemandangan perairan (Gambar 4).

C. Model Kamera Terpasang

Kamera simulasi 3D yang disediakan oleh Simulink digunakan untuk merekam citra yang ditangkap oleh kamera terpasang saat SUAV sedang terbang. Model kamera simulasi 3D ini memungkinkan pengguna menentukan posisi dan

TABEL I
SKENARIO PENGUJIAN

No	Skenario Pengujian	Tujuan	Variasi
1	Perbedaan pemandangan terbang	Untuk mengetahui efek kekayaan tekstur dalam video yang direkam terhadap akurasi estimasi kecepatan terbang.	Pemandangan hutan, perkotaan, dan perairan.
2	Perbedaan sudut kemiringan kamera	Untuk melihat efek kemiringan kamera terhadap akurasi estimasi kecepatan terbang.	Sudut kemiringan kamera -30° , -20° , -10° , 10° , 20° , dan 30° .
3	Perbedaan ketinggian	Untuk mengamati pengaruh perbedaan tinggi terbang yang tidak terlalu besar terhadap akurasi dari hasil estimasi kecepatan terbang.	Perbedaan tinggi terbang terhadap referensi (100 m) -30 m, -20 m, -10 m, 10 m, 20 m, dan 30 m.

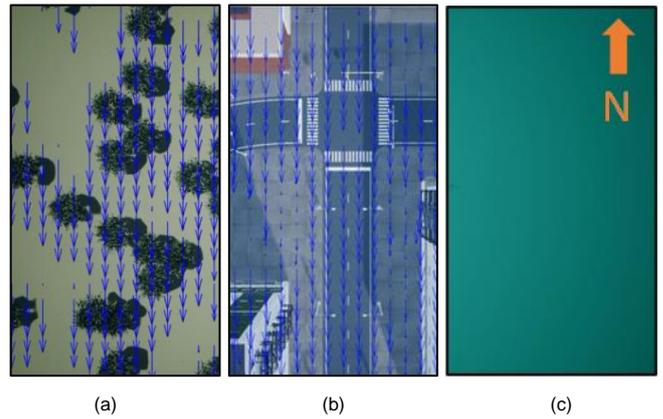


Gambar 5. Skenario pengujian, (a) sudut kemiringan kamera yang berbeda, (b) ketinggian yang berbeda; indeks b menunjukkan sumbu utama SUAV dan indeks c menunjukkan sumbu kamera.

orientasi kamera relatif terhadap kendaraan (SUAV). Keluaran dari model kamera simulasi 3D berupa rekaman video. Setelah simulasi selesai, video yang direkam kemudian dianalisis menggunakan teknik estimasi *optical flow*

D. ESTIMASI OPTICAL FLOW

Menggunakan video yang direkam, *optical flow* antara setiap dua bingkai berturut-turut dalam video (pergerakan dua bingkai), mulai dari awal hingga akhir simulasi, diperkirakan menggunakan perhitungan Farneback. Perhitungan Farneback meningkatkan metode Lucas-Kanade dengan menerapkan proses estimasi piramida dari kasar ke halus [23]. Algoritma Farneback mampu menangani *optical flow* yang lebih cepat (> 1 piksel/bingkai), yang diperlukan karena pada ketinggian 200 m di atas permukaan tanah dalam kasus SUAV, kecepatan piksel dapat melebihi 1 piksel/bingkai agar *optical flow* dapat bekerja dengan baik. Piramida citra yang dibuat oleh algoritma Farneback memiliki tingkat resolusi yang makin rendah pada setiap level dibandingkan dengan level sebelumnya. Dimulai dari resolusi terendah, algoritma ini dapat melacak titik-titik pada beberapa level. Dengan menambah jumlah lapisan piramida, algoritma ini dapat mengakomodasi perpindahan titik yang lebih besar di antara bingkai. *Optical flow* dilacak pada level resolusi terendah hingga mencapai konvergensi. Lokasi titik yang diidentifikasi pada satu level digunakan



Gambar 6. Contoh estimasi *optical flow* untuk pemandangan terbang yang berbeda, (a) pemandangan hutan, (b) pemandangan perkotaan, (c) pemandangan perairan; panah biru mewakili vektor *optical flow*.

sebagai titik referensi untuk level berikutnya. Dengan setiap tahapannya, program ini meningkatkan pelacakan. Algoritma ini mampu menangani perpindahan piksel dalam jumlah besar berkat dekomposisi piramida, yang dapat lebih besar dari ukuran lingkungan sekitarnya.

Penelitian ini menggunakan fungsi estimasi *optical flow* Farneback dari MATLAB. Kinerja algoritma Farneback bergantung pada parameter yang digunakan. Parameter ini meliputi jumlah lapisan piramida (*NumPyramidLevels*), skala penurunan resolusi citra (*PyramidScale*), jumlah iterasi pencarian per level piramida (*NumIterations*), ukuran lingkungan piksel (*NeighborhoodSize*), dan ukuran filter rata-rata (*FilterSize*). Secara heuristik, berdasarkan nilai *default* yang disediakan oleh MATLAB, parameter yang dipilih mencakup *NumPyramidLevels* = 3, *PyramidScale* = 0,5, *NumIterations* = 3, *NeighborhoodSize* = 5, dan *FilterSize* = 60. Semua nilai parameter bawaan digunakan kecuali untuk *FilterSize*, yang ditingkatkan empat kali lipat dari nilai bawaan sebesar 15. Peningkatan ukuran filter meningkatkan ketahanan algoritma terhadap derau citra. Makin besar ukuran filter, makin baik algoritma dalam menangani derau citra dan mendeteksi pergerakan cepat, sehingga lebih tangguh. Dalam penelitian ini, peningkatan ukuran filter diperlukan untuk mengakomodasi *optical flow* yang cepat akibat kecepatan terbang SUAV.

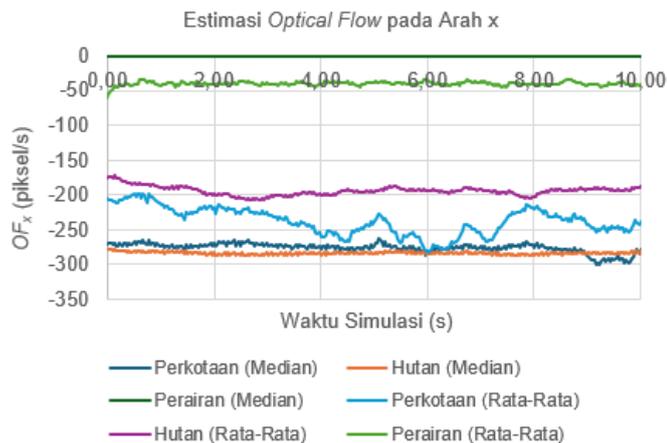
E. ESTIMASI KECEPATAN DAN POSISI

Persamaan (6) digunakan untuk memperkirakan kecepatan SUAV berdasarkan nilai *global optical flow* dalam kondisi penerbangan lurus dan stabil. Dari nilai *global optical flow*, (6) diatur ulang dengan mengganti jarak z suatu titik (z_c) dengan ketinggian (h), sehingga nilai u dan v SUAV dapat diperkirakan.

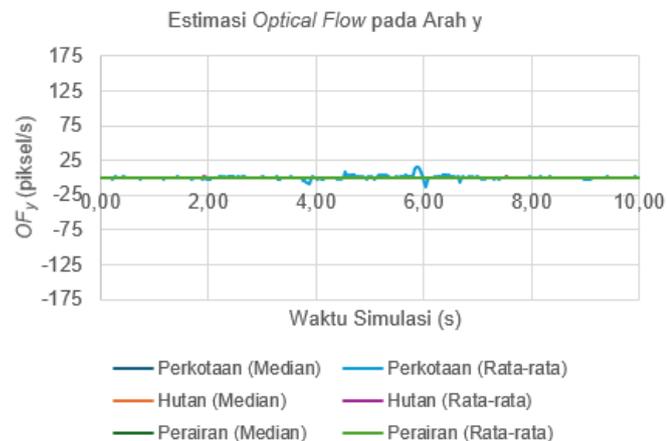
$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{f} \begin{bmatrix} -h & 0 \\ 0 & -h \end{bmatrix} \begin{pmatrix} OF_x \\ OF_y \end{pmatrix} \quad (11)$$

dengan OF_x dan OF_y merupakan *global optical flow* yang diperoleh dari nilai rata-rata atau median medan *optical flow* dalam satuan piksel/s, h dalam m, dan f dalam piksel.

Dalam penelitian ini, hanya kondisi penerbangan lurus dan stabil yang dipertimbangkan. Oleh karena itu, nilai u dan v dapat digunakan untuk memperkirakan komponen kecepatan dalam arah *north* dan *east* pada sumbu NED, sedangkan komponen kecepatan dalam arah bawah diasumsikan nol. Estimasi posisi untuk setiap langkah waktu diperoleh dengan mengintegrasikan (12).



(a)



(b)

Gambar 7. Hasil estimasi optical flow global pada berbagai pemandangan terbang yang berbeda.

$$\begin{pmatrix} V_N \\ V_E \\ V_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{12}$$

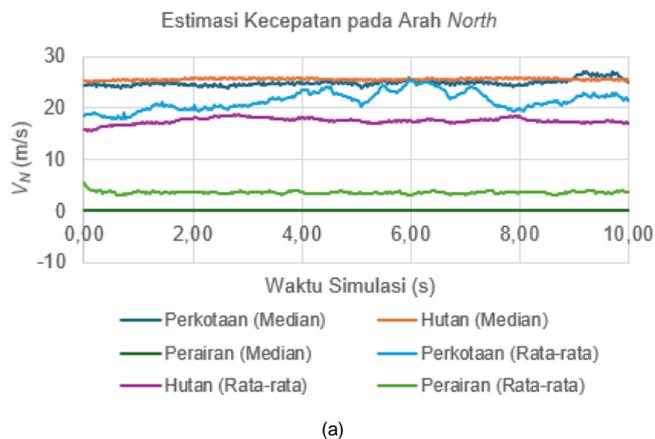
IV. HASIL SIMULASI

Data simulasi referensi (nilai sebenarnya) untuk kecepatan dan posisi SUAV dihasilkan menggunakan (8). Metode estimasi diuji melalui simulasi pada tiga kasus penerbangan lurus stabil yang berbeda, sebagaimana dirinci dalam Tabel I dan Gambar 5.

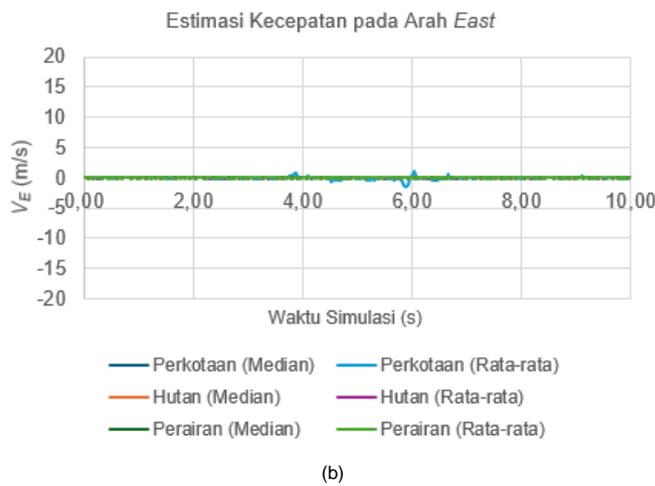
A. PEMANDANGAN PENERBANGAN BERBEDA: HUTAN, PERKOTAAN, DAN SUNGAI

Tiga pemandangan penerbangan yang berbeda digunakan dalam simulasi kasus pertama untuk menunjukkan pengaruh kekayaan tekstur dalam pemandangan penerbangan terhadap akurasi estimasi optical flow. Secara kuantitatif, area dengan sedikit tekstur atau wilayah yang seragam (seperti permukaan air) kekurangan fitur yang diperlukan untuk pelacakan gerakan yang akurat. Setiap pemandangan merepresentasikan tingkat kekayaan tekstur yang berbeda: hutan untuk tekstur yang kaya, perkotaan untuk tekstur sedang, dan sungai untuk tekstur yang rendah. Gambar 6 menunjukkan distribusi optical flow (vektor) dalam setiap bingkai citra saat SUAV bergerak di atas pemandangan tersebut.

Untuk pemandangan hutan, yang ditampilkan dalam Gambar 6(a), optical flow terdistribusi secara merata karena kekayaan tekstur dari pepohonan dalam pemandangan tersebut.



(a)



(b)

Gambar 8. Hasil estimasi kecepatan ke arah north dan ke arah east pada berbagai pemandangan terbang yang berbeda.

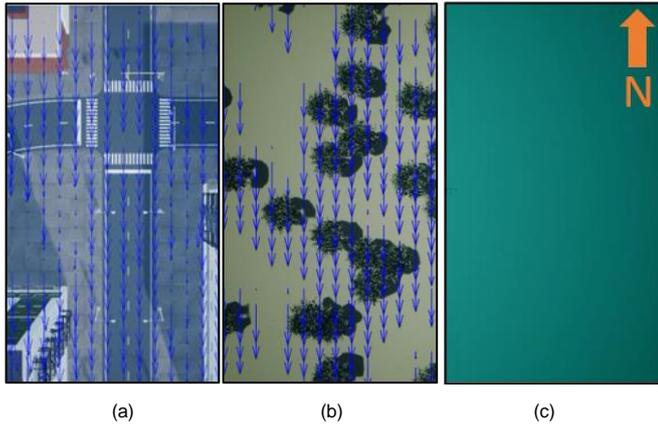
Pada pemandangan perkotaan, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 6(b), distribusi optical flow serupa dengan distribusi dalam pemandangan hutan. Oleh karena itu, nilai rata-rata dan median dari distribusi tersebut harus diamati untuk memastikan hasilnya benar-benar sama atau tidak. Pada pemandangan perairan, yang ditunjukkan dalam Gambar 6(c), optical flow hanya muncul akibat pantulan sinar matahari di permukaan air. Besaran optical flow tersebut lebih kecil dibandingkan dengan optical flow pada pemandangan hutan dan perkotaan.

Gambar 7 menunjukkan riwayat waktu dari nilai rata-rata dan median optical flow untuk setiap pemandangan penerbangan. Seperti yang terlihat dalam Gambar 7, nilai referensi (sebenarnya) untuk OFx dan OFy ditampilkan dengan garis hitam. Nilai yang paling mendekati nilai referensi adalah median optical flow pada pemandangan hutan dan perkotaan, yang ditunjukkan dengan garis merah solid dan garis hijau solid. Median optical flow pada pemandangan perairan untuk OFx bernilai nol karena tekstur citra yang buruk, meskipun terdapat pantulan sinar matahari dalam citra. Nilai rata-rata OFx untuk semua pemandangan tidak merepresentasikan pergerakan SUAV dengan benar karena distribusi optical flow tidak seragam. Selain itu, distribusi tersebut mengandung derau yang menggeser nilai rata-rata dari nilai sebenarnya. Oleh karena itu, dalam kasus ini, nilai median dapat memperkirakan nilai sebenarnya dengan lebih baik dibandingkan nilai rata-rata.

Gambar 8 menunjukkan riwayat waktu dari nilai estimasi kecepatan SUAV pada sumbu NED. Sebagaimana dimodelkan dalam (9), nilai komponen kecepatan pada sumbu utama dan sumbu NED identik selama penerbangan lurus stabil yang dianalisis dalam penelitian ini. Nilai komponen kecepatan pada

TABEL II
ESTIMASI KECEPATAN 2D PADA BERBAGAI PEMANDANGAN TERBANG

Pemandangan (Metode)	Rata-Rata Galat $V_N - V_E$ (m/s)	Simpangan Baku Galat $V_N - V_E$ (m/s)
Hutan (median)	[0,6; 0]	[0,2; 0]
Hutan (rata-rata)	[-7,3; 0]	[0,8; 0]
Perkotaan (median)	[-0,3; 0]	[0,4; 0]
Perkotaan (rata-rata)	[-4,2; 0]	[1,7; 0,1]
Perairan (median)	[-25; 0]	[0; 0]
Perairan (rata-rata)	[-21,5; 0]	[0,2; 0]



Gambar 9. Contoh bidang *optical flow* untuk sudut kemiringan kamera yang berbeda, (a) 10 derajat, (b) 20 derajat, (c) 30 derajat. Panah biru mewakili vektor *optical flow*.

sumbu x dan y diperoleh langsung dari hasil perkalian *optical flow* dengan konstanta $(-h/f)$. Seperti yang terlihat dalam Gambar 8, estimasi kecepatan yang diperoleh dari median *optical flow* pada pemandangan hutan dan perkotaan mendekati nilai sebenarnya, terutama untuk V_N .

Tabel II menunjukkan rata-rata dan simpangan baku dari kesalahan estimasi kecepatan (V_N dan V_E) untuk setiap pemandangan dan metode perhitungan *global optical flow*. Estimasi kecepatan dikurangi dengan nilai sebenarnya, yaitu 25 m/s untuk V_N dan 0 m/s untuk V_E , guna menghitung kesalahan estimasi kecepatan. Hasil estimasi kecepatan pada pemandangan hutan (median) dan perkotaan (median) menunjukkan bahwa nilai median *optical flow* menghasilkan estimasi terbaik dengan kesalahan rata-rata minimum (Tabel II). Oleh karena itu, median *optical flow* pada pemandangan dengan tekstur sedang dan kaya lebih baik digunakan untuk memperkirakan kecepatan kendaraan dalam kondisi penerbangan lurus stabil dibandingkan dengan nilai rata-ratanya. Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya [24], yang menunjukkan bahwa *global optical flow* dapat diperoleh dari nilai median medan *optical flow*.

Seperti yang juga terlihat dalam Tabel II, simpangan baku metode rata-rata dalam estimasi *global optical flow* lebih tinggi dibandingkan metode median. Hal ini terjadi karena metode rata-rata lebih sensitif terhadap derau dalam citra. Untuk pemandangan perairan, metode estimasi *optical flow* tidak dapat mendeteksi gerakan relatif antara SUAV dan pemandangan. Kesalahan estimasi kecepatan pada pemandangan perairan mencapai 21,5 m/s (metode rata-rata) dan 25 m/s (metode median). Metode rata-rata menghasilkan kesalahan yang lebih kecil karena lebih sensitif terhadap derau. Derau ini muncul akibat pantulan cahaya di permukaan air,

TABEL III
ESTIMASI KECEPATAN 2D DENGAN BERBAGAI SUDUT KEMIRINGAN KAMERA

Sudut Kemiringan Kamera (derajat)	Rata-Rata Galat $V_N - V_E$ (m/s)	Simpangan Baku Galat $V_N - V_E$ (m/s)
0	[0,6; 0]	[0,2; 0]
-10	[-1,9; 0]	[0,2; 0]
-20	[-5,5; 0]	[0,3; 0]
-30	[-9,2; 0]	[0,4; 0]
10	[-1,7; 0]	[0,2; 0]
20	[-5,2; 0]	[0,2; 0]
30	[-8,9; 0]	[0,3; 0]

TABEL IV
ESTIMASI KECEPATAN 2D PADA BERBAGAI PERBEDAAN TINGGI TERBANG

Perbedaan Tinggi Terbang (m)	Rata-Rata Galat $V_N - V_E$ (m/s)	Simpangan Baku Galat $V_N - V_E$ (m/s)
0	[0,6; 0]	[0,2; 0]
-10	[4,3; 0]	[0,2; 0]
-20	[8,2; 0]	[0,3; 0]
-30	[13,1; 0]	[0,6; 0]
10	[-1,9; 0]	[0,1; 0]
20	[-3,8; 0]	[0,1; 0]
30	[-5,4; 0]	[0,1; 0]

yang dapat terdeteksi oleh metode estimasi *optical flow* saat SUAV terbang di atas perairan.

B. PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN KAMERA

Tiga variasi sudut kemiringan kamera positif (-10° , -20° , dan -30°) dan tiga variasi sudut kemiringan kamera negatif (10° , 20° , dan 30°) digunakan untuk mengamati pengaruh sudut kemiringan kamera. Dalam pengamatan ini, nilai median *optical flow* digunakan untuk estimasi kecepatan, sebagaimana ditunjukkan dalam Subbagian IV.A, karena median merupakan estimasi yang lebih baik untuk nilai *global optical flow* dalam penerbangan lurus stabil. Gambar 9 menunjukkan contoh distribusi *optical flow* dalam medan *optical flow* untuk tiga sudut kemiringan kamera yang berbeda, yaitu 10° , 20° , dan 30° . Berdasarkan Gambar 9, distorsi distribusi *optical flow* makin besar seiring meningkatnya sudut kemiringan kamera. Oleh karena itu, distorsi medan *optical flow* dapat berkontribusi terhadap kesalahan estimasi. Distorsi pada medan *optical flow* menyebabkan penurunan OF_x dan peningkatan nilai OF_y , seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan kamera. Secara keseluruhan, besaran *optical flow* dalam arah x berkurang, sedangkan dalam arah y meningkat, seiring dengan bertambahnya jarak antara objek dalam pemandangan dan kamera. Dalam pengukuran aktual, penurunan besaran *optical flow* dapat dianggap sebagai bias dari nilai sebenarnya.

Tabel III menunjukkan rata-rata dan simpangan baku dari kesalahan estimasi kecepatan (V_N dan V_E) untuk setiap variasi sudut kemiringan kamera. Sejalan dengan penurunan nilai median *optical flow* pada sumbu x akibat peningkatan sudut kemiringan kamera, estimasi kecepatan juga mengalami penurunan. Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel III, pada sudut kemiringan kamera 30° (positif atau negatif), estimasi kecepatan pada sumbu *north* telah berkurang lebih dari 8 m/s. Oleh karena itu, dalam jangka waktu yang lama, bias akibat sudut kemiringan kamera harus dikoreksi untuk memperoleh estimasi kecepatan dan posisi yang akurat.

C. PENGARUH KETINGGIAN

Pengaruh ketinggian diamati melalui beberapa simulasi tambahan dengan sedikit mengubah ketinggian SUAV dalam skenario pemandangan hutan. Enam variasi selisih ketinggian (Δh) digunakan, yaitu -30 m, -20 m, -10 m, 10 m, 20 m, dan 30 m. Ketinggian positif menunjukkan elevasi di atas ketinggian referensi ($h = 100$ m), sedangkan ketinggian negatif berarti lebih rendah dari 100 m. Dalam pengamatan ini, nilai median *optical flow* digunakan untuk estimasi kecepatan, sebagaimana dalam Subbagian IV.B.

Tabel IV menunjukkan rata-rata dan standar deviasi kesalahan estimasi kecepatan (V_N dan V_E) untuk setiap variasi selisih ketinggian. Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel IV, ketika Δh (Δh positif) meningkat, nilai V_N menurun (V_N negatif). Sebaliknya, ketika Δh menurun (Δh negatif), nilai V_N meningkat (V_N positif). Tren ini sesuai dengan ekspektasi, mengingat estimasi kecepatan dihitung dari nilai *optical flow*, yang meningkat ketika kamera lebih dekat ke tanah dan menurun ketika kamera lebih jauh dari tanah.

Seperti yang terlihat pada Tabel IV, makin besar perbedaan ketinggian (Δh), makin tinggi pula kesalahan estimasi. Rata-rata kesalahan dalam estimasi kecepatan meningkat secara signifikan dibandingkan dengan standar deviasi kesalahan. Peningkatan rata-rata kesalahan ini menunjukkan bahwa karakteristik kesalahan akibat perbedaan ketinggian dapat dikategorikan sebagai bias atau kesalahan sistematis. Oleh karena itu, efek perbedaan ketinggian harus diperhitungkan dengan melakukan koreksi terhadap kecepatan estimasi guna menghindari penurunan akurasi, sesuai dengan (9) yang menghubungkan *optical flow* dengan estimasi kecepatan.

V. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *optical flow* dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan planar (2D) dalam pemandangan penerbangan dengan tekstur yang cukup, seperti saat SUAV terbang di atas perkotaan atau hutan. Estimasi *optical flow* menggunakan metode Farneback terbukti dapat menentukan kecepatan penerbangan SUAV dalam penerbangan lurus stabil pada ketinggian 100 m dan kecepatan 25 m/s. Kalibrasi terhadap pengaruh tekstur, sudut kamera, dan ketinggian sangat penting untuk menghindari bias estimasi yang dapat terakumulasi menjadi kesalahan posisi.

Penelitian selanjutnya akan mengeksplorasi kinerja *optical flow* dalam berbagai lintasan penerbangan serta menguji metode estimasi kecepatan penerbangan dalam pemandangan penerbangan nyata. Selain itu, integrasi *optical flow* dengan sensor lain, seperti IMU dan GNSS, dalam skenario penerbangan yang berbeda dapat dieksplorasi untuk mengembangkan sistem navigasi SUAV yang optimal. Waktu komputasi dari berbagai algoritma *optical flow* dan pengaturan yang berbeda juga dapat dipertimbangkan untuk aplikasi nyata dalam operasional SUAV.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian yang berjudul “Kinerja *Optical Flow* dalam Estimasi Kecepatan Terbang SUAV Menggunakan Metode Farneback” terbebas dari konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Aziz Fathurrahman, Yazdi Ibrahim Jenie, dan Ony Arifianto; metodologi, Aziz Fathurrahman; perangkat lunak, Aziz Fathurrahman; validasi, Aziz Fathurrahman;

analisis formal, Aziz Fathurrahman; investigasi, Aziz Fathurrahman; penulisan—penyiapan draf awal, Aziz Fathurrahman; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Aziz Fathurrahman; visualisasi, Aziz Fathurrahman; pengawasan, Yazdi Ibrahim Jenie, Ony Arifianto, dan Hari Muhammad.

REFERENSI

- [1] H. Huang dan A.V Savkin, “Aerial surveillance in cities: When UAVs take public transportation vehicles,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 20, no. 2, hal. 1069–1080, Apr. 2023, doi: 10.1109/TASE.2022.3182057.
- [2] R. Kellermann, T. Biehle, dan L. Fischer, “Drones for parcel and passenger transportation: A literature review,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 4, hal. 1–13, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.trip.2019.100088.
- [3] I. Bisio dkk., “A systematic review of drone based road traffic monitoring system,” *IEEE Access*, vol. 10, hal. 101537–101555, Sep. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207282.
- [4] M. Lyu, Y. Zhao, C. Huang, dan H. Huang, “Unmanned aerial vehicles for search and rescue: A survey,” *Remote Sens.*, vol. 16, no. 13, hal. 1–35, Jul. 2023, doi: 10.3390/rs15133266.
- [5] D.C. Tsouros, S. Bibi, dan P.G. Sarigiannidis, “A review on UAV-based applications for precision agriculture,” *Information*, vol. 10, no. 11, hal. 1–26, Nov. 2019, doi: 10.3390/info10110349.
- [6] G. Pajares, “Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs),” *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 81, no. 4, hal. 281–329, Apr. 2015, doi: 10.14358/PERS.81.4.281.
- [7] T. Elmokadem dan A.V. Savkin, “Towards fully autonomous UAVs: A survey,” *Sensors*, vol. 21, no. 18, hal. 1–39, Sep. 2021, doi: 10.3390/s21186223.
- [8] Y. Lu, Z. Xue, G.-S. Xia, dan L. Zhang, “A survey on vision-based UAV navigation,” *Geo-spat. Inf. Sci.*, vol. 21, no. 1, hal. 21–32, Jan. 2018, doi: 10.1080/10095020.2017.1420509.
- [9] X. Ye, F. Song, Z. Zhang, dan Q. Zeng, “A review of small UAV navigation system based on multisource sensor fusion,” *IEEE Sens. J.*, vol. 23, no. 17, hal. 18926–18948, Sep. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3292427.
- [10] D.J. Yeong, G. Velasco-Hernandez, J. Barry, dan J. Walsh, “Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, hal. 1–37, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21062140.
- [11] Q. Zhang, X. Niu, dan C. Shi, “Impact assessment of various IMU error sources on the relative accuracy of the GNSS/INS systems,” *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 9, hal. 5026–5038, Mei 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2966379.
- [12] P. Papadimitratos dan A. Jovanovic, “Protection and fundamental vulnerability of GNSS,” dalam *2008 IEEE Int. Workshop Satell. Space Commun.*, 2008, hal. 167–171, doi: 10.1109/IWSSC.2008.4656777.
- [13] H. Chao, Y. Gu, dan M. Napolitano, “A survey of optical flow techniques for robotics navigation applications,” *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 73, hal. 361–372, Jan. 2014, doi: 10.1007/s10846-013-9923-6.
- [14] E.S. Calverts, “Visual approach and landing aids for aircraft. Fundamental problems analysed by means of perspective diagrams,” *R. Aircr. Establ.*, Farnborough, Inggris, Report No. EL 1414, 1947.
- [15] J.J. Gibson, P. Olum, dan F. Rosenblatt, “Parallax and perspective during aircraft landings,” *Am. J. Psychol.*, vol. 68, no. 3, hal. 372–385, Sep. 1955, doi: 10.2307/1418521.
- [16] D.C. Niehorster, “Optic flow: A history,” *i-Perception*, vol. 12, no. 6, hal. 1–49, Nov. 2021, doi: 10.1177/20416695211055766.
- [17] H.W. Ho, G. CHE de Croon, dan Q. Chu, “Distance and velocity estimation using optical flow from a monocular camera,” *Int. J. Micro Air Veh.*, vol. 9, no. 3, hal. 198–208, Sep. 2017, doi: 10.1177/1756829317695566.
- [18] K. McGuire dkk., “Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, no. 2, hal. 1070–1076, Apr. 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2658940.
- [19] S.C. Diamantas dan P. Dasgupta, “An active vision approach to height estimation with optical flow,” dalam *Advances in Visual Computing – ISVC 2013*, 2013, hal. 160–170.
- [20] O. Araar dan N. Aouf, “A new hybrid approach for the visual servoing of VTOL UAVs from unknown geometries,” dalam *22nd Mediterr. Conf. Control Autom.*, 2014, hal. 1425–1432, doi: 10.1109/MED.2014.6961576.

-
- [21] N.A. Nemade dan V.V Gohokar, "Comparative performance analysis of optical flow algorithms for anomaly detection," dalam *Proc. Int. Conf. Commun. Inf. Process. (ICCIP) 2019*, 2019, hal. 1–12.
- [22] J.L. Barron, D.J. Fleet, dan S.S. Beauchemin, "Performance of optical flow techniques," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 12, no. 1, hal. 43–77, Feb. 1994, doi: 10.1007/BF01420984.
- [23] I. Fantoni dan G. Sanahuja, "Optic flow-based control and navigation of mini aerial vehicle," *Aerosp. Lab*, vol. 8, hal. 1–9, Des. 2014, doi: 10.12762/2014.AL08-03.
- [24] H. Deng dkk., "Global optical flow-based estimation of velocity for multicopters using monocular vision in GPS-denied environments," *Optik*, vol. 219, hal. 1–14, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2020.164923.