

Autopilot Pesawat Tanpa Awak Menggunakan Algoritme Genetika untuk Menghilangkan *Blank Spot*

Ronny Mardiyanto¹, Muhammad Ichlasul Salik², Djoko Purwanto³

Intisari—Makalah ini menjelaskan pengembangan *autopilot* pada sistem pesawat tanpa awak yang mampu meminimalkan *blank spot* pada hasil pemetaan udara menggunakan algoritme genetika. Tujuan dari *autopilot* yang dikembangkan adalah mempercepat waktu yang dibutuhkan untuk melakukan pemetaan udara dan menghemat konsumsi baterai. Waktu yang lebih cepat dalam melakukan pemetaan udara akan menghemat biaya operasional dan penghematan konsumsi baterai akan menekan biaya perawatan UAV. *Autopilot* yang dikembangkan memiliki kemampuan analisis *blank spot* hasil pemotretan udara dan melakukan optimasi rute terbang untuk melakukan pemotretan ulang. Rute penerbangan sistem pesawat tanpa awak pada saat pemotretan ulang ditentukan dengan menerapkan algoritme genetika untuk mendapatkan jarak terpendek. Hal ini dilakukan untuk menghemat konsumsi baterai dan waktu terbang. Cara kerja *autopilot* yang dikembangkan adalah rute penerbangan diatur secara manual oleh operator, kemudian pesawat akan terbang sesuai rute tersebut. Faktor ketidakstabilan angin akan menyebabkan pergeseran rute penerbangan dan hal ini menyebabkan terjadinya *blank spot*. Setelah seluruh rute penerbangan dilalui, sistem yang dikembangkan akan menganalisis lokasi *blank spot* tersebut. Rute penerbangan baru dihitung menggunakan algoritme genetika untuk menentukan jarak terpendek dari semua lokasi *blank spot* tersebut. Sistem yang dikembangkan terdiri atas *unmanned aerial vehicle* (UAV) yang dilengkapi *autopilot* dan *ground control station* (GCS). Pada saat terbang, UAV akan mengirim koordinat rute yang dilalui ke GCS untuk perhitungan analisis *blank spot*. Setelah misi penerbangan selesai, GCS akan membuat rute baru dan dikirimkan ke UAV. Pengujian yang dilakukan adalah pesawat terbang dengan ketinggian 120 m dengan menggunakan baterai Lipo 4S 4.200 mAh 25C dan persentase *throttle* saat terbang lurus adalah 30%. Hasil yang didapatkan adalah *autopilot* yang dikembangkan menghemat waktu 46,4% dan menghemat kapasitas baterai 41,18% jika dibandingkan dengan *autopilot* konvensional.

Kata Kunci—*Autopilot*, Pemetaan Udara, *Blank Spot*, Algoritme Genetika, Optimasi, Waktu, Jarak.

I. PENDAHULUAN

Pada saat ini, teknologi *unmanned aerial vehicle* (UAV) berkembang sangat pesat dan sudah digunakan di berbagai bidang. Teknologi UAV membuat pekerjaan yang sebelumnya sulit dilakukan menjadi mudah, misalnya dalam inspeksi saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Teknologi UAV

juga memungkinkan operator untuk mengendalikannya secara jarak jauh sehingga dapat digunakan untuk fungsi pemantauan atau pemotretan udara. Kelebihan penggunaan UAV adalah meningkatnya hasil pendapatan (karena adanya penekanan biaya operasional) dan menekan risiko kecelakaan.

UAV yang dibahas pada makalah ini adalah UAV pemotretan udara untuk menghasilkan peta (fotogrametri). Sebelum adanya teknologi UAV, pemotretan udara dilakukan dengan menyewa pesawat penumpang dan pemotretan dilakukan secara manual. Dengan adanya teknologi UAV ini, pemotretan udara dilakukan dengan menempatkan kamera resolusi tinggi di sebuah UAV. Pemanfaatan UAV untuk pemotretan udara memberikan keuntungan karena membutuhkan biaya yang jauh sedikit dibandingkan dengan menyewa pesawat penumpang. Selain itu, waktu eksekusi misi juga lebih efektif dan efisien digunakan. Penggunaan UAV juga memungkinkan dilakukannya pemotretan udara pada wilayah yang kecil. UAV dapat terbang lebih dari 300 meter di atas permukaan laut untuk menghindari adanya gangguan awan [1].

Pada proses pengambilan foto udara, pertama-tama operator mengatur rute terbang UAV sesuai rencana pemetaan yang akan dilakukan. Kemudian, UAV terbang sesuai dengan rute tersebut (*waypoint*) [2]. Namun, faktor gangguan eksternal (misalnya angin) dapat menyebabkan rute terbang UAV bergeser dari rute yang telah direncanakan. Kecepatan angin yang berbeda untuk arah tertentu juga akan memengaruhi rute terbang aktual. Hal ini menyebabkan hasil pemotretan udara menjadi tidak sempurna akibat adanya *blank spot* (daerah yang tidak berhasil dilakukan pemotretan). Pada pemetaan udara dengan UAV, digunakan kamera resolusi tinggi untuk menggantikan kamera khusus pemetaan udara yang mahal [3]. Pemetaan udara menggunakan UAV tipe *fixed-wing* juga sudah dilakukan dan memiliki banyak keuntungan [4]. Produk *autopilot* yang sangat dikenal untuk mengendalikan UAV adalah Pixhawk [5].

Algoritme genetika telah banyak digunakan untuk permasalahan *travel salesman problem* (TSP). Algoritme ini menggunakan konsep utama individu paling unggul akan bertahan dan yang lemah akan punah [6]-[8].

Pada makalah ini, dikembangkan *autopilot* yang mampu melakukan penerbangan ulang dengan rute terbang melewati jalur *blank spot*, dengan optimasi jarak dilakukan menggunakan metode algoritme genetika. Dengan adanya optimasi menggunakan algoritme genetika, jarak tempuh menjadi semakin pendek. Hal ini akan menyebabkan waktu penerbangan dalam pemotretan ulang semakin cepat. Maka, diperoleh keuntungan ekonomi yaitu pemotretan udara akan lebih murah dan cepat karena satu lokasi pemotretan udara cukup dilakukan dengan satu kali penerbangan saja.

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Gedung B, C & AJ Kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Keputih, Kec. Sukolilo, Kota SBY, Jawa Timur 60111 (telp 031-5947302; ¹ronny.mardiyanto@gmail.com, ²muhammadichlasulsalik@gmail.com, ³djoko@ee.its.ac.id)

[Diterima: 23 Desember 2021, Revisi: 11 Januari 2022]

II. PERENCANAAN RUTE TERBANG UAV

Penelitian tentang perencanaan rute untuk UAV telah banyak dilakukan. Pengembangan automasi UAV untuk merencanakan rute penerbangan telah dilakukan menggunakan algoritme genetika [9]. Metode ini menggunakan algoritme genetika *master-slave parallel vector-evaluated genetic algorithm* (MSPVEGA). Hasil yang dicapai adalah algoritme ini memerlukan jumlah populasi dan generasi yang banyak. Ukuran populasi yang besar dibutuhkan dalam pengumpulan informasi, sedangkan jumlah generasi berpengaruh terhadap kecepatan.

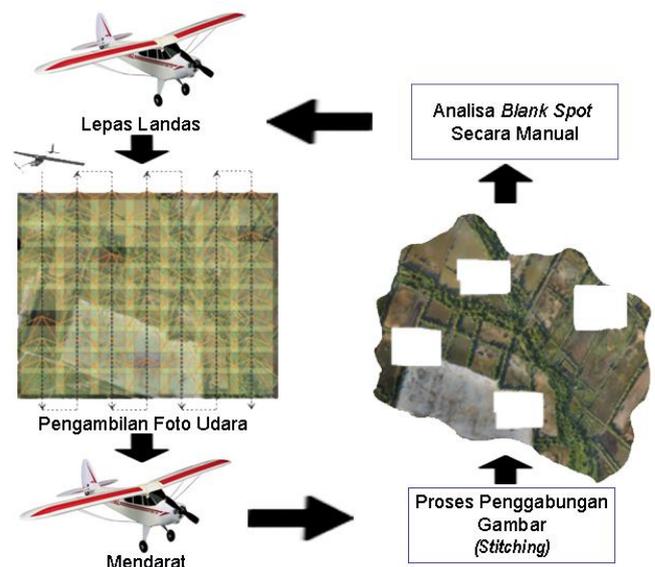
Optimasi dengan menggabungkan beberapa algoritme, yaitu algoritme genetika, *simulated annealing*, dan *targeted mutation* telah dilakukan [10]. Keunggulan yang ditawarkan algoritme genetika adalah paralelisme dan optimasi global, sedangkan kekurangannya adalah kecepatan yang rendah dan mudahnya terperangkap dalam *local optimum*. Kelebihan algoritme *simulated annealing* adalah lebih andal dalam menghindari dari jebakan *local optimum*. Sementara itu, algoritme *targeted mutation* memiliki keunggulan dalam meningkatkan variasi genetik dan mempercepat proses menemukan solusi. Kolaborasi antara algoritme genetika, *simulated annealing*, dan *targeted mutation* dapat mempercepat tercapainya *global optimum* dan menghambat *prematurity*.

Perbaikan algoritme genetika telah dilakukan dengan menerapkan operator *immune*, yang terdiri atas *vaccination* dan *immune selection* [11]. *Vaccination* melakukan modifikasi pada beberapa gen pada individu dan *immune selection* melakukan perbandingan nilai *fitness* untuk individu anak dan kedua induk dalam menentukan individu yang akan bertahan. Penambahan operator *immune* efektif meningkatkan kecepatan konvergensi dan mencegah *prematurity*.

Perencanaan rute UAV juga telah dilakukan dengan menggunakan *vibrational genetic algorithm* [12]. Kelebihan metode ini adalah tingkat populasi yang rendah dan siklus regenerasi yang pendek. Penerapan operator mutasi *vibrational* menyebabkan terjadinya penyebaran individu sehingga menghindari keluarnya dari kondisi *local optimum* dan dapat mencapai *global optimum* secara cepat. Operator mutasi *vibrational* menyebabkan mutasi yang tinggi, distribusi individu secara acak, dan *elitism* menjadikan distribusi individu berjalan ke arah yang benar.

Perencanaan rute terbang UAV untuk menghindari zona terlarang dilakukan menggunakan algoritme genetika [13]. Sistem ini menghindari zona terlarang dengan membuat rute terbang untuk menghindari zona tersebut dengan jarak terpendek.

Pada makalah ini, algoritme genetika digunakan untuk membuat rute terbang baru. Rute baru ini akan memperbaiki zona *blank spot* hasil kegagalan UAV dalam melewati rute tersebut akibat faktor cuaca. Proses pembuatan rute terbang baru dilakukan secara *real time* setelah seluruh rute terbang yang direncanakan dikerjakan oleh *autopilot*. Algoritme genetika dipilih untuk optimasi dengan alasan ringan dieksekusi menggunakan mikrokontroler dengan kecepatan prosesor rendah.

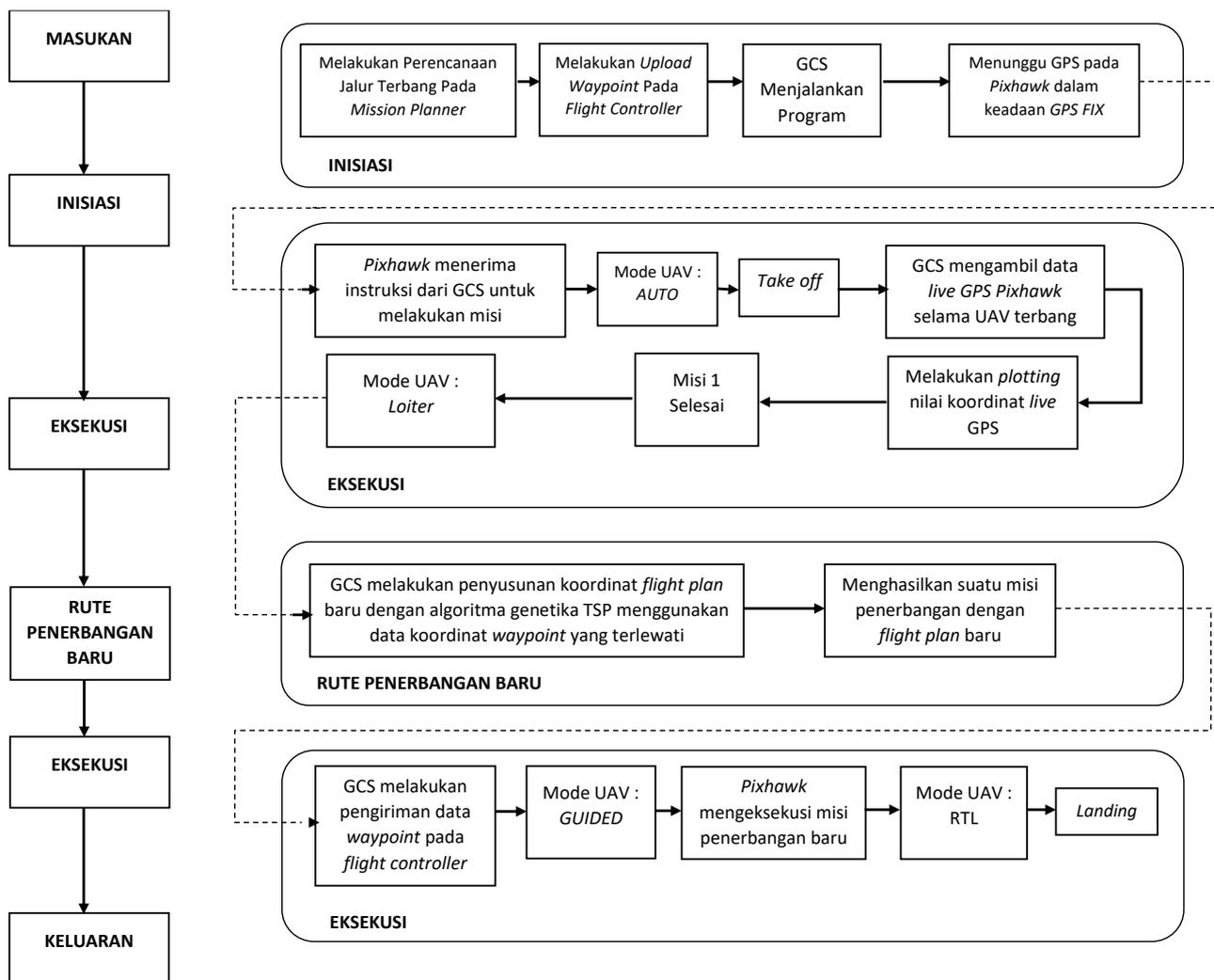


Gbr. 1 Sistem *autopilot* konvensional.

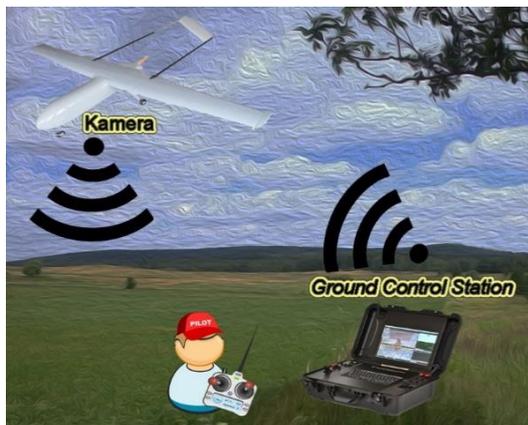
III. AUTOPILOT YANG DIKEMBANGKAN

Sistem *autopilot* konvensional ditunjukkan pada Gbr. 1. Pertama, operator mengatur rute terbang sesuai peta wilayah yang akan dilakukan pemotretan. Setelah itu, UAV akan memulai lepas landas (*take off*) dan terbang sesuai dengan rute yang telah diatur sambil melakukan pemotretan udara. Setelah seluruh rute dilalui, pesawat akan mendarat (*landing*). Secara *offline*, hasil gambar yang telah diperoleh akan dikenai proses *stitching* (penggabungan). Hasil proses *stitching* gambar dianalisis secara manual untuk menentukan adanya *blank spot*. Lokasi *blank spot* digunakan untuk rute terbang baru dan UAV akan melakukan penerbangan kedua. Langkah ini dilakukan terus secara iteratif hingga *blank spot* hilang. Makalah ini memperbaiki cara konvensional dengan cukup melakukan satu kali penerbangan dan UAV dapat melakukan analisis *blank spot* ketika terbang, kemudian langsung melakukan perencanaan terbang secara otomatis. Langkah-langkah perencanaan rute terbang ditunjukkan pada Gbr. 2, ilustrasi sistem yang dikembangkan ditunjukkan pada Gbr. 3, dan sistem *autopilot* yang dikembangkan ditunjukkan pada Gbr. 4.

Perbedaan antara sistem pemetaan udara konvensional dengan yang diusulkan adalah pada sistem konvensional, proses identifikasi *blank spot* dilakukan secara manual dan memaksa UAV mendarat terlebih dahulu; sedangkan pada sistem yang diusulkan, proses identifikasi *blank spot* dilakukan saat pesawat masih di udara. *Autopilot* yang dikembangkan memiliki fungsi tambahan penting, yaitu analisis *blank spot* secara otomatis dan pembuatan rute terbang baru secara efektif dengan menggunakan algoritme genetika. Urutan proses sistem keseluruhan dimulai dengan operator memasukkan rute terbang dengan mempertimbangkan luas cakupan wilayah pemotretan. Rute terbang yang direncanakan diunggah ke *autopilot* melalui *ground control station* (GCS). Setelah dilakukan pengecekan sebelum terbang (*pre-flight check*) dan seluruh parameter terbang terpenuhi, pesawat mulai melakukan lepas landas.



Gbr. 2 Diagram blok sistem yang diusulkan.



Gbr. 3 Ilustrasi sistem GCS.

Setelah lepas landas, UAV akan memasuki mode otomatis, sehingga akan terbang sesuai dengan rute yang telah direncanakan dan melakukan pemotretan udara. Seluruh data pesawat (meliputi koordinat GPS, ketinggian, posisi, dan parameter lainnya) dikirim ke GCS, lalu GCS merekam secara terus menerus koordinat GPS yang digunakan untuk analisis

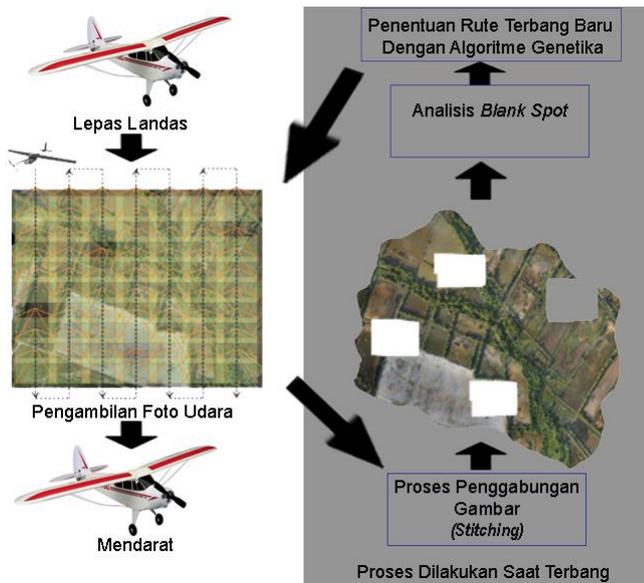
blank spot. Setelah seluruh rute penerbangan dilewati, *autopilot* akan langsung menganalisis *blank spot* berdasarkan koordinat GPS yang dikirimkan ke GCS. Rute terbang baru dibuat berdasarkan koordinat *blank spot* yang telah dioptimasi jarak menggunakan algoritme genetika. Selanjutnya, UAV mengeksekusi rute terbang baru tersebut hingga sudah tidak ada lagi *blank spot*. Pendaratan dilakukan menggunakan mode *return to launch* (RTL) jika seluruh misi sudah selesai. Dengan sistem seperti yang diusulkan, proses pemetaan udara dapat dilakukan dengan lebih cepat dan dapat menekan biaya operasional.

A. Analisis Blank Spot pada Kondisi Terbang

Autopilot yang dikembangkan mengirimkan koordinat GPS yang dilalui UAV secara terus menerus ke GCS. Selanjutnya, GCS melakukan analisis *blank spot* dan menentukan rute terbang baru yang dioptimasi menggunakan algoritme genetika.

B. Perhitungan Luas Cakupan Kamera

Spesifikasi kamera yang digunakan ditunjukkan pada Tabel I. Perhitungan cakupan area pada sebuah foto pemetaan udara dilakukan menggunakan *ground sampling distance* (GSD) [14].



Gbr. 4 Pengembangan sistem autopilot.

TABEL I
SPESIFIKASI KAMERA YANG DIGUNAKAN

No	Parameter	Nilai pada Kamera Xiaomi Yi Cam
1	Focal length	2,73 mm
2	Pixel size	1,12 μm
3	Tinggi terbang	100 m
4	Sensor width	6,08 mm
5	Sensor height	4,56 mm
6	Image width	4.608 piksel
7	Image height	3.456 piksel

$$GSD \text{ (cm/piksel)} = \frac{\text{Sensor Width (mm)} \times \text{Flight Height (m)} \times 100}{\text{Focal Length (mm)} \times \text{Image Width (piksel)}} \quad (1)$$

$$GSD = \frac{6,08 \text{ mm} \times 100 \text{ m} \times 100}{2,73 \text{ mm} \times 4.608 \text{ piksel}} = 4,83 \text{ cm/piksel}$$

Nilai luasan setiap foto adalah sebagai berikut.

$$\text{Panjang (m)} = \text{Image Width (piksel)} \times GSD \quad (2)$$

$$\text{Panjang} = 4.608 \text{ piksel} \times 4,83 \text{ cm/piksel} = 222,71 \text{ m}$$

$$\text{Lebar (m)} = \text{Image Height (piksel)} \times GSD \quad (3)$$

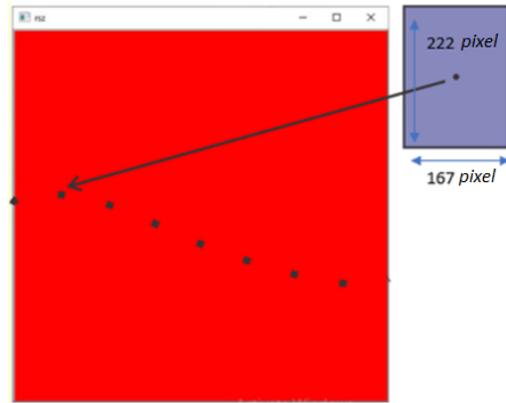
$$\text{Lebar} = 3.456 \text{ piksel} \times 4,83 \text{ cm/piksel} = 167,03 \text{ m}$$

$$\text{Luasan (m}^2\text{)} = P(m) \times L(m)$$

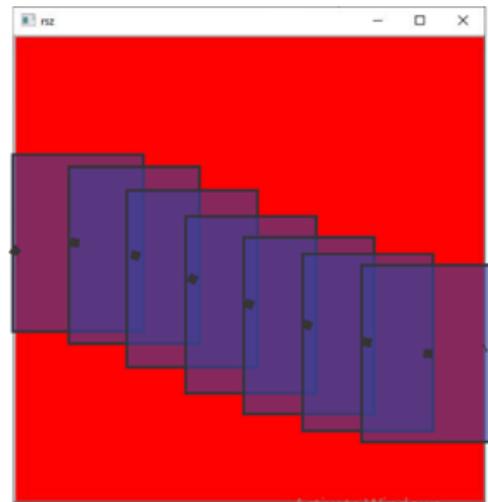
$$\text{Luasan} = 222,71 \times 167,03 = 37.200,01 \text{ m}^2$$

C. Mekanisme Analisis Zona Blank Spot

Tahap menganalisis adanya keberadaan suatu zona *blank spot* dilakukan dengan penggambaran cakupan area pemotretan yang direpresentasikan menggunakan sebuah gambar kotak berwarna biru dengan titik pusat berasal dari nilai konversi koordinat bumi posisi UAV menjadi koordinat *canvas* pada suatu gambar *canvas* yang luasannya disesuaikan dengan skala terhadap total luasan cakupan pemetaan. Ukuran kotak biru tersebut disesuaikan dengan luasan cakupan kamera dalam satu foto berdasarkan perhitungan GSD. Gbr. 5 memperlihatkan



Gbr. 5 Ilustrasi mekanisme *plotting* cakupan pemotretan.

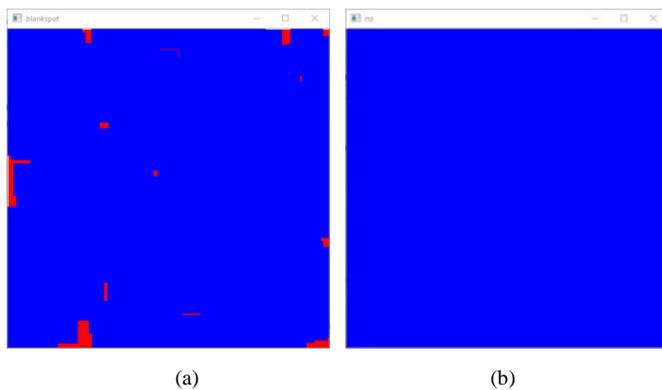


Gbr. 6 Ilustrasi hasil mekanisme *plotting*.

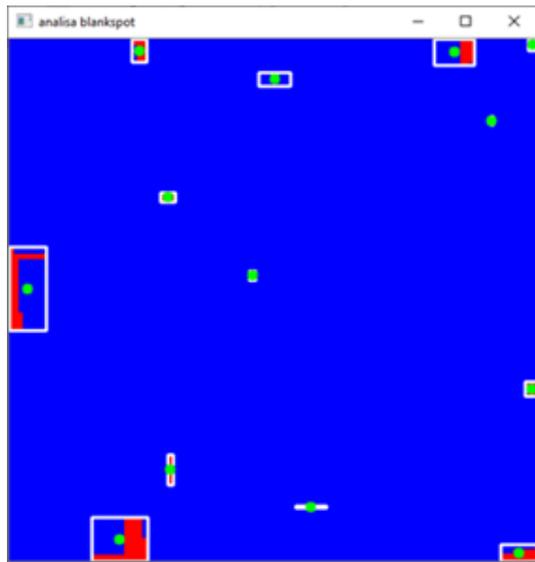
ilustrasi apabila diibaratkan titik-titik pada *canvas* merupakan titik koordinat posisi UAV yang berhasil terekam oleh GCS dan kotak biru merupakan luasan cakupan kamera yang telah dihitung menggunakan rumus GSD.

Kemudian dilakukan proses *plotting* kotak biru tersebut pada *canvas*. Titik pusat kotak tersebut disesuaikan dengan titik koordinat posisi UAV yang berhasil terekam, sehingga hasilnya seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 6. Tahap ini terus dijalankan hingga UAV menyelesaikan misi penerbangan, sehingga pada akhirnya dihasilkan gambar *canvas* yang tertutupi kotak-kotak berwarna biru. Apabila gambar *canvas* keseluruhan menjadi berwarna biru seperti Gbr. 7(b), diindikasikan UAV berhasil melakukan pemotretan seluruh area lahan yang diinginkan. Namun, jika pada *canvas* terdapat sisa gambar berwarna merah, seperti pada Gbr. 7(a), dapat dikatakan bahwa wilayah/area tersebut tidak terfoto atau tidak terlewati sempurna oleh UAV saat misi penerbangan.

Kemudian, hasil penggambaran *canvas* tersebut dianalisis menggunakan fungsi OpenCV, yaitu metode *blob analysis*. Analisis ini menghasilkan titik-titik koordinat zona *blank spot* seperti pada Gbr. 8. Data koordinat tersebut merupakan titik koordinat area yang diindikasikan sebagai zona *blank spot*. Data koordinat tersebut kemudian dioptimasi menggunakan



Gbr. 7 Canvas, (a) dengan zona *blank spot*, (b) tanpa zona *blank spot*.



Gbr. 8 Hasil penerapan analisis zona *blank spot* pada *canvas*.

algoritme genetika agar didapatkan susunan rute penerbangan UAV dalam mengeksekusi seluruh data koordinat tersebut, sehingga dihasilkan total jarak tempuh terpendek.

D. Pembuatan Rute Terbang Baru yang Dioptimasi Jarak Menggunakan Algoritme Genetika.

Proses selanjutnya setelah analisis *blank spot* adalah pembuatan rute terbang baru yang dioptimasi jarak menggunakan algoritme genetika. Hal ini dilakukan untuk membuat UAV cukup terbang satu kali saja selama misi pemetaan, yang pada akhirnya akan memberikan keuntungan waktu sehingga menekan biaya operasional. Pada tahap ini, *autopilot* bekerja agar proses pemotretan ulang dilakukan secara efektif dan efisien. Hal ini dapat tercapai jika kapasitas baterai UAV dapat dimaksimalkan, yaitu berbanding lurus dengan jarak yang ditempuh oleh UAV. Pembuatan rute terbang baru menggunakan algoritme genetika, dengan masukan berupa koordinat *blank spot*. Tahapan implementasi algoritme genetika adalah sebagai berikut.

1) *Pengkodean*: Gen yang digunakan adalah koordinat *blank spot*. Terhadap koordinat tersebut dilakukan pengodean dengan menggunakan angka desimal. Pengodean didasarkan pada urutan data yang diterima dari hasil analisis sebelumnya.

2) *Pembangkitan Populasi*: Populasi dibangkitkan dengan metode acak. Ukuran populasi disesuaikan dengan kebutuhan. Pembangkitan populasi ini akan menyediakan banyak vektor solusi.

3) *Evaluasi*: Evaluasi dilakukan terhadap solusi yang dibangkitkan, dengan tujuan mengukur tingkat kesesuaian vektor solusi dengan solusi tujuan. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan fungsi *fitness*. Pada tahap ini, evaluasi dilakukan dengan menghitung jarak total dari solusi yang dibangkitkan. Kemudian, nilai fungsi *fitness* dihitung menggunakan (4).

$$f(x) = \frac{1}{\text{Jarak}^8+1} \quad (4)$$

Hasil dari tahap ini adalah vektor solusi yang mempunyai jarak terpendek, sehingga memiliki nilai fungsi *fitness* yang besar.

4) *Elitisme*: Setelah diperoleh vektor solusi yang dianggap baik, dilakukan tahap *elitisme* dengan tujuan mempertahankan individu terbaik. Individu yang dianggap baik akan tetap ada dan menggantikan individu dengan nilai fungsi *fitness* terendah dalam populasi tersebut.

5) *Kawin Silang*: Tahap ini memunculkan individu baru dengan perkawinan silang dua individu. Proses ini dilakukan dengan kombinasi potongan gen dari salah satu induk dengan induk yang berbeda.

6) *Mutasi*: Mutasi menghadirkan individu baru yang bukan merupakan hasil dari kawin silang.

7) *Repetisi*: Pengulangan dilakukan terus hingga fungsi tujuan yang diharapkan tercapai.

Dari seluruh tahapan algoritme genetika, hasilnya adalah koordinat rute penerbangan yang baru yang telah dioptimasi jarak.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Autopilot yang dikembangkan telah direalisasikan dan diuji terbang. Dalam rangka pengujian, digunakan UAV dan GCS seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 9 dan Gbr. 10. Untuk mengukur kemampuan *autopilot* yang dikembangkan, dilakukan pengujian *autopilot* tanpa optimasi dan dengan optimasi.

Spesifikasi UAV yang digunakan adalah tipe *fixed wing* dengan bentang sayap 1,2 m. Perangkat keras *autopilot* yang digunakan yaitu Pixhawk APM Plane dengan *firmware* Arduplane. Kamera yang digunakan untuk pemotretan adalah Xiaomi Yi Cam, sedangkan GPS yang digunakan adalah Ublox Neo M8n. Baterai yang digunakan adalah Lipo 4S 4.200 mAh 25C dan persentase *throttle* saat terbang lurus adalah 30%.

A. Pengujian Autopilot Tanpa Optimasi

Pada pengujian ini, UAV melakukan pemetaan udara menggunakan sistem konvensional tanpa optimasi jarak. Pemetaan dilakukan pada area dengan ukuran 500 m × 500 m (luas = 2.500 m²) di Pakuwon City, Surabaya. Perencanaan rute penerbangan diatur dengan *sidelap* (tumpang tindih foto di antara penerbangan yang berdekatan dengan arah samping) sebesar 0% dan akan menghasilkan jarak antar rute terbang



Gbr. 9 Hasil perakitan UAV.



Gbr. 10 Ground control station.



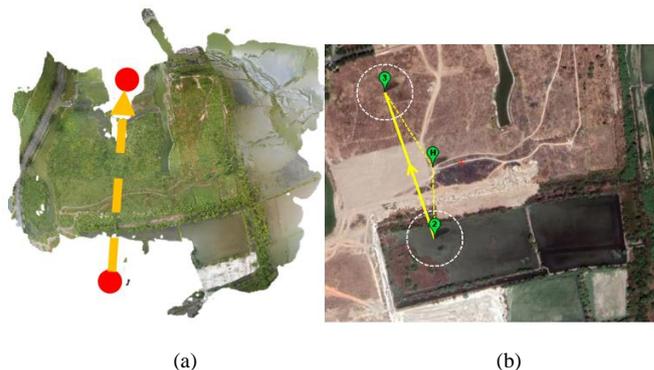
Gbr. 11 Pola rute penerbangan.

horizontal sebesar 255 m. Nilai *overlap* (tumpang tindih foto arah depan) diatur berdasarkan *time lapse* pada kamera, yakni 2 s. UAV diterbangkan dengan ketinggian 120 m dan radius *waypoint* adalah 50 m. Rute penerbangan dengan parameter tersebut akan menghasilkan jalur seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 11. Penerbangan dilakukan beberapa kali hingga seluruh *blank spot* hilang.

Pada Gbr. 11, garis lurus adalah rute penerbangan, lingkaran putih putus-putus adalah *waypoint radius*, garis lurus putus-putus adalah arah menuju *Home (H)*, dan nomor menunjukkan urutan *waypoint*. Pengujian ini membutuhkan waktu selama 141 s. Misi ini menghasilkan foto sebanyak tujuh puluh dengan ukuran foto 16 MP. Selanjutnya, foto tersebut diolah dengan perangkat lunak Agisoft Photoscan Professional untuk menghasilkan peta seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 12. Dari hasil tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat beberapa area yang tidak sempurna (*blank spot*). Hal ini terjadi karena adanya pergeseran rute terbang. Waktu proses *stitching* penggunaan *autopilot* konvensional misi pertama disajikan pada Tabel II.



Gbr. 12 Hasil *stitching* misi 1.



Gbr. 13 Perencanaan penerbangan lanjutan. (a) ilustrasi rute penerbangan hasil analisis *blank spot*, (b) implementasi rute penerbangan kedua.

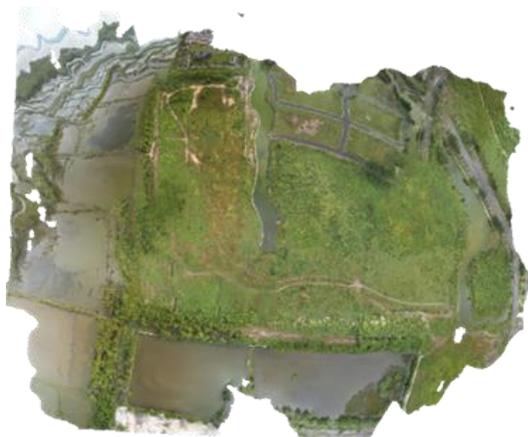
TABEL II
WAKTU PROSES *STITCHING* PENGGUNAAN *AUTOPILOT* KONVENSIONAL MISI PERTAMA

Urutan	Tahapan	Kualitas	Waktu (s)
1	<i>Align photos</i>	Low	321
2	<i>Build dense cloud</i>	Low	234
3	<i>Build mesh</i>	Low	240
4	<i>Build texture</i>	Low	80
5	<i>Build tiled model</i>	Low	1.560
6	<i>Build orthomosaic</i>	Low	305
7	<i>Export orthomosaic</i>		321
Total waktu			2.777

Pada sistem konvensional, diperlukan penerbangan lanjutan untuk memperbaiki *blank spot*. Perencanaan rute penerbangan lanjutan ditentukan berdasarkan analisis hasil proses *stitching* pada penerbangan pertama yang ditunjukkan pada Gbr. 13.

Penerbangan kedua membutuhkan waktu 68 s dan menghasilkan 34 foto. Terhadap hasil penerbangan kedua selanjutnya dilakukan proses *stitching* untuk digabungkan dengan hasil penerbangan pertama, seperti ditunjukkan pada Gbr. 14. Hasil penerbangan kedua menunjukkan bahwa peta dapat diperbaiki sesuai area pemetaan yang diinginkan. Waktu proses *stitching* penggunaan *autopilot* konvensional misi kedua ditunjukkan pada Tabel III.

Dari pengujian yang telah dilakukan, diketahui bahwa sistem konvensional membutuhkan minimal dua kali penerbangan untuk menghasilkan sebuah peta yang sempurna. Penerbangan



Gbr. 14 Hasil *stitching* penggabungan foto misi 1 dan misi 2.

TABEL III
PROSES *STITCHING* PENGGUNAAN *AUTOPILOT* KONVENSIONAL MISI 2

Urutan	Tahapan	Kualitas	Waktu (s)
1	<i>Align photos</i>	Low	436
2	<i>Build dense cloud</i>	Low	384
3	<i>Build mesh</i>	Low	287
4	<i>Build texture</i>	Low	117
5	<i>Build tiled model</i>	Low	1.500
6	<i>Build orthomosaic</i>	Low	390
7	<i>Export orthomosaic</i>		33
Total waktu			3.147

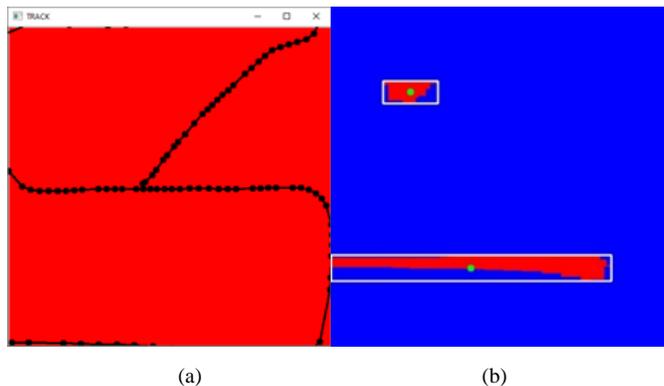
TABEL IV
WAKTU YANG DIPERLUKAN UNTUK PEMETAAN DENGAN SISTEM *AUTOPILOT* KONVENSIONAL

No	Aktivitas	Waktu yang Diperlukan (s)
1	Penerbangan pertama	141
2	Penerbangan kedua	68
3	<i>Stitching</i> pertama	2.777
4	<i>Stitching</i> kedua	3.147
Total waktu		6.133

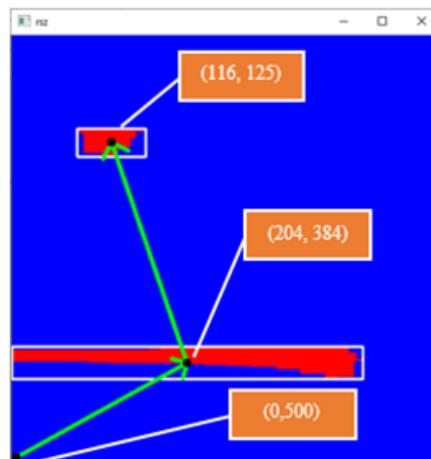
pertama dilakukan sesuai misi yang direncanakan dan misi penerbangan kedua dilakukan untuk mengoreksi data yang didapatkan pada misi penerbangan pertama. Tabel IV merupakan hasil kalkulasi total waktu, sedangkan kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk semua penerbangan adalah 3.570 mAh.

B. Pengujian Autopilot dengan Optimasi

Autopilot dengan optimasi jarak diimplementasikan menggunakan algoritme yang telah direalisasikan dan telah diuji coba. Langkah pertama yang dilakukan sama dengan sistem konvensional, yaitu memasukkan data koordinat cakupan wilayah yang akan dilakukan pemotretan udara. Namun, pada pengujian kali ini, penerbangan hanya dilakukan satu kali saja karena tahapan analisis *blank spot* dan perencanaan rute terbang baru dilakukan ketika pesawat masih dalam kondisi terbang. Parameter pemotretan udara yang digunakan sama dengan data pada pengujian sistem



Gbr. 15 Hasil pengujian *autopilot* dengan optimasi, (a) hasil pencatatan rute penerbangan UAV, (b) hasil analisis zona *blank spot*.



Gbr. 16 Rute penerbangan hasil implementasi algoritme genetika.

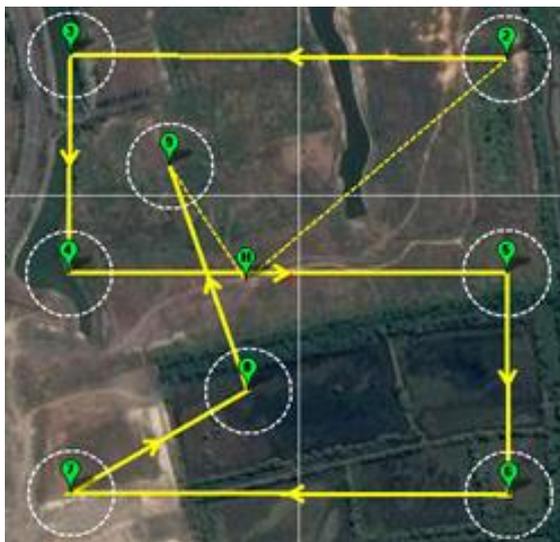
TABEL V
NILAI VARIABEL DALAM IMPLEMENTASI ALGORITME GENETIKA

Variabel	Keterangan
Jumlah populasi	30 kromosom
<i>Elitism</i>	2 kromosom
Persentase mutasi	30%
Jumlah repetisi	100

konvensional. Program optimasi dilakukan oleh program Python yang dibuat dan dijalankan di GCS. Ketika UAV terbang, data disinkronkan dengan GCS untuk analisis *blank spot* dan perencanaan rute terbang baru. Pencatatan rute penerbangan dan hasil analisis *blank spot* di GCS ditunjukkan pada Gbr. 15.

Pengujian yang dilakukan menunjukkan terdapat dua buah area yang diidentifikasi sebagai *blank spot*, dengan koordinat pada *canvas* adalah (204, 384) dan (116, 125). Di bumi, titik tersebut berada di koordinat (-7,282783096, 112,8180628608) dan (-7,280427749999999, 112,8172594032).

Berikutnya, rute penerbangan baru dibuat berdasarkan lokasi *blank spot* tersebut dan dioptimasi jaraknya menggunakan algoritme genetika. Parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel V. Hasil optimasi jarak pada rute penerbangan baru ditunjukkan pada Gbr. 16. Berikutnya, *autopilot* membuat rute penerbangan baru, yang kemudian digabungkan dengan rute penerbangan lama, seperti ditunjukkan pada Gbr. 17. Rute



Gbr. 17 Rute penerbangan baru yang telah dikompensasi adanya blank spot.

TABEL VI

PROSES STITCHING UNTUK PEMETAAN DENGAN SISTEM AUTOPILOT HASIL PENGEMBANGAN

Urutan	Tahapan	Kualitas	Waktu (s)
1	Align photos	Low	262
2	Build dense cloud	Low	230
3	Build mesh	Low	373
4	Build texture	Low	90
5	Build tiled model	Low	1.800
6	Build orthomosaic	Low	337
7	Export orthomosaic		33
Total waktu			3.125

penerbangan dengan nomor 8 dan 9 adalah rute penerbangan untuk kompensasi adanya blank spot.

Selanjutnya, dilakukan pengaturan misi penerbangan baru seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 17. Misi penerbangan baru memiliki data waypoint yang sama dengan misi penerbangan utama, tetapi diberi penambahan data waypoint blank spot yang didapatkan dari hasil analisis pada penerbangan sebelumnya. Kemudian, dilakukan penerbangan UAV kembali dengan misi tersebut dan UAV lepas landas pada arah yang sama dengan penerbangan sebelumnya.

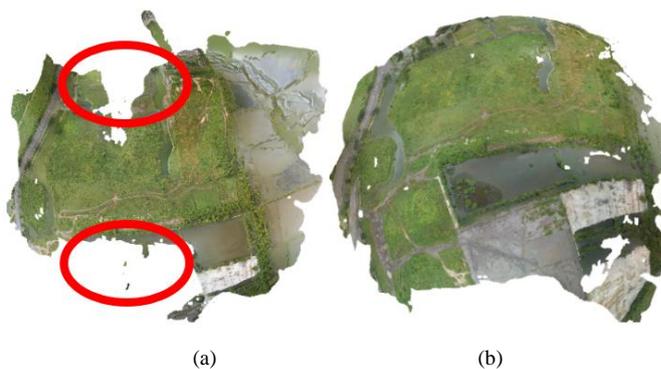
Pada pengujian ini, UAV membutuhkan waktu 161 s untuk menyelesaikan misi pemetaan secara penuh. Hasil foto yang diperoleh selanjutnya masuk tahap stitching, lalu waktu yang dibutuhkan dihitung. Lama waktu yang dibutuhkan untuk melakukan stitching pada tahap ini ditunjukkan pada Tabel VI, hasil stitching penggunaan sistem autopilot yang diusulkan ditunjukkan pada Gbr. 18, sedangkan perhitungan seluruh waktu yang dibutuhkan untuk semua tahapan dan kapasitas baterai disajikan pada Tabel VII.

C. Perbandingan Hasil Pengujian Autopilot Konvensional dan Autopilot yang Dikembangkan

Setelah dilakukan pengujian untuk masing-masing autopilot, dilakukan juga perbandingan hasil pengolahan foto antara



Gbr. 18 Hasil stitching penggunaan sistem autopilot hasil pengembangan.



Gbr. 19 Peta hasil pengujian, (a) autopilot konvensional, (b) autopilot yang dikembangkan.

TABEL VII

WAKTU YANG DIPERLUKAN UNTUK PEMETAAN DENGAN SISTEM AUTOPILOT DENGAN SISTEM HASIL OPTIMASI

Parameter	Nilai pada Misi 1
Waktu terbang	161 s
Waktu stitching	3.125 s
Total	3.286 s
Penggunaan kapasitas baterai	2.100 mAh

autopilot konvensional dan autopilot yang dikembangkan. Perbandingan peta yang dihasilkan ditunjukkan pada Gbr. 19. Hasil tersebut menunjukkan adanya blank spot pada pemetaan menggunakan autopilot konvensional dan hasil sempurna untuk autopilot yang dikembangkan. Pengujian autopilot konvensional membutuhkan waktu 6.133 s, sedangkan autopilot yang dikembangkan membutuhkan waktu 3.286 s, sehingga autopilot yang dikembangkan menurunkan waktu pemotretan udara sebesar 46,4%.

V. KESIMPULAN

Autopilot untuk pemetaan udara dengan perbaikan blank spot dan optimasi rute penerbangan telah berhasil dikembangkan dan direalisasikan. Autopilot yang dikembangkan mampu menurunkan waktu pemotretan udara sebesar 46,4% dan menghemat konsumsi penggunaan baterai sebesar 41,18%. Pada peta yang dihasilkan oleh autopilot yang dikembangkan tidak terdapat blank spot, sedangkan pada peta hasil autopilot konvensional terdapat dua lokasi blank spot. Dengan keuntungan percepatan waktu pemotretan udara dan kapasitas baterai, penggunaan autopilot yang dikembangkan akan menghemat biaya operasional.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Ronny Mardiyanto adalah ketua peneliti topik yang ada di makalah ini, juga yang menulis makalah ini, juga yang memiliki gagasan untuk mengembangkan *autopilot* dengan optimasi jarak menggunakan algoritme genetika. Muhammad Ichlasul Salik sebagai asisten peneliti bertugas untuk membuat alat, membuat kode program, dan melakukan pengujian. Djoko Purwanto berperan dalam memberikan saran terkait dengan algoritme optimasi yang dipakai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Kemdikbudristek yang telah memberikan dana penelitian melalui skema Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) 2021.

REFERENSI

- [1] H. Gularso, S. Subiyanto, dan L.M. Sabri, "Tinjauan Pemotretan Udara Format Kecil Menggunakan Pesawat Modelskywalker 1680 (Studi Kasus: Area Sekitar Kampus Undip)," *J. Geodesi Undip*, Vol. 2, No. 2, hal. 78-94, Apr. 2013
- [2] R. Mardiyanto, R. Hidayat, E. Aprilian, dan H. Suryoatmojo, "Development of Autopilot System of Unmanned Aerial Vehicle for Aerial Mapping Application," *2018 Int. Sem. Intell. Technol., Its Appl. (ISITIA)*, 2018, hal. 357-361.
- [3] A. Ahmad dan A.M. Samad, "Aerial Mapping Using High Resolution Digital Camera and Unmanned Aerial Vehicle for Geographical Information System," *2010 6th Int. Colloq. Signal Process., Its Appl.*, 2010, hal. 1-6.
- [4] K.N. Tahar, A. Ahmad, W.A.A.W.M. Akib, dan W.M.N.W. Mohd, "Aerial Mapping Using Autonomous Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle," *2012 IEEE 8th Int. Colloq. Signal Process., Its Appl.*, 2012, hal. 164-168.
- [5] (2020) "Pixhawk Overview — Copter Documentation," [Online], <http://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>, tanggal akses: 20-Nov-2020.
- [6] A.P. Engelbrecht, *Fundamentals of Computational Swarm Intelligence*. Hoboken, AS: Wiley, 2005.
- [7] K. Krisnandi dan H. Agung, "Implementasi Algoritma Genetika untuk Memprediksi Waktu dan Biaya Pengerjaan Proyek Konstruksi," *J. Ilm. FIFO*, Vol. 9, No. 2, hal. 90-97, 2017.
- [8] D. Sundarningsih, "Penerapan Algoritma Genetika untuk Optimasi Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW): Studi Kasus Air Minum Kemasan," Skripsi, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, Jan. 2015.
- [9] D.M. Pierre, N. Zakaria, dan A.J. Pal, "Master-Slave Parallel Vector-Evaluated Genetic Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle's Path Planning," *2011 11th Int. Conf. Hybrid Intell. Syst. (HIS)*, 2011, hal. 517-521.
- [10] Z. Cheng dan D. Li, "Improved GASA Algorithm for Mutation Strategy UAV Path Planning," *2018 10th Int. Conf. Commun. Softw., Netw. (ICCSN)*, 2018, hal. 506-510.
- [11] Z. Cheng, Y. Sun, dan Y. Liu, "Path Planning Based on Immune Genetic Algorithm for UAV," *2011 Int. Conf. Electric Inf., Control Eng.*, 2011, hal. 590-593.
- [12] Y.V. Pehlivanoglu dan A. Hacıoglu, "Vibrational Genetic Algorithm Based Path Planner for Autonomous UAV in Spatial Data Based Environments," *2007 3rd Int. Conf. Recent Adv. Space Technol.*, 2007, hal. 573-578.
- [13] M. Cakir, "2D Path Planning of UAVs with Genetic Algorithm in a Constrained Environment," *2015 6th Int. Conf. Model., Simul., Appl. Optim. (ICMSAO)*, 2015, hal. 1-5.
- [14] J.A. Gonçalves dan R. Henriques, "UAV Photogrammetry for Topographic Monitoring of Coastal Areas," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. 104, hal. 101-111, Jun. 2015.