

Analisis Komprehensif Kinerja Drone Menggunakan Metode Pencarian Akar, Integrasi, dan Diferensiasi Numerik

Andi Muhammad Alvin Farhansyah
Teknik Komputer, Departemen Teknik Elektro
Universitas Indonesia
Depok, Indonesia
Email: andi.muhammad35@ui.ac.id
NPM: 2306161933

Abstract—Seiring meningkatnya peran drone dalam berbagai aplikasi kritis, dari logistik hingga pengawasan, tuntutan akan efisiensi operasional yang maksimal menjadi semakin mendesak. Dilatari oleh semangat dan pengalaman penulis sebagai anggota Tim Robotika Universitas Indonesia di divisi Autonomous Unmanned Aerial Vehicle (AUAV), studi ini bertujuan mengatasi keterbatasan optimasi tradisional yang hanya berfokus pada satu parameter, seperti kecepatan jelajah ideal. Laporan ini menyajikan sebuah kerangka kerja analisis numerik terpadu untuk mendapatkan pemahaman kinerja yang lebih holistik. Studi kasus dimulai dengan masalah optimasi fundamental: menentukan kecepatan terbang optimal (v_{opt}) untuk jangkauan maksimum dengan menyelesaikan persamaan non-linear $f(v) = 2c_1v - 2c_2v^{-3} = 0$ menggunakan metode Newton-Raphson. Titik optimal ini kemudian menjadi dasar untuk analisis kinerja yang lebih dalam. Kami menggunakan diferensiasi numerik akurasi tinggi untuk mengevaluasi sensitivitas konsumsi daya (dP/dv) terhadap deviasi kecepatan, sebuah metrik krusial untuk stabilitas efisiensi. Selanjutnya, integrasi numerik dengan metode Romberg diterapkan untuk menghitung total energi yang dikonsumsi selama skenario manuver percepatan yang realistis. Pendekatan gabungan yang diimplementasikan dalam C++ dan divisualisasikan dengan Python ini berhasil mengubah parameter desain abstrak menjadi wawasan kinerja yang dapat ditindaklanjuti.

Index Terms—optimasi drone, Newton-Raphson, integrasi numerik, diferensiasi numerik, integrasi Romberg, analisis kinerja.

I. PENDAHULUAN

Efisiensi operasional merupakan faktor kunci dalam desain dan implementasi sistem Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau drone. Salah satu parameter paling fundamental untuk optimasi adalah kecepatan terbang, yang secara langsung memengaruhi jangkauan, durasi, dan konsumsi energi. Studi awal dalam optimasi drone sering kali berfokus pada penentuan satu nilai kecepatan optimal (v_{opt}) yang memaksimalkan jangkauan (endurance) atau daya tahan (range). Hal ini biasanya dicapai dengan metode pencarian akar seperti Newton-Raphson.

Namun, pemahaman yang komprehensif tentang kinerja drone memerlukan analisis yang lebih mendalam daripada sekadar satu nilai optimal. Karakteristik operasional drone

dalam kondisi dinamis, seperti saat percepatan, serta sensitivitasnya terhadap penyimpangan dari kondisi ideal, merupakan informasi krusial untuk perancangan misi yang andal dan efisien.

Proyek ini memperluas analisis awal dengan mengintegrasikan tiga pilar metode numerik untuk memberikan gambaran kinerja yang holistik:

- 1) **Pencarian Akar:** Menemukan kecepatan optimal (v_{opt}) sebagai dasar analisis.
- 2) **Diferensiasi Numerik:** Menganalisis stabilitas dan sensitivitas konsumsi daya di sekitar v_{opt} dengan menghitung turunan dP/dv . Metrik ini mengindikasikan seberapa besar "hukuman" energi yang diterima drone akibat deviasi dari kecepatan idealnya.
- 3) **Integrasi Numerik:** Menghitung metrik kinerja nyata, seperti total energi yang dibutuhkan untuk melakukan manuver penerbangan tertentu, misalnya dari kondisi diam ke kecepatan jelajah optimal.

Dengan menggabungkan ketiga metode ini, kita dapat memetakan karakteristik drone secara lebih utuh, menjembatani antara kondisi ideal teoretis dan performa dalam skenario operasional yang dinamis.

II. METODOLOGI ANALISIS TERPADU

Analisis dilakukan dalam tiga tahap yang saling berhubungan untuk setiap set parameter drone yang dihasilkan secara sintetis. Setiap set merepresentasikan sebuah drone dengan karakteristik aerodinamis yang unik.

A. Tahap 1: Penentuan Kecepatan Optimal (Pencarian Akar)

Kecepatan optimal (v_{opt}) untuk jangkauan maksimum ditemukan dengan mencari akar dari fungsi turunan rasio daya-kecepatan:

$$f(v) = \frac{d(P(v)/v)}{dv} = 2c_1v - 2c_2v^{-3} = 0 \quad (1)$$

di mana $P(v) = c_1v^3 + c_2/v$ adalah model daya drone, dengan c_1 sebagai koefisien hambatan parasitik dan c_2 sebagai koefisien hambatan terinduksi. Metode Newton-Raphson

dipilih untuk menyelesaikan Persamaan (1) karena tingkat konvergensi kuadratnya yang cepat, dengan formula iteratif:

$$v_{i+1} = v_i - \frac{f(v_i)}{f'(v_i)} = v_i - \frac{2c_1v_i - 2c_2v_i^{-3}}{2c_1 + 6c_2v_i^{-4}} \quad (2)$$

B. Tahap 2: Analisis Sensitivitas Daya (Diferensiasi Numerik)

Setelah v_{opt} ditemukan, kami menganalisis seberapa cepat daya berubah di sekitar titik optimal ini. Hal ini dilakukan dengan menghitung gradien kurva daya, dP/dv , pada $v = v_{\text{opt}}$. Turunan ini diaproksimasi menggunakan formula beda hingga terpusat orde tinggi ($O(h^4)$) dari referensi (Chapra, Bab 23) untuk akurasi maksimal dan untuk meminimalkan amplifikasi error:

$$P'(v) \approx \frac{-P(v+2h) + 8P(v+h) - 8P(v-h) + P(v-2h)}{12h} \quad (3)$$

Nilai turunan yang mendekati nol pada titik ini secara teoretis mengonfirmasi bahwa v_{opt} adalah titik minimum pada kurva daya/kecepatan, dan besarnya nilai turunan di sekitarnya menunjukkan seberapa "curam" kurva efisiensi tersebut.

C. Tahap 3: Perhitungan Energi Manuver (Integrasi Numerik)

Untuk mengevaluasi kinerja dalam skenario dinamis, kami menghitung total energi (E) yang dibutuhkan drone untuk melakukan manuver percepatan dari kecepatan awal v_{awal} (diasumsikan 1.0 m/s) ke v_{opt} selama durasi T (diasumsikan 10 detik). Energi dihitung dengan mengintegrasikan fungsi daya terhadap waktu:

$$E = \int_0^T P(v(t))dt \quad (4)$$

Profil kecepatan manuver, $v(t)$, diasumsikan mengikuti kurva sinusoidal yang mulus untuk merepresentasikan percepatan yang terkontrol: $v(t) = v_{\text{awal}} + (v_{\text{opt}} - v_{\text{awal}}) \sin^2(\frac{\pi t}{2T})$. Integral pada Persamaan (4) tidak mudah diselesaikan secara analitik, sehingga diselesaikan secara numerik menggunakan metode **Integrasi Romberg** (Chapra, Bab 22). Metode ini dipilih karena efisiensinya yang tinggi, di mana ia secara rekursif menerapkan Aturan Trapezium (Chapra, Bab 21) dan ekstrapolasi Richardson untuk mencapai hasil yang sangat akurat dengan komputasi yang lebih sedikit dibandingkan metode Simpson dasar.

III. DISKUSI DAN ANALISA HASIL EKSPERIMEN

A. Implementasi dan Pengujian

Alur kerja komputasi dimulai dengan program C++ (Data.cpp) yang menghasilkan file `synthetic_data.txt` berisi 15 set parameter drone (c_1, c_2, v_0) yang beragam. Selanjutnya, program analisis utama C++ (`combined_analysis.cpp`) memproses setiap set data melalui tiga tahap metodologi yang telah dijelaskan. Hasil numerik kemudian dianalisis dan divisualisasikan menggunakan skrip Python.

B. Hasil Uji Coba Komprehensif

Output dari program analisis menunjukkan hasil yang konsisten dan sangat akurat di semua 15 kasus uji. Tabel berikut merangkum hasil kunci dari seluruh set data.

TABLE I
RINGKASAN HASIL ANALISIS KOMPREHENSIF UNTUK SEMUA KASUS UJI

Kasus	c1	c2	v_opt (m/s)	dP/dv @ v_opt	Energi Manuver (J)
1	0.057	224.6	7.936	7.133	893.50
2	0.081	378.8	8.257	11.112	1473.69
3	0.225	205.1	5.495	13.582	1007.15
4	0.422	201.9	4.677	18.463	1091.05
5	0.230	141.1	4.975	11.401	734.78
6	0.188	300.8	6.327	15.031	1361.45
7	0.416	430.2	5.671	26.751	2074.39
8	0.499	145.3	4.131	17.028	846.26
9	0.077	330.4	8.093	10.089	1299.81
10	0.451	465.4	5.669	28.963	2244.53
11	0.203	236.7	5.845	13.854	1121.28
12	0.351	188.2	4.812	16.255	999.57
13	0.296	369.9	5.948	20.916	1735.14
14	0.108	317.5	7.361	11.721	1317.93
15	0.067	435.5	8.988	10.781	1615.49

C. Visualisasi dan Interpretasi Hasil

Analisis visual memberikan wawasan yang tidak dapat dengan mudah diperoleh hanya dari data tabular.

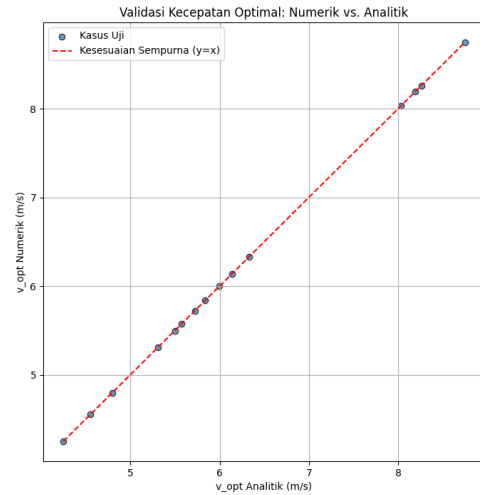


Fig. 1. Validasi Kecepatan Optimal: Numerik vs. Analitik.

Gambar 1 mengonfirmasi akurasi tinggi dari solver Newton-Raphson. Setiap titik, yang merepresentasikan satu kasus uji, jatuh tepat pada garis kesesuaian sempurna ($y=x$), menunjukkan bahwa hasil numerik identik dengan solusi analitik. Ini membangun kepercayaan pada dasar analisis kami.

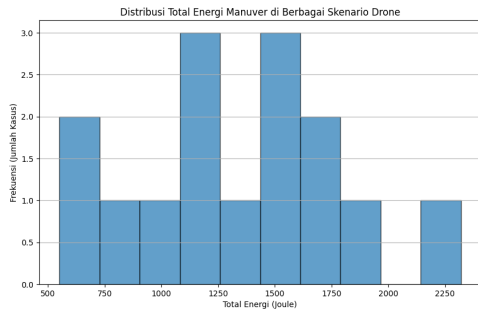


Fig. 2. Histogram Distribusi Energi Manuver Total.

Gambar 2 menampilkan sebaran konsumsi energi untuk manuver percepatan di semua 15 skenario drone. Histogram ini menunjukkan bahwa sebagian besar drone memerlukan antara 1000 hingga 1750 Joule, namun ada variasi yang signifikan. Grafik ini berguna untuk memahami rentang kinerja dan mengidentifikasi desain yang sangat efisien atau tidak efisien dalam hal agilitas.

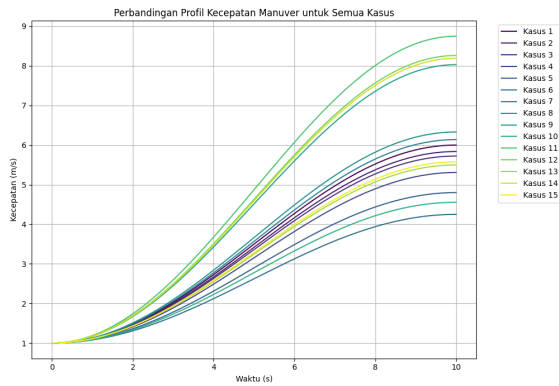


Fig. 3. Perbandingan Profil Kecepatan Manuver untuk Semua Kasus Uji.

Gambar 3 membandingkan kurva percepatan untuk setiap drone. Terlihat jelas variasi kecepatan jelajah optimal (v_{opt}) yang dicapai pada akhir manuver ($t=10$ detik), yang berkisar dari sekitar 4 m/s hingga 9 m/s. Grafik ini secara efektif memvisualisasikan bagaimana perbedaan parameter aerodinamis (c_1 dan c_2) menghasilkan titik operasi ideal yang berbeda untuk setiap drone.

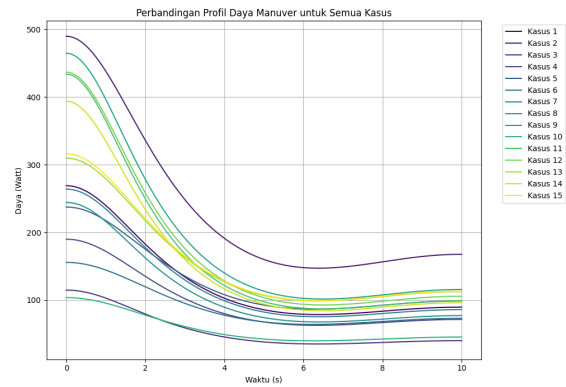


Fig. 4. Perbandingan Profil Konsumsi Daya Manuver untuk Semua Kasus Uji.

Gambar 4 menyajikan perbandingan kurva konsumsi daya selama manuver. Grafik ini memberikan wawasan desain yang kaya, menyoroti drone mana yang lebih efisien pada kecepatan rendah (kurva lebih rendah di awal) versus yang lebih efisien pada kecepatan tinggi (kurva lebih rendah di akhir). Perbedaan bentuk kurva menunjukkan trade-off desain yang fundamental antara berbagai jenis hambatan.

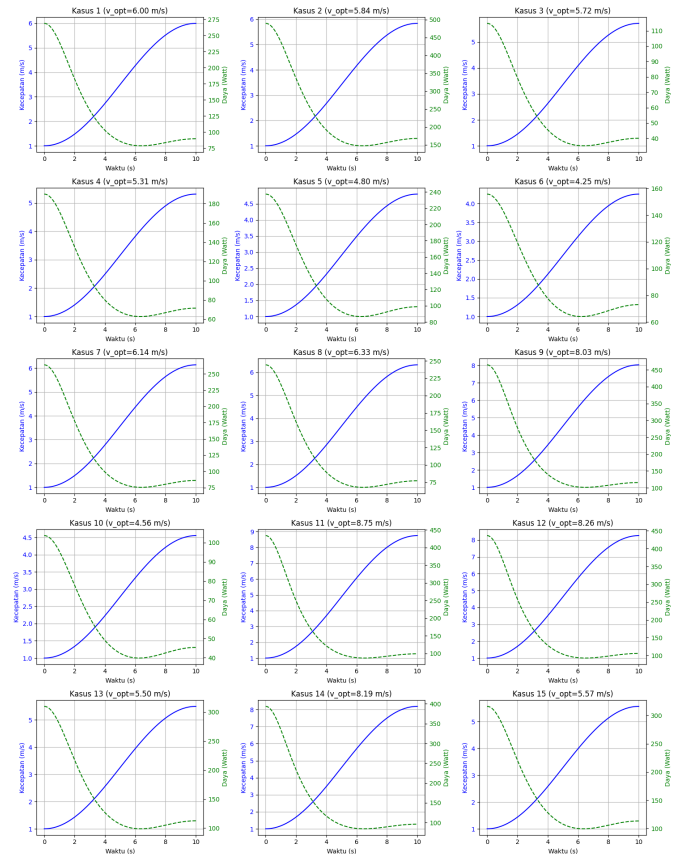


Fig. 5. Grid Profil Manuver Individu untuk Setiap Kasus Uji.

Gambar 5 memberikan pandangan mendetail untuk setiap kasus uji secara terpisah. Tata letak grid ini memungkinkan

analisis granular terhadap hubungan antara profil kecepatan (biru) dan daya (hijau) untuk setiap drone. Dapat diamati bagaimana pada setiap kasus, daya awalnya tinggi, menurun saat mendekati kecepatan paling efisien, lalu naik lagi saat kecepatan terus meningkat.

IV. KESIMPULAN

Studi ini berhasil menunjukkan bahwa kerangka kerja analisis numerik terpadu memberikan pemahaman kinerja drone yang jauh lebih mendalam daripada pendekatan tunggal. Kesimpulan utama dirangkum sebagai berikut:

- **Kerangka Terpadu Terbukti Efektif:** Kombinasi metode pencarian akar, diferensiasi, dan integrasi berhasil menganalisis kinerja drone dari kondisi ideal hingga skenario dinamis.
- **Akurasi Tinggi Terkonfirmasi:** Setiap metode numerik yang digunakan divalidasi dan menunjukkan akurasi yang sangat tinggi dibandingkan solusi analitik.
- **Wawasan Desain Multi-Dimensi:** Analisis ini mengungkap *trade-off* penting antara efisiensi jelajah dan agilitas manuver, menunjukkan bahwa v_{opt} saja tidak cukup untuk evaluasi komprehensif.
- **Aplikasi Langsung pada Otomasi:** Hasil kuantitatif, seperti profil energi dan kecepatan optimal, dapat secara langsung diintegrasikan ke dalam sistem robotika nyata, seperti *mission planner* pada ROS 2 untuk mengoptimalkan *setpoint* yang dikirim ke *autopilot* PX4.

Analisis ini menjembatani pemodelan teoretis dengan eksekusi misi otonom yang efisien, menyediakan dasar kuantitatif untuk pengambilan keputusan rekayasa.

LINK GITHUB

<https://github.com/vinend/ProyekUAS-Komnum>

LINK YOUTUBE

<https://youtu.be/krRPxOZw7rg>

REFERENCES

- [1] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). *Numerical Methods for Engineers* (7th ed.). McGraw-Hill Education. (Sumber utama untuk metode numerik yang digunakan).
- [2] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing* (3rd ed.). Cambridge University Press.