

Sistem *Positioning* pada Wahana *Multicopter* Menggunakan Metode *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) Berbasis LiDAR dan *Inertial Measurement Unit* (IMU)

Dwi Bagas Prayoga

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: dwibagas.20053@mhs.unesa.ac.id

Agus Wiyono¹, Muhamad Syariffuddien Zuhrie², Lusia Rakhmawati³

¹ S1 Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

² S1 Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

³ S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: aguswiyono@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id, lusiarakhmawati@unesa.ac.id

Abstrak

Dalam penerapannya, wahana *multicopter* memiliki berbagai kelebihan. Penelitian ini menggabungkan data LiDAR (*Light Detection and Ranging*) dan IMU (*Inertial Measurement Unit*) untuk meningkatkan akurasi sistem *positioning* pada wahana *multicopter* dengan metode SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan sebuah solusi sistem *positioning* yang akurasi tinggi dan dapat digunakan dalam berbagai macam lokasi dan kondisi, salah satunya adalah area yang tidak terjangkau oleh sinyal GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Dengan menggabungkan data sensor LiDAR dan IMU, *multicopter* mampu mengestimasi posisi dan orientasi secara langsung dengan cara memetakan lingkungan sekitar dengan bantuan metode SLAM. Pengujian sistem ini menggunakan berbagai simulasi dan kondisi lapangan untuk mengamati kestabilan, kinerja, dan akurasi sistem *positioning* yang diteliti. Hasilnya membuktikan bahwa metode SLAM yang memanfaatkan LiDAR dan IMU memiliki kapabilitas untuk meningkatkan kualitas sistem *positioning* pada wahana *multicopter*, terutama dalam penerapan yang membutuhkan akurasi data *positioning* yang tinggi dan mampu beroperasi terhadap berbagai macam gangguan lingkungan.

Kata Kunci: Sistem *Positioning*, SLAM, *Multicopter*, LiDAR, IMU

Abstract

In its application, *multicopter* vehicles have various advantages. This research combines LiDAR (*Light Detection and Ranging*) and IMU (*Inertial Measurement Unit*) data to improve the accuracy of the *positioning* system on *multicopter* vehicles using the SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) method. This research aims to create a *positioning* system solution that has high accuracy and can be used in various locations and conditions, one of which is areas that are not covered by GNSS (*Global Navigation Satellite System*) signals. By combining LiDAR and IMU data sensors, the *multicopter* is able to estimate position and orientation directly by photographing the surrounding environment with the help of the SLAM method. This system testing uses various simulations and field conditions to observe the stability, performance and accuracy of *positioning* of the system under study. The results prove that the SLAM method which utilizes LiDAR and IMU has the capability to improve the quality of the *positioning* system on *multicopter* vehicles, especially in applications that require high *positioning* data accuracy and are able to operate against various kinds of environmental disturbances.

Keywords: Positioning System, SLAM, *Multicopter*, LiDAR, IMU

PENDAHULUAN

Multicopter ialah salah satu jenis UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) yang memiliki *propeller* lebih dari dua dan lepas landas secara vertikal (Mossel et al., 2014). Selama ini *multicopter* banyak digunakan untuk berbagai macam tugas. *Multicopter* memiliki banyak keunggulan seperti kemampuan manuver yang lebih tinggi, biaya yang lebih rendah, penurunan deteksi radar, kekuatan, serta penurunan risiko terhadap nyawa manusia (Yigit dan Altug, 2012). Keunggulan ini menyebabkan *multicopter* digunakan dalam banyak aplikasi seperti pengiriman paket

dari satu gedung ke gedung lainnya, pekerjaan pencarian dan penyelamatan, pekerjaan penelitian dan pengembangan di bidang pertanian, geografis, survei dan militer (Singh, 2015). Hal tersebut menyebabkan banyaknya penelitian untuk pengembangan teknologinya. Oleh karena itu, banyak UAV khususnya jenis *multicopter* yang beroperasi secara otonom sesuai dengan tugasnya.

Permasalahan utama yang dihadapi dari wahana *multicopter* untuk bergerak secara otonom ialah bagaimana wahana dapat bermanuver secara otomatis menuju lokasi tujuan tanpa menyebabkan kerusakan lingkungan yang

dilalui wahana (Fikri dan Anifah, 2021). Hal ini merupakan tantangan dalam bidang robotika khususnya wahana *multicopter* yang bermanuver dalam ruang 3D (tiga dimensi) sehingga wahana memiliki derajat kebebasan *6-DOF* (*Six Degree of Freedom*) (Dill dan Uijt de Haag, 2016). Oleh karena itu, wahana harus dapat mengetahui posisinya secara otonom terhadap berbagai jenis lingkungan sekitar. Salah satu cara yang bisa dilakukan adalah dengan menggunakan sistem *positioning* yang sesuai.

Sistem *positioning* pada wahana *multicopter* memiliki peran penting agar wahana dapat mengetahui posisinya. Telah banyak penelitian yang berhasil mengembangkan berbagai sistem, sensor, dan teknik untuk penentuan posisi yang bisa dikategorikan sebagai berikut, yaitu *odometry*, *inertial navigation*, kompas magnetik, suar aktif atau *active beacon*, GPS (*Global Positioning System*), navigasi *landmark*, dan pencocokan peta atau *map matching* (Borenstein et al., 1997). Umumnya wahana *multicopter* menggunakan sensor GPS untuk navigasi dan deteksi posisi (Dill dan Uijt de Haag, 2016). Akan tetapi, sensor ini memiliki berbagai kekurangan yaitu GPS tidak berfungsi di beberapa lokasi salah satunya di dalam ruangan (Yigit dan Altug, 2012). Hal itu disebabkan adanya interferensi yang mengganggu sinyal GPS terhadap satelit sehingga menyebabkan kinerjanya menurun atau hilang sama sekali yang berakibat penurunan akurasi (Balaei dan Dempster, 2009). Masalah tersebut menyebabkan wahana mengalami kegagalan untuk mengetahui posisinya sehingga menyebabkan tabrakan. Untuk mengatasi masalah tersebut, sistem *positioning* yang tidak terganggu oleh interferensi sangat diperlukan agar wahana *multicopter* dapat bernavigasi secara otonom dengan baik.

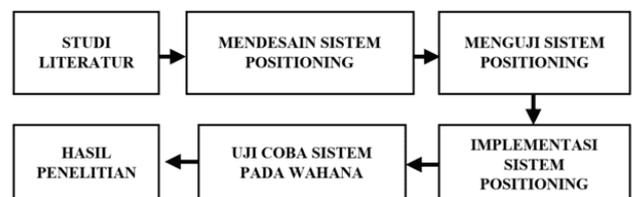
Metode *Simultaneous Localization And Mapping* (SLAM) biasanya digunakan untuk penentuan posisi secara *Real-time* pada segala jenis lingkungan. Salah satu fitur pemetaan yang paling penting adalah *close loop*, sehingga robot dapat mengenali tempat yang dilewati sebelumnya dan mengoptimalkan estimasi lintasannya, sehingga *error* dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan (Li et al., 2016). Terdapat berbagai jenis varian SLAM yang bergantung pada penggunaan dimensi ruang dari sensor yang digunakan, pada ruang 2D (dua dimensi) terdapat beberapa metode diantaranya *Gmapping*, *HectorSLAM*, *Google Cartographer*, dan lain sebagainya (Filipenko dan Afanasyev, 2018) (Yagfarov et al., 2018). Sedangkan pada ruang 3D terdapat beberapa varian juga diantaranya *RTAB-MAP*, *ORB-SLAM*, *LSD-SLAM*, dan lain sebagainya (Filipenko dan Afanasyev, 2018) (Huang et al., 2019) (Vanelli, 2019). Metode SLAM berbasis LiDAR dua dimensi memiliki kelemahan yaitu sensitif terhadap sejumlah konfigurasi posisi dan orientasi di mana geometri pengamatan laser tidak cukup baik untuk

estimasi posisi dan orientasi dengan *6-DOF* (Karam et al., 2020). Algoritma *Google Cartographer* dipilih karena dapat bekerja dengan kombinasi dari data IMU atau metode *odometry* untuk membantu sistem lokalisasi dan pemetaan dari algoritma *Google Cartographer* (Hess et al., 2016; Zhi dan Xiumin, 2019). Algoritma ini memiliki keunggulan yaitu tingkat akurasi *mapping* yang tinggi dengan resolusi *grid map* $r = 5 \text{ cm}$ dan lebih tahan terhadap perubahan lingkungan karena menggunakan siklus pengoptimalan peta *global* dan pembaruan peta probabilistik lokal (Filipenko dan Afanasyev, 2018), (Hess et al., 2016). Hal tersebut yang menyebabkan *Google Cartographer* memiliki potensi untuk digunakan pada wahana yang memiliki derajat kebebasan *6-DOF* seperti *multicopter*.

Originalitas penelitian ini terletak pada sistem kerja *positioning*. Metode *Simultaneous Localization And Mapping* (SLAM) pada penelitian ini menggunakan algoritma *Google Cartographer* untuk *mapping* berbasis LiDAR secara 2D. Metode SLAM tersebut menghasilkan sebuah data posisi dan orientasi 2D (x, y, yaw) wahana terhadap lingkungan. Sedangkan untuk wahana *multicopter* sendiri memiliki ruang gerak 3D dan derajat kebebasan *6-DOF*. Oleh sebab itu, data keluaran SLAM tersebut mengalami penggabungan dengan data sensor lain sehingga memiliki keluaran berupa data posisi dan orientasi 3D ($x, y, z, pitch, roll, yaw$). Kemudian keluaran data posisi dan orientasi 3D tersebut dikirim ke FCU (*Flight Control Unit*) melalui Mavlink (*Micro Air Vehicle Link*) dengan perantara ROS (*Robot Operating System*) sehingga FCU dapat melakukan kontrol posisi dan orientasi secara otonom.

METODE PENELITIAN

Dalam pembuatan desain sistem *positioning* pada wahana *multicopter* menggunakan metode SLAM berbasis LiDAR dan IMU meliputi beberapa metode-metode yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Tujuan dari metode penelitian ini untuk menangani wahana *multicopter* yang bermanuver pada lokasi *indoor* dan tidak terjangkau sinyal GPS. Sistem *positioning* pada penelitian ini baru bisa diimplementasikan dan digunakan untuk uji terbang pada wahana *multicopter* ketika pengujian sistem *positioning* berjalan dengan baik. Hal tersebut ditandai frekuensi *output* data posisi dan orientasi sistem *positioning* berada di atas 10 Hz (*Hertz*).

Sistem *Positioning* pada Wahana *Multicopter* Menggunakan Metode *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) Berbasis LiDAR dan *Inertial Measurement Unit* (IMU)

Spesifikasi

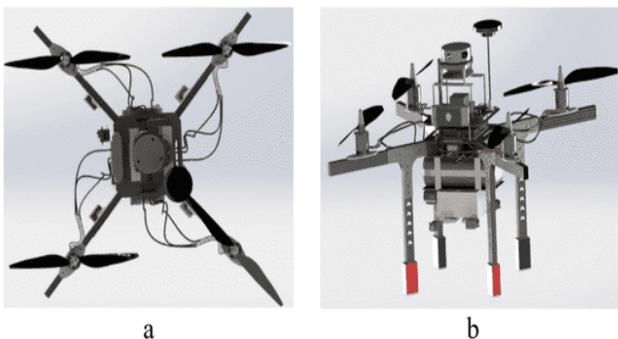
Spesifikasi komponen yang digunakan wahana *Multicopter* sesuai dengan tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen

Komponen	Spesifikasi
FCU (<i>Flight Control Unit</i>)	Hex Cube Black
Sistem Komputer	Nvidia Jetson Nano 4GB
Sensor	RPLiDAR (<i>Rotating Platform Laser Imaging Detection And Ranging</i>) AIM8 dan TFMMini (<i>Time-of-Flight Mini</i>) LiDAR
Propulsi	T-Motor AS2820 (4x)
Propeller	HQProp 12x6 (2xCW dan 2xCCW)
ESC (<i>Electronic Speed Controller</i>)	HobbyWing Platinum 60A (4x)
Power Supply	Baterai LiPo 4S 12.000mAh
Arsitektur Software	Linux Ubuntu 18.04 dan ROS (<i>Robot Operating System</i>) Framework

Desain Mekanik

Multicopter pada penelitian ini menggunakan konfigurasi frame *Quadcopter* atau empat *propeller* dengan model X-frame. Desain mekanik wahana yang digunakan mempunyai konfigurasi 4 motor BLDC (*Brushless Direct Current*) dengan membentuk sudut 45 derajat dengan sumbu X maupun sumbu Y yang bisa dilihat pada Gambar. Untuk *propeller* menggunakan karbon komposit dengan jumlah dan jenis 2X-CW dan 2X-CCW. Untuk desain dari *multicopter* dapat dilihat pada Gambar 2.

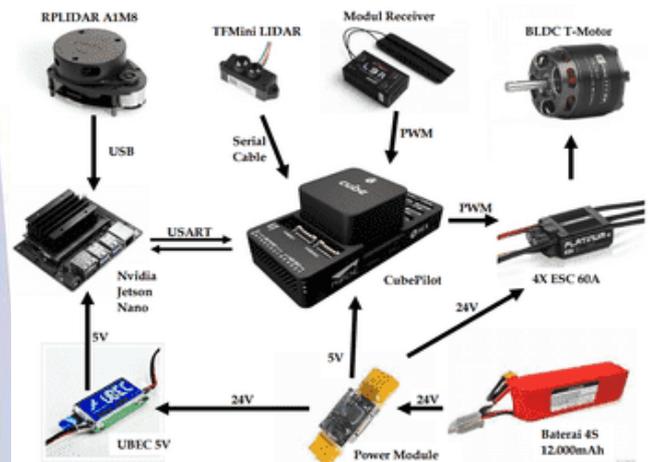


Gambar 2. a. Tampak Atas Wahana, b. Tampak Isometri Wahana

Desain Hardware

Desain Hardware *multicopter* yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada blok diagram pada Gambar 3. Pada penelitian ini *multicopter* menggunakan FCU (*Flight Control Unit*) *CubePilot* sebagai pengontrol penerbangan utama pada *multicopter* yang didalamnya sudah terdapat beberapa sensor salah satunya IMU. FCU menerima

masuk data sensor TFMMini LiDAR untuk data ketinggian dan modul *receiver* untuk penerima dari remot kontrol. FCU memiliki peran penting pada *multicopter* untuk mengirim PWM (*Pulse Width Modulation*) yang selanjutnya dikirim ke ESC pengontrol kecepatan motor sehingga *multicopter* dapat terbang dengan baik. FCU dapat mengirim maupun menerima data dari komponen lain secara *Realtime* sehingga *multicopter* dapat bermanuver secara otonom.

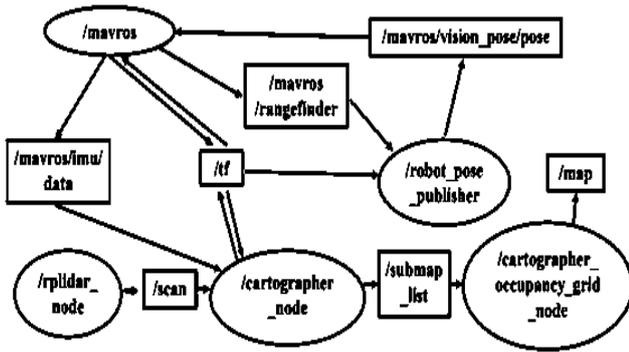


Gambar 3. Skema Elektrikal *Multicopter*

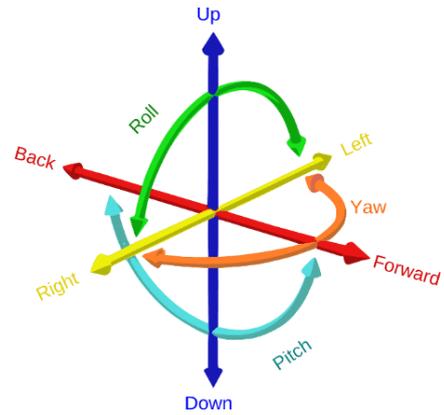
Pengolahan data SLAM pada penelitian ini menggunakan komputer Nvidia Jetson Nano yang menerima masukan data sensor LiDAR 2D dan data FCU. Komunikasi data antara komputer dan FCU menggunakan komunikasi serial atau USART (*Universal Synchronous / Asynchronous Receiver / Transmitter*) sehingga diantaranya bisa melakukan pertukaran data secara *Realtime*. Komputer menerima data sensor IMU dan TFMMini LiDAR dari FCU. Kemudian data dari RPLiDAR 2D dan FCU diproses oleh SLAM dan keluaran datanya dikirimkan ke FCU sebagai data posisi berupa koordinat sehingga *multicopter* dapat menentukan posisinya secara otonom.

Desain Sistem Positioning

Penelitian ini menggunakan Metode SLAM dengan menerapkan algoritma *Google Cartographer*. Pendekatan metode ini berfokus pada optimisasi *graph* dengan pencocokan hasil pemindaian lingkungan yang diperoleh oleh sensor ke *submap* pada estimasi posisi optimal, serta mencocokkan pemindaian hanya pada *submap* terkait pada saat tertentu. Setelah *submap* berhasil terbentuk, dilakukan penutupan *loop* sebagian dengan memanfaatkan posisi cabang dan *grid* yang telah dihitung sebelumnya. Setelah semua *submap* diselesaikan, dilakukan penyusunan peta *global*. Hasil pemetaan dalam penelitian ini digunakan untuk menentukan posisi *multicopter* (*base_frame*) relatif terhadap lingkungan (*map*). Untuk desain sistem positioning terdapat pada Gambar 4.



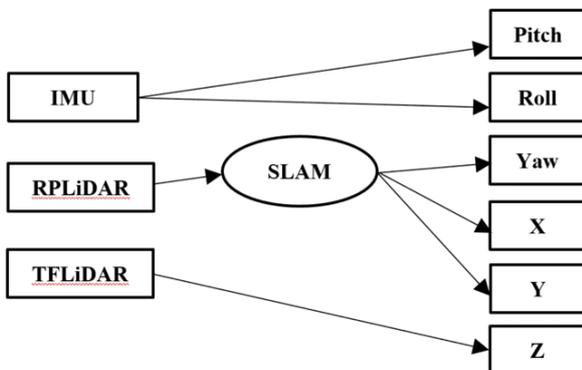
Gambar 4. Desain Sistem *Positioning*
(Keterangan: Persegi = Topik || Oval = Node)



Gambar 6. Referensi 6 *DOF* (Degree Of Freedom)

Komunikasi antara FCU dan Sistem *Positioning* menggunakan MavROS. MavROS merupakan paket perangkat lunak ROS (*Robot Operating System*) yang menyediakan antarmuka UAV yang berjalan dengan protokol Mavlink. ROS sendiri merupakan *framework* robotika yang populer di kalangan peneliti dan pengembang robot. Penggunaan MavROS sangat sesuai karena metode SLAM dari *Google Cartographer* berjalan menggunakan ROS dan FCU yang digunakan menggunakan komunikasi dengan protokol Mavlink.

Desain sistem *positioning* pada penelitian ini menggunakan penggabungan data LiDAR 2D dan IMU menggunakan metode SLAM. Setelah itu, keluaran data SLAM yang berupa data topik *transform (tf)* posisi lokal *multicopter (base_frame)* terhadap posisi *global (map)* diolah oleh *node /robot_pose_publisher* yang menerima data TFMini LiDAR sehingga data tersebut bisa menghasilkan data posisi (x,y,z) dan orientasi (*yaw, pitch, roll*) *multicopter* terhadap *global (map)*. Kemudian data tersebut dikirim melalui topik */mavros/vision_pose/pose* ke *node /mavros*. Semua sistem tersebut berjalan menggunakan sistem komunikasi data pada ROS *Framework*. Untuk alur data 6-DOF dapat dilihat pada Gambar 5. Sedangkan untuk referensi 6-DOF dapat dilihat pada Gambar 6.



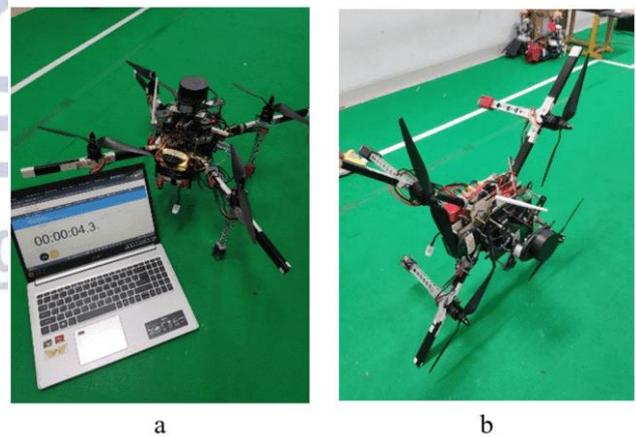
Gambar 5. Alur data antara input dengan output pose 6-DOF

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui hasil dari desain sistem *positioning*, langkah pertama adalah menguji keluaran data dari sensor yang digunakan. Pada penelitian ini, data yang digunakan berasal dari sensor IMU, RPLiDAR, dan TFMini LiDAR. Setelah data sensor diuji dan didapati bahwa nilai *error*-nya kecil, langkah berikutnya adalah menguji hasil SLAM dari algoritma yang digunakan. Kualitas data dari SLAM dapat dilihat dari kualitas pemetaan yang dihasilkan. Selanjutnya, hasil sistem *positioning* dapat diuji dengan mem-plot data posisi dan orientasi wahana terhadap lingkungannya.

Pengujian IMU

Pengujian IMU dari FCU dilakukan untuk mengevaluasi kualitas keluaran data dari sensor. Data tersebut akan diintegrasikan oleh algoritma *Google Cartographer* untuk meningkatkan hasil *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). Proses pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. a. Uji Statis IMU, b. Uji Dinamis IMU

Pengujian IMU dilakukan dengan dua acara, yaitu uji statis dan uji dinamis. Uji statis dilakukan dengan menempatkan wahana pada tempat yang rata dan melakukan perekaman data selama 10 detik dengan frekuensi data 2 Hz. Sedangkan uji dinamis dilakukan dengan menempatkan *multicopter* dengan berbagai orientasi untuk menguji responsnya. Untuk data dari IMU sendiri menggunakan

perbandingan $-1 < \text{data} < 0 < \text{data} < 1$. Untuk hasil uji statis dari IMU dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan untuk uji dinamis dari IMU dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Uji Statis IMU

Time (s)	Pitch	Roll	Yaw
0.5	-0,00389	0,00397	-0,11751
1	-0,00388	0,00398	-0,11808
1.5	-0,00389	0,00403	-0,11855
2	-0,00387	0,00402	-0,11913
2.5	-0,0039	0,00402	-0,11967
3	-0,00395	0,00401	-0,12012
3.5	-0,0039	0,00407	-0,12074
4	-0,00397	0,00411	-0,12129
4.5	-0,004	0,0041	-0,12181
5	-0,00405	0,00411	-0,12233
5.5	-0,00404	0,00415	-0,12281
6	-0,0041	0,00411	-0,12335
6.5	-0,0041	0,00411	-0,12391
7	-0,00414	0,00416	-0,12446
7.5	-0,00414	0,00421	-0,12504
8	-0,00415	0,0042	-0,12553
8.5	-0,00415	0,00423	-0,12603
9	-0,00406	0,00423	-0,12649
9.5	-0,00405	0,0042	-0,12698
10	-0,00401	0,00413	-0,12755
Mean	-0,004012	0,0041075	-0,122569

Dari data yang diperoleh saat pengujian, untuk pengujian statis diperoleh rata-rata untuk *pitch*, *roll* dan *yaw* masing-masing memiliki nilai rata-rata -0.004012, 0.0041075, dan -0.122569. Untuk *Pitch* dan *Roll* memiliki hasil percobaan yang baik karena memiliki nilai *error* yang rendah sehingga bisa digunakan untuk data SLAM. Akan tetapi, untuk *yaw* hasilnya kurang baik. Hal tersebut dapat dilihat pada skala nilai *error* yang berbeda dengan *pitch* dan *roll*. Kemudian data antara waktu 0.5s sampai 10s pada data *yaw* terus mengalami kenaikan secara signifikan sehingga menjadikan alasan bahwa data *yaw* dari IMU kurang baik untuk dijadikan data orientasi *yaw*.

Tabel 3. Hasil Uji Dinamis IMU

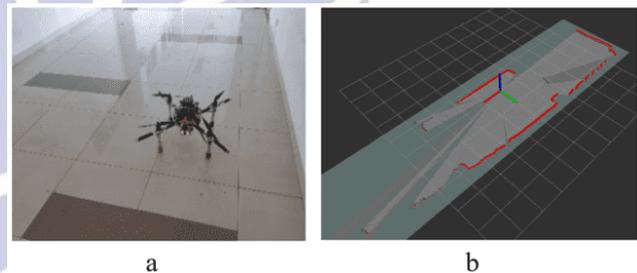
Orientasi	Pitch	Roll
Normal	-0.00314	0.002
Left	0.45724	0.53843
Right	-0.47813	-0.54099
Nosedown	0.5609	0.43808
Noseup	-0.53868	0.42126
Back	0.6651	0.74654

Untuk pengujian dinamis diperoleh hasil yang baik pula. Hal tersebut dapat terlihat pada keluaran datanya ketika kondisi normal yang mendekati 0 (nol). Untuk *left* dan *right*, pengamatan tertuju pada data *roll* yaitu $-1 < \text{right} < 0 < \text{left} < 1$ yang berarti *left* pada skala positif dan *right* pada negatif. Untuk *nosedown* dan *noseup*, pengamatan tertuju pada data *pitch* yaitu $-1 < \text{noseup} < 0 < \text{nosedown} < 1$ yang berarti *nosedown* pada skala positif dan *noseup* pada negatif. Untuk *back* datanya masih belum bisa untuk mendekati 1 atau -1 untuk data *pitch* (0.6651) dan *roll* (0.74654) namun datanya masih bisa dikatakan baik karena nilainya jauh dari data orientasi yang lain.

Dengan hasil data pengujian statis dan dinamis dari IMU didapatkan kesimpulan bahwa IMU dari FCU memiliki kualitas data yang stabil dan baik sehingga bisa digunakan untuk data sistem *positioning*.

Pengujian RPLiDAR

Proses uji keluaran sensor RPLiDAR dilakukan untuk mengetahui data hasil pengukuran jarak objek dari titik pusat sensor LiDAR pada sudut tertentu. Untuk cara pengujiannya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. a. Pengujian RPLiDAR, b. Visualisasi Laserscan RPLiDAR Terhadap Lingkungan

Pada pengujian ini wahana ditempatkan pada sebuah ruangan dan melakukan pengukuran jarak pada sudut tertentu sesuai dengan referensi pembacaan LiDAR. Untuk referensi pembacaan sudut sensor RPLiDAR A1M8 sesuai pada Gambar 9.



Gambar 9. Sudut Referensi RPLiDAR

Untuk mengetahui kualitas data sensor dapat dilakukan dengan membandingkan data sensor dengan kondisi *Real*. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menghitung RMSE (*Root Mean Squared Error*) dari hasil percobaan yang telah dilakukan. Untuk interpretasinya semakin kecil nilai RMSE semakin baik pula hasil percobaannya. Berikut adalah rumus untuk menghitung RMSE pada persamaan 1.

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(Y' - Y)^2}{n}} \quad (1)$$

- Y' = Nilai Prediksi
- Y = Nilai Sebenarnya
- n = Jumlah Data

Tabel 4. Hasil Pengujian RPLiDAR

Sudut (Degree)	<i>Real</i>	RPLiDAR	Selisih Kuadrat
	Jarak (mm)	Jarak (mm)	Jarak (mm)
0	<i>Invalid</i> (0)	<i>Invalid</i> (0)	<i>Invalid</i> (0)
45	3091	3000	8281
90	2250	2200	2500
135	3137	3100	1369
180	5934	5910	576
225	1054	1000	2916
270	773	700	5329
315	1113	1100	169
	<i>Average</i>		2642,5
	RMSE = SQRT(AVERAGE)		51,40525265

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 4, pada sudut 0 derajat RPLiDAR tidak mampu mengukur jarak antara sensor dan target dikarenakan jarak yang diukur melebihi kemampuan pengukuran dari sensor yaitu < 8m. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 yang menampilkan data *laserscan* pada sudut 0 derajat atau depan *multicopter* tidak muncul karena jaraknya yang melebihi batas pengukuran sensor. Dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa RPLiDAR AIM8 memiliki nilai RMSE sebesar 51,40525265 dan jarak pengukuran < 8m sehingga mengindikasikan bahwa sensor memiliki akurasi yang baik sehingga dapat digunakan sebagai sumber data dari metode SLAM.

Pengujian TFMini LiDAR

Pengujian TFMini LiDAR dilakukan untuk mengetahui data hasil pengukuran ketinggian atau jarak wahana terhadap permukaan. Untuk pengujiannya seperti yang ditunjukkan Gambar 10.



Gambar 10. Pengujian TFMini LiDAR

Pada pengujian ini wahana ditempatkan pada permukaan rata dan melakukan pengukuran jarak dengan ketinggian yang bervariasi dan hasilnya dibandingkan dengan pengukuran menggunakan meteran. Untuk hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian TFMini LiDAR

<i>Real</i> (m)	TFMini LiDAR (m)	<i>Error</i>
0,2	0,22	0,0004
0,5	0,52	0,0004
0,75	0,78	0,0009
1	1,05	0,0025
1,5	1,55	0,0025
2	1,96	0,0016
2,4	2,44	0,0016
	<i>Average</i>	0,00185
	RMSE = SQRT(AVERAGE)	0,043011626

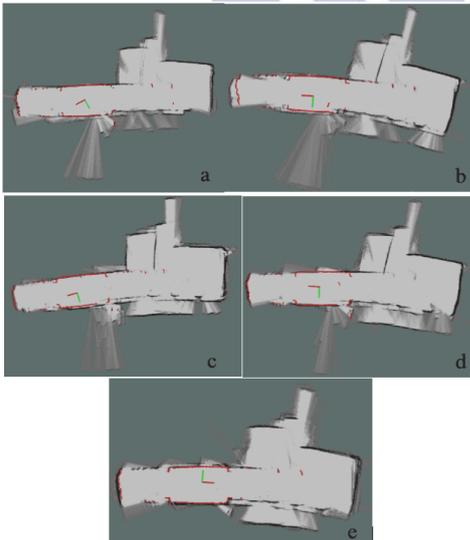
Dari data yang diperoleh saat pengujian, nilai RMSE pada pengujian tersebut sebesar 0,043m. Dari data tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa data yang dihasilkan sudah optimal dan sesuai dengan spesifikasi sensor TFMini LiDAR. Sehingga data sensor tersebut dapat digunakan untuk data ketinggian (z) pada proses selanjutnya.

Pengujian SLAM

Pengujian SLAM dilakukan untuk menguji hasil SLAM dari algoritma *Google Cartographer* yang menggunakan masukan data LiDAR dan IMU. Pengujian dilakukan di lantai empat Gedung *Laboratory Technology and Entrepreneurship*, Universitas Negeri Surabaya. Kondisi lingkungan dan denah tempat pengujian dapat dilihat pada Gambar 11. Pengujian dilakukan dengan membawa wahana *multicopter* mengelilingi ruangan. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali, dengan hasil peta dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 11. Lokasi Pengujian Sistem *Positioning* Dari Segala Sisi



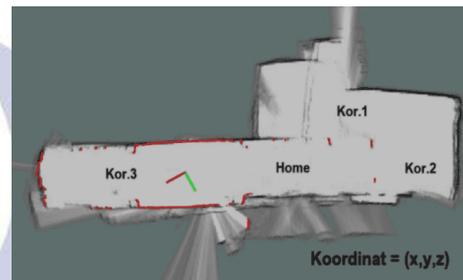
Gambar 12. Hasil *Mapping* SLAM Google *Cartographer*

Pada hasil *mapping* yang terbentuk, terdapat sedikit ketidakcocokan antara kelima *map* yang terbentuk. Hal tersebut diindikasikan dengan membeloknya hasil *mapping*. Pembelokan itu terjadi ketika wahana melintasi daerah yang dekat dengan kaca, sehingga pada saat memasuki daerah tersebut terbentuklah noise pada peta dikarenakan adanya pembiasan cahaya yang mengganggu cahaya laser dari sensor RPLiDAR sehingga sensor mendeteksi objek diluar dinding kaca. Pembelokan map juga terjadi ketika wahana *multicopter* berbelok. Hal itu disebabkan pembacaan perbandingan data dari LiDAR dengan informasi orientasi dari IMU memiliki frekuensi pengiriman yang berbeda. Hal tersebut menyebabkan kesalahan pencocokan pemindaian pada saat membentuk *submap* ketika wahana berbelok dengan cepat sehingga terjadi pembelokan hasil *map*.

Pengujian Sistem *Positioning*

Pengujian sistem *positioning* atau penentuan posisi dilakukan untuk menguji hasil dan akurasi keluaran data koordinat (x, y, z) dan orientasi (*pitch*, *roll*, *yaw*) dari sistem *positioning* yang telah dibuat.

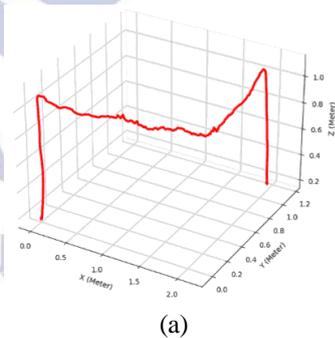
Pengujian ini dilakukan dengan menerbangkan wahana *multicopter* ke titik koordinat yang telah ditentukan. *Multicopter* diterbangkan secara *autonomous* tanpa dikendalikan oleh pilot untuk membuktikan tingkat akurasi dari data dari sistem *positioning* yang diperoleh. Untuk lokasi koordinat yang dituju dapat dilihat pada Gambar 13.



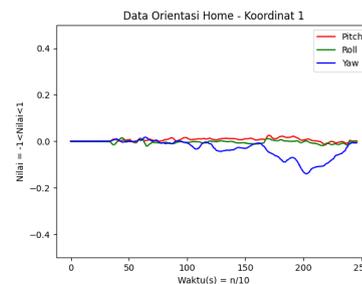
Home = (0,0,0) | Kor.1 = (2,1,0) | Kor.2 = (5,1.5,0) |
Kor.3 = (-9,0,0)

Gambar 13. Titik Koordinat Tujuan Pada Peta

Pada saat *multicopter* terbang, dilakukan perekaman data posisi dan orientasi yang selanjutnya data tersebut dilakukan *plotting* untuk mengetahui kualitas data dan lintasan terbang (trajektori) yang dilalui *multicopter* untuk terbang ke koordinat yang ditentukan. Untuk hasil *plotting* trajektori dan orientasi dapat dilihat pada Gambar 14 sampai 18.

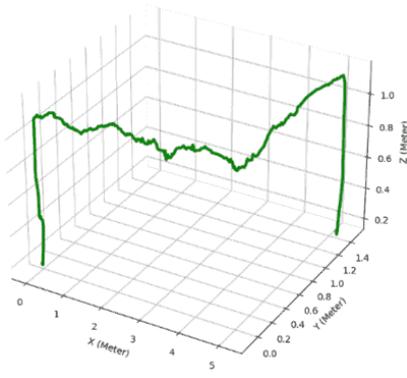


(a)

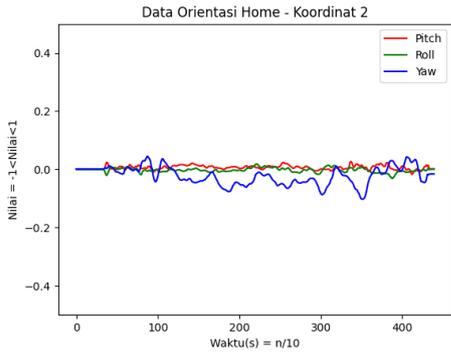


(b)

Gambar 14. Hasil *Plot* (a). Posisi (b). Orientasi Home ke Koordinat 1

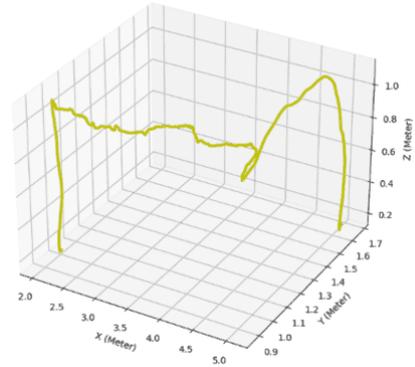


(a)

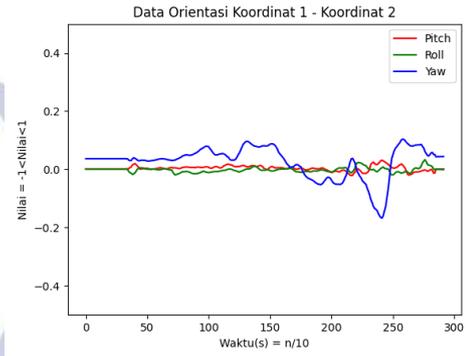


(b)

Gambar 15. Hasil *Plot* (a). Posisi (b). Orientasi Home ke Koordinat 2

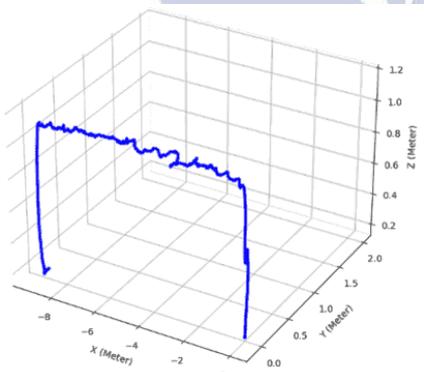


(a)

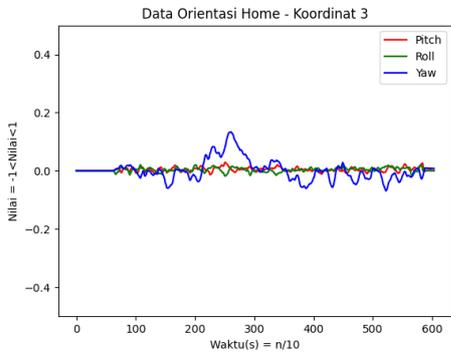


(b)

Gambar 17. Hasil *Plot* (a). Posisi (b). Orientasi Koordinat 1 ke Koordinat 2

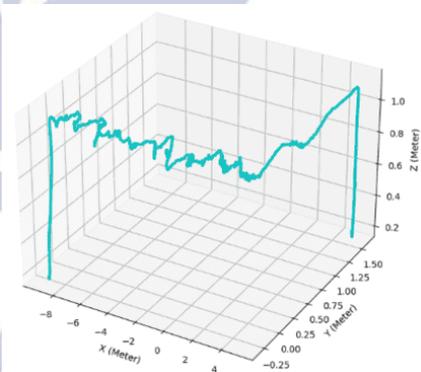


(a)

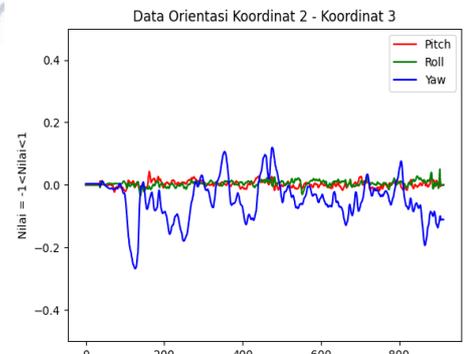


(b)

Gambar 16. Hasil *Plot* (a). Posisi (b). Orientasi Home ke Koordinat 3



(a)



(b)

Gambar 18. Hasil *Plot* (a). Posisi (b). Orientasi Koordinat 2 ke Koordinat 3

Berdasarkan hasil *plot* data *positioning*, dapat dilihat untuk data *positioning* yang menghasilkan trajektori yang baik ditandai dengan awal *takeoff* sampai *landing* di koordinat yang sesuai. Untuk hasil RMSE antara koordinat *takeoff* dengan koordinat *landing* pada Tabel 6 juga memiliki hasil yang baik pula dengan nilai RMSE x, y, dan yaw masing-masing sebesar 76, 125,47, dan 0,04 untuk satuan x dan y ialah mm dan yaw perbandingan $-1 < \text{data} < 1$.

Untuk hasil *plot* data orientasinya sendiri menghasilkan hasil yang baik dan stabil ditandai dengan rata-rata datanya selalu di nilai nol (0). Akan tetapi masih ada sedikit kekurangan pada data orientasi yaw memiliki keluaran yang belum bisa stabil seperti *pitch* dan *roll*. Hal tersebut dikarenakan pada saat *multicopter* bermanuver, data *pitch* dan *roll* memiliki kecepatan transfer data yang lebih cepat dibandingkan data yaw dikarenakan data *pitch* dan *roll* langsung diproses oleh FCU sedangkan data yaw sendiri harus diolah oleh proses SLAM.

Tabel 6. Perbandingan Posisi Real Dengan Data Positioning (Error/RMSE)

Trajektori	Real			Data Positioning			Error = (Real-Data) ²		
	x (mm)	y (mm)	yaw	x (mm)	y (mm)	yaw	x (mm)	y (mm)	yaw
H-Kor1	0	0	0,00	-7	5	1	49	21	0,00
	2.000	1.000	0,00	1.942	1.167	-7	3.384	28.032	0,00
H-Kor2	0	0	0,00	-7	-9	1	50	86	0,00
	5.000	1.500	0,00	5.183	1.405	-16	33.565	8.983	0,00
H-Kor3	0	0	0,00	-12	1	0	135	1	0,00
	9.000	0	0,00	9.111	70	8	12.291	4.926	0,00
Kor1-2	2.000	1.000	0,00	2.029	991	37	848	89	0,00
	5.000	1.500	0,00	5.054	1.640	44	2.917	19.541	0,00
Kor2-3	5.000	1.500	0,00	5.065	1.589	4	4.206	7.871	0,00
	9.000	0	0,00	8.982	-296	111	317	87.869	0,01
Average							5.776	15.742	0,00
RMSE = SQRT(AVERAGE)							76,00	125,47	0,04

PENUTUP Simpulan

Penggunaan sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*) dan IMU (*Inertial Measurement Unit*) untuk sistem *positioning* pada wahana *multicopter* dengan metode SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) telah membuktikan kapabilitasnya dalam meningkatkan sistem *positioning*. Melalui penelitian ini dapat disimpulkan bahwa data keluaran dari sistem *positioning* ini memiliki kualitas data yang baik dan akurat. Hal itu untuk ditandai dengan hasil RMSE yang kecil antara kondisi *Real* dengan data posisi yang masing-masing untuk x,y,dan yaw ialah 76, 125.47, dan 0,04. Kemudian untuk data orientasi yaitu *pitch* dan *roll* memiliki tingkat kestabilan yang baik juga. Untuk data orientasi yaw sendiri masih bisa dikatakan baik karena memiliki tingkat akurasi sebesar 0.2 jika dijadikan

skala derajat masih <45 derajat. Berdasarkan hasil percobaan, metode ini terbukti mampu melakukan pemetaan lokasi sekitar wahana serta dapat melakukan estimasi posisi dan orientasi dengan akurasi tinggi tanpa ada bantuan sensor GNSS. Oleh karena itu, dengan menerapkan sistem *positioning* menggunakan metode SLAM berbasis LiDAR dan IMU memiliki potensi besar untuk meningkatkan kinerja dan kestabilan pengoperasian wahana *multicopter* dalam berbagai macam kondisi lingkungan

Saran

Setelah melakukan penelitian, terdapat beberapa saran guna mengembangkan sistem ini. Pertama, penelitian ini belum bisa melakukan pergantian data antara SLAM dan GNSS. Oleh karena itu, diharapkan fitur ini dapat diwujudkan di masa depan. Kedua, kualitas SLAM dapat ditingkatkan dengan menggunakan sensor yang lebih canggih, mengingat sensor yang digunakan dalam penelitian ini masih tergolong murah.

DAFTAR PUSTAKA

- Balaei, Asghar Tabatabaei., dan Dempster, Andrew G. (2009). *A Statistical Inference Technique for GPS Interference Detection*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 45(4), 1499–1511.
- Borenstein, Johann., Everett, H. R., Feng, L., dan Wehe, D. (1997). *Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques*. Journal of Robotic Systems, 14(4), 231–249.
- Dill, Evan T., dan Uijt de Haag, Maarten. (2016). *3D Multi-Copter Navigation and Mapping Using GPS, Inertial, and LiDAR*. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 63(2), 205–220.
- Fikri, Achmad Akmal., dan Anifah, Lilik. (2021). *Mapping and Localization System pada Mobile Robot Menggunakan Metode SLAM Berbasis LiDAR*. Journal Information Engineering and Educational Technology. ISSN, 2549, 869X.
- Filipenko, Maksim., dan Afanasyev, Ilya. (2018). *Comparison of Various SLAM Systems for Mobile Robot in an Indoor Environment*. 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), 400–407.
- Hess, Wolfgang., Kohler, Damon., Rapp, Holger., dan Andor, Daniel. (2016). *Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM*. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1271–1278.
- Huang, Baichuan., Zhao, Jun., dan Liu, Jingbin. (2019). *A Survey of Simultaneous Localization and Mapping With an Envision in 6G Wireless Networks*. ArXiv Preprint ArXiv:1909.05214.
- Karam, Samer., Lehtola, Ville Valtteri., dan Vosselman, George. (2020). *Strategies To Integrate IMU and LiDAR SLAM for Indoor Mapping*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1, 223–230.
- Li, Jiaxin., Bi, Yingcai., Lan, Menglu., Qin, Hailong., Shan, Mo., Lin, Feng., dan Chen, Ben. M. (2016). *Real-*

- time Simultaneous Localization and Mapping for UAV: A Survey*. Proc. of International Micro Air Vehicle Competition and Conference, 2016, 237.
- Mossel, Annette., Leichtfried, Michael., Kaltenriner, Christoph., dan Kaufmann, Hannes. (2014). *SmartCopter: Enabling Autonomous Flight in Indoor Environments With a Smartphone as On-Board Processing Unit*. International Journal of Pervasive Computing and Communications, 10(1), 92–114.
- Singh, O. Guneshwor. (2015). *Self-Navigating Quadcopter*. International Journal of Computer Science and Information Technologies, 6(3), 2761–2765.
- Vanelli, Brunno. (2019). *Comparison and Benchmarking for SLAM In Mobile Robots*. Automation and Control Engineering of the Universidade Federal de Santa Catarina.
- Yagfarov, Rauf., Ivanou, Mikhail., dan Afanasyev, Ilya. (2018). *Map Comparison of Lidar-Based 2D SLAM Algorithms Using Precise Ground Truth*. 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 1979–1983.
- Yigit, Cihat Bora., dan Altug, Erdinc. (2012). *Visual Attitude Stabilization of a Unmanned Helicopter in Unknown Environments With an Embedded s-Single-Board Computer*. 2012 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments Proceedings, 49–54.
- Zhi, Cui., dan Xiumin, Shi. (2019). *Research on Cartographer Algorithm Based on Low Cost Lidar*. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 8(10)

