

PERANCANGAN SISTEM KOORDINASI DAN KENDALI FORMASI UAV QUADROTOR UNTUK OPTIMALISASI MITIGASI BENCANA

Ishak Hilton Pujantoro Tnunay¹, Muhammad Qodar Abdurrohman², Ahmad Ataka Awwalur Rizqi³, Muhammad Faris⁴, Dwi Retno Puspita Sari⁵

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Email: ishak.hilton.p.t@mail.ugm.ac.id

² Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Email: muhammad.qodar.a@mail.ugm.ac.id

³ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Email: ahmad.ataka.a.r@mail.ugm.ac.id

⁴ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Email: muhammad.faris@mail.ugm.ac.id

⁵ Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Email: dwi.retno.p.s@mail.ugm.ac.id
rachmawati.ranny@yahoo.com

Abstract

Indonesia is located between 2 continental plates in which causes the disaster often happens. One of the solution to encounter the mapping and searching after disaster is employing UAV robots. Quadrotor is one of these underlying robots that widely used due to its highly maneuverability, cheap, and less run-way. Instead of using single quadrotor which is less efficient and needs more time, we use multi-quadrotor system. These agents will coordinate to each other and form a formation, thereby it can be used to optimize the disaster monitoring process by multi-quadrotor. This work begins as follows: The study of formation and coordination of multi UAV system. Afterwards, we design the path-planning and formation control algorithm based on potential fields for Quadrotor. Otherwise, we also employ visual navigation method combined with GPS in quadrotor to obtain its global position. In simulation, it can be showed that our approach works well. in the future we will apply it entirely in real quadrotor. Moreover, the results of this research have been published in some

international conference, even receive a best paper award as well.

Keywords: *Disaster Monitoring, Quadrotor, Visual Navigation, Path Planning, Formation Control*

1. PENDAHULUAN

Sebagai negara yang terletak pada pertemuan lempeng tektonik Pasifik, Eurasia, dan Australia, dan berada pada daerah Cincin Api (Ring of Fire), Indonesia memiliki kurang lebih 150 gunung berapi aktif yang berpotensi erupsi setiap tahunnya. Selain itu, pada tahun 2010 saja, Indonesia mengalami 100 gempa di atas 5 SR. Wahyu Triyoso, ahli gempa dari Institut Teknologi Bandung, juga menyebutkan bahwa sudah terjadi lebih dari 800 gempa di atas 5 SR sejak tahun 2004, termasuk gempa dan tsunami di Aceh yang menewaskan 230.000 korban jiwa dari 14 negara. Bencana banjir juga sudah seperti rutinitas di beberapa lokasi di Indonesia, termasuk yang terjadi di Jakarta awal 2013 ini (www.bbc.co.uk, 2013).

Kondisi Indonesia yang sering dilanda bencana telah mendorong berbagai peneliti untuk terus mengembangkan sistem penanganan bencana, baik di tahap pencegahan maupun pemulihan pasca bencana. Salah satu topik penelitian di bidang ini adalah pemanfaatan teknologi elektronika dan informatika, khususnya robotika, untuk mengoptimalkan penanganan bencana.

Salah satu teknologi robotika yang kini tengah dioptimalkan untuk penanganan bencana adalah UAV (Unmanned Aerial Vehicle), baik jenis pesawat (fixed wing) ataupun jenis copter. Seperti dipaparkan oleh Adams, UAV telah digunakan untuk pengambilan citra wilayah bencana saat terjadi badai Katrina, Wilma, dan Ike di Amerika, badai Morakot di Taiwan, gempa di L'Aquila dan Haiti. Sayangnya, teknologi UAV ini belum diaplikasikan untuk penanganan bencana di Indonesia.

Dalam beberapa tahun terakhir, mulai bermunculan usaha-usaha untuk lebih mengoptimalkan lagi peran UAV dalam penanganan bencana, seperti untuk pemetaan dan penyisiran korban pasca bencana. Dengan semakin meluasnya dampak bencana dewasa ini, riset di bidang kendali koordinasi dan

formasi multi UAV menjadi semakin penting mengingat ketidakefisienan kinerja satu UAV untuk membantu proses penanganan bencana. Oleh karena itu, mutlak diperlukan perancangan sistem koordinasi dan kendali formasi multi UAV agar kinerja antar UAV tidak saling mengganggu dan dapat berjalan seoptimal mungkin.

Pada penelitian ini, dilakukan perancangan dan pengujian algoritma sistem koordinasi dan kendali formasi pada beberapa quadrotor, sebagai model penanganan bencana berbasis multi UAV. Quadrotor dipilih karena kemudahannya dalam bermanuver, termasuk kemampuan terbang diam pada ketinggian tertentu (hovering), ketidaktergantungannya pada keberadaan lintasan lepas landas. Melalui penelitian ini, diharapkan akan mendapatkan algoritma yang efektif untuk sistem koordinasi dan kendali formasi Quadrotor sehingga nantinya dapat diaplikasikan dalam penanganan bencana di Indonesia.

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan algoritma yang efektif untuk menghasilkan sistem multi Quadrotor yang saling berkoordinasi dan mampu membentuk formasi sesuai dengan yang diinginkan untuk mengoptimalkan penanganan bencana.

Mitigasi adalah serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana maupun untuk mengurangi risiko dan dampak yang diakibatkan oleh bencana terhadap masyarakat yang berada pada kawasan rawan bencana. Ada beberapa hal yang merupakan dasar dalam perancangan UAV dan sistem formasinya yang digunakan dalam penelitian.

Berdasarkan definisinya, navigasi merupakan proses untuk mengetahui posisi dan kecepatan dari suatu objek. Navigasi dapat dilakukan secara visual menggunakan satu (monocular) kamera atau dikenal sebagai Monocular SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Monocular SLAM yang kami gunakan adalah yang berbasis keyframe atau disebut PTAM (Parallel Tracking and Mapping). Algoritma ini dapat digunakan untuk membuat peta dari lingkungan sekitar robot kemudian

mengestimasi posisi quadrotor tersebut. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Engel J. Sturm, et al (Engel, 2012), didapatkan implementasi PTAM pada Parrot AR Drone yang datanya digabungkan dengan perhitungan Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor.

2. Path Planning

Path planning atau perencanaan jalur merupakan proses untuk merencanakan lintasan yang paling efektif dari sebuah objek yang bergerak menuju ke titik tujuan tanpa menabrak rintangan-rintangan yang ada. Terdapat berbagai macam algoritma yang dapat digunakan untuk melakukan path planning misalnya jaringan syaraf tiruan. Jaringan syaraf tiruan tersebut memiliki kelebihan dalam akurasi perhitungannya, namun memiliki komputasi yang cukup kompleks.

Selanjutnya, algoritma potential fields digunakan oleh Khatib pada penelitian sebelumnya tentang path planning pada mobile robot (Khatib, 1985). Berdasarkan penelitian sebelumnya, didapatkan bahwa algoritma ini memberikan hasil yang baik dengan persamaan yang sederhana dan cukup mudah untuk diaplikasikan, khususnya pada quadrotor dengan adanya sedikit modifikasi.

Kemudian pada penelitian lainnya, Y Hwang (Hwang, 1992) menggunakan algoritma potential fields ini juga untuk path planning dan mendapatkan hasil yang baik pula. Pada penelitian selanjutnya, Koren. J menentukan batasan-batasan yang diperlukan dalam menggunakan algoritma potential fields untuk path planning (Koren, 1991).

3. Kendali Formasi

Kendali formasi dapat dikatakan sebagai hal yang sulit dalam bidang robotika. Kendali formasi adalah proses pengendalian banyak objek untuk membentuk formasi dari titik acak dan mempertahankan bentuk formasi tersebut. Duan H telah menggunakan algoritma kendali formasi pada penelitiannya dan berhasil mengoptimalkan kendali formasi multi robot terbang atau UAV (Duan, 2013).

Algoritma yang ada untuk kendali formasi antara lain behavioral approach, leader follower dan virtual leader. Behavioral approach memberikan banyak keuntungan

jika digunakan sebagai kendali formasi, yaitu kendali didistribusikan ke setiap robotnya, ketika ada tambahan robot, maka ada self-configuration dalam kendalinya. Namun memiliki kelemahan yaitu dalam analitis matematisnya yang sangat kompleks dan sensitif.

Sedangkan algoritma leader follower memiliki kekurangan ketika terdapat error atau hilang pada robot yang menjadi pemimpin tersebut, maka formasi akan menjadi kacau karena tidak ada pemimpin untuk formasi tersebut.

Algoritma selanjutnya yang dapat digunakan sebagai pengendali formasi adalah virtual leader, dimana memberikan suatu titik virtual sebagai pemimpin, bukan menunjuk salah satu robot. Sehingga sistem tersebut akan stabil dan tidak error sepanjang komunikasi dengan ground segment atau stasiun utama tetap ada.

2. METODE

Penelitian dilaksanakan bulan Februari 2014 – Juli 2014 dengan bertempat di Laboratorium Instrumentasi dan Kendali, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Literature Review. Studi literatur dilakukan untuk membandingkan algoritma path planning dan kendali formasi yang paling banyak digunakan pada mobile robot dan bisa menghasilkan hasil yang konvergen, yaitu potential fields. Algoritma ini menjadi acuan untuk melakukan path planning dan kendali formasi untuk banyak Quadrotor. Selain itu telah dilakukan studi literatur tentang navigasi visual untuk dapat menentukan koordinat posisi dari Quadrotor, didapatkan algoritma PTAM.

Desain Algoritma. Desain algoritma dilakukan berdasarkan penelitian sebelumnya tentang path planning yaitu dengan algoritma potential fields. Berdasarkan penelitian sebelumnya, algoritma ini diimplementasikan pada robot darat, sehingga dilakukan pengembangan algoritma potential fields yang semua untuk robot darat menjadi potential fields untuk robot terbang atau dalam penelitian ini menggunakan Quadrotor. Perancangan algoritma navigasi visual juga

dilakukan untuk dapat diimplementasikan pada Quadrotor, baik menggunakan kamera depan ataupun kamera bawah.

Simulasi. Setelah melakukan perancangan algoritma yang digunakan, maka dilakukan verifikasi algoritma dengan simulasi pada MATLAB, ROS dan Gazebo. Tujuan melakukan simulasi adalah untuk mengurangi risiko kerusakan dari kesalahan perancangan.

Hasil Konvergen. Ketika hasil simulasi dan implementasi sudah berhasil mendapatkan nilai yang konvergen, maka langkah selanjutnya yang dilakukan adalah publikasi hasil pada konferensi paper maupun jurnal dan implementasi. Namun ketika hasil yang diperoleh belum sesuai yang diperlukan, maka kembali ke perancangan algoritma.

Implementasi. Implementasi dilakukan setelah simulasi berhasil mendapatkan hasil yang konvergen. Bagian yang diimplementasikan adalah navigasi visual, kemudian path planning dan yang terakhir adalah kendali formasi. Saat melakukan implementasi, ada faktor yang harus benar-benar diperhatikan yaitu protokol komunikasi antara Quadrotor dengan ground segment yang menjadi pengendali utama.

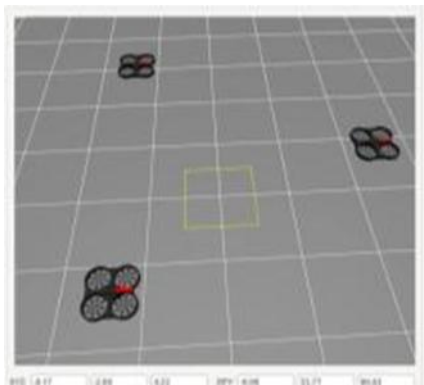
Publikasi. Publikasi ini dapat dilakukan setelah mendapatkan hasil dari simulasi maupun dari implementasi. Publikasi dilakukan dengan mengirimkan paper atau jurnal ke konferensi paper yang ada. Tujuan dari publikasi ini adalah agar hasil penelitian yang telah dilakukan bisa dikembangkan pada penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan navigasi visual dengan PTAM, *path planning* ataupun kendali formasi.

Variabel Penelitian.

Navigasi Visual. Variabel yang diteliti pada navigasi visual PTAM ini adalah jumlah fitur dari citra lingkungan yang didapatkan dari kamera. Kamera yang terdapat pada quadrotor digunakan untuk mengambil citra lingkungan, kemudian melakukan analisis pengolahan citra untuk mengolah nilai pixel dari citra lingkungan. Pengolahan citra digunakan untuk mendapatkan koordinat posisi quadrotor.

Path Planning dan Kendali Formasi.

Selanjutnya, variabel yang diteliti pada bagian path planning dan kendali formasi ini adalah posisi dan orientasi dari setiap quadrotor. Sehingga yang diteliti atau diproses dengan algoritma yang ada yaitu posisi dan orientasi setiap quadrotor tersebut. Ketika melakukan simulasi, data posisi dan orientasi didapatkan dari Software ROS dan Gazebo. Sedangkan pada saat implementasi, posisi dan orientasi quadrotor didapatkan dari hasil navigasi visual.



Gambar 1. Simulasi di Gazebo yang menunjukkan posisi x, y, z Quadro

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

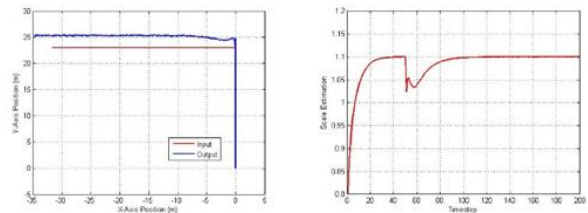
3.1 Algoritma

Navigasi Visual dengan metode PTAM (Parallel Tracking And Mapping). Navigasi PTAM yang kami aplikasikan ini dapat digunakan untuk membuat peta dari lingkungan sekitar robot dan mengestimasi posisi Quadrotor relatif terhadap peta ini.

Data posisi quadrotor kemudian digunakan sebagai parameter untuk proses fusi data dengan data kecepatan dan akselerasi dari sensor optical flow dan inertial menggunakan algoritma Extended Kalman Filter. Selain itu, kami juga melengkapi quadrotor dengan GPS untuk menghasilkan data global.

Beberapa keuntungan dari navigasi visual dan konsep fusi data diantaranya adalah peningkatan akurasi data dan kalibrasi inter sensor untuk eliminasi drift. Penggunaan GPS

memberi sistem koordinat global serta menanggulangi loss visual tracking. Algoritma SLAM dengan PTAM yang telah dimodifikasi ini dapat digunakan sebagai sistem navigasi pada Quadrotor, bahkan di lingkungan yang belum dikenal sebelumnya. Hasil eksperimen kami untuk estimasi posisi quadrotor dengan jalur 'L' beserta skalanya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Simulasi gerakan Quadrotor membentuk 'L' dan skalanya

Path Planning dengan Metode Potential Field. Pada penelitian ini, path planning dilakukan dengan menggunakan metode potential field karena sederhana, elegan, dan mudah digunakan.

Konsep potential field Secara sederhana dapat dijelaskan sebagai berikut. Quadrotor dapat dianggap sebagai muatan listrik positif. Kemudian titik yang dituju digambarkan sebagai muatan listrik negatif sehingga Quadrotor akan menuju ke titik tujuan mengikuti Hukum Coulomb yang menjelaskan bahwa muatan listrik berbeda akan tarik-menarik. Agar Quadrotor tidak menabrak rintangan di perjalanan, setiap rintangan juga dianggap sebagai muatan positif yang akan menolak Quadrotor menjauhi rintangan.

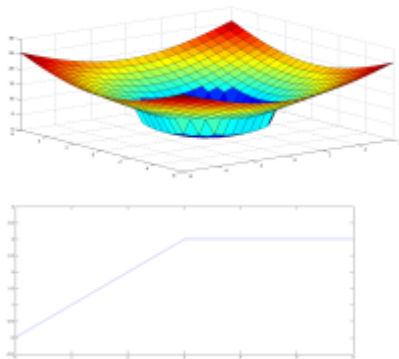
Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, dilakukan modifikasi pada metode potential field yang dilakukan oleh Khatib (Khatib, 1985) pada penelitiannya. Metode Khatib dipilih karena sederhana dan bisa mendapatkan hasil yang konvergen dalam waktu yang cepat. Modifikasi dilakukan dengan membatasi nilai medan potensialnya dengan menimbang model Quadrotor yang kecepatan horizontalnya terbatas.

Secara garis besar, dua behavior utama pada path planning adalah *go-to-goal* dan menghindari rintangan (*obstacle avoidance*).

Go-to-Goal. Bentuk potential function untuk go-to-goal seperti digambarkan pada Gambar 3a. Persamaan *potential field*-nya seperti tertulis pada Persamaan di bawah.

$$F_{x_d}(\mathbf{x}) = \begin{cases} -k(\mathbf{x} - \mathbf{x}_d) & \text{if } \mathbf{x} < \mathbf{x}_d + \mathbf{x}_1 \\ -k|\mathbf{x}_1| \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_d)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_d|} & \text{if } \mathbf{x} > \mathbf{x}_d + \mathbf{x}_1 \end{cases}$$

Gambar 3b menunjukkan nilai potential field go-to-goal sebagai fungsi jarak antara Quadrotor dan tujuan. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa ketika jarak antara quadrotor dan titik tujuan cukup dekat, maka gaya tarik menarik yang dihasilkan berbanding lurus dengan jarak. Sedangkan ketika jaraknya melebihi nilai tertentu, gaya tarik menariknya dibatasi konstan. Menghindari Rintangan (Obstacle Avoidance).



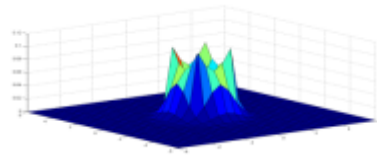
Gambar 3a-3b. Potential function dan grafik potential field untuk Go-to-Goal

Bentuk potential function untuk menghindari rintangan seperti digambarkan pada Gambar 4a. Persamaan potential field-nya seperti tertulis pada Persamaan di bawah.

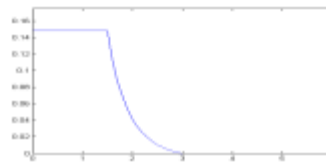
$$F_O(\rho) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{(\rho_m)^2} \rho & \text{if } \rho < \rho_m \\ \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho}{\rho^3} & \text{if } \rho_m < \rho < \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho > \rho_0 \end{cases}$$

Gambar 4b menunjukkan nilai potential field obstacle avoidance sebagai fungsi jarak antara Quadrotor dan tujuan. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa ketika jarak

antara Quadrotor dan titik tujuan cukup dekat, maka gaya tolak yang dihasilkan berbanding terbalik dengan jarak. Ketika jaraknya melebihi nilai tertentu, gaya tolaknya bernilai nol. Sedangkan, ketika jaraknya kurang dari



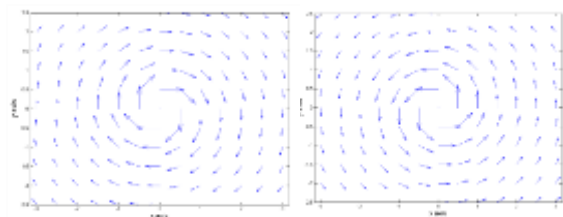
nilai tertentu, gaya tolaknya bernilai konstan.



Gambar 4a-4b. Potential Function dan Grafik Potential Field untuk Menghindari Rintangan

Melewati Local Minima. Salah satu tantangan yang dihadapi dalam *path planning* suatu robot adalah local minima, yaitu titik potensial selain tujuan yang memiliki medan potensial paling rendah dari pada titik di sekitarnya. Akibatnya, robot terperangkap di titik local minima ini sebelum mencapai tujuan.

Pada penelitian ini, dirancang algoritma yang akan digunakan pada saat Quadrotor terjebak di local minima, yaitu dengan menggunakan medan potensial yang berarah mengelilingi rintangan. Akibatnya, saat terjebak di local minima, Quadrotor akan bergerak mengelilingi rintangan di dekatnya (metode wall-following) dan keluar dari local minima. Ilustrasi medan potensial ini



ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5. Bentuk Potential Field untuk Menghindari Local Minima


Besar gaya pada metode ini seperti ditunjukkan pada persamaan:

$$F_{VW}(\rho) = \zeta \frac{1}{\rho + \epsilon}$$

Metode yang sama juga diterapkan pada kendali formasi, yaitu *potential field*.

Virtual Leader. Pada penelitian ini, digunakan algoritma virtual leader untuk mengendalikan gerak formasi. Pusat pengendali cukup mengendalikan virtual leader ini menuju titik tujuan sedangkan setiap Quadrotor dalam formasi akan menjaga jarak relatif masing-masing dengan virtual leader sesuai konfigurasi formasi yang diinginkan.

Pembentukan dan Perubahan Bentuk Formasi. Pada penelitian ini, dicoba dua buah bentuk formasi, yaitu lingkaran dan garis. Untuk tiap konfigurasi, masing-masing Quadrotor memiliki titik tujuan dengan jarak dan orientasi tertentu terhadap virtual leader.

$$\begin{aligned} x_{d,i} &= R \cos\left(\frac{2\pi i}{n}\right) + x_{vl} & x_{d,i} &= iD \sin(\gamma) + x_{vl} \\ y_{d,i} &= R \sin\left(\frac{2\pi i}{n}\right) + y_{vl} & y_{d,i} &= iD \cos(\gamma) + y_{vl} \end{aligned}$$


Gambar 6. Persamaan Formasi Lingkaran dan Garis

Tiap Quadrotor kemudian diberi medan potensial go-to-goal menuju posisi masing-masing pada formasi serta diberi medan potensial obstacle avoidance agar tidak bertabrakan dengan Quadrotor yang lain. Pada Gambar 6a, virtual leader terletak di tengah formasi sedangkan pada Gambar 6b, posisi virtual leader berimpit dengan Quadrotor kanan.

Alasan dibentuknya formasi lingkaran dan garis adalah agar dapat menyesuaikan medan di daerah bencana. Ketika dalam ruangan luas, dapat digunakan bentuk formasi lingkaran. Sedangkan untuk bentuk formasi garis dapat digunakan saat Quadrotor berjalan di lorong yang sempit.

Mempertahankan Formasi. Ini adalah langkah terakhir dari kendali formasi, yaitu mengkombinasikan antara medan potensial pada proses path planning dan medan potensial pada proses pembentukan formasi. Hasilnya adalah superposisi medan potensial yang akan membuat tiap Quadrotor bergerak dalam formasi sekaligus menghindari rintangan di sekitarnya.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_{\text{path-planning}} + \mathbf{F}_{\text{formation}}$$

3.2 Simulasi

Sebelum dilakukan implementasi, algoritma yang telah dirancang diujikan di simulasi terlebih dahulu. Digunakan Simulator Gazebo seperti pada Gambar 7, yang menyediakan Model Quadrotor Parrot AR Drone 2.0. Algoritma kemudian dijalankan melalui program bahasa C++ pada Robot Operating System. Beberapa simulasi yang dijalankan adalah uji coba *go-to-goal*, menghindari rintangan, melewati local minima, pembentukan formasi garis dan lingkaran, serta mempertahankan formasi.

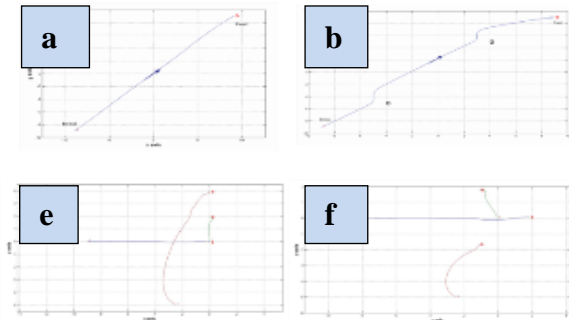


Gambar 7. Simulator Gazebo 2.0

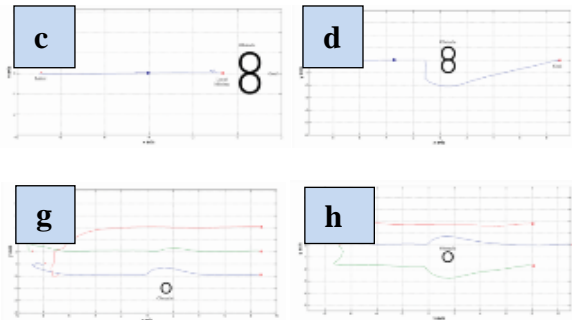
Untuk proses evaluasi hasil, data posisi dari tiap Quadrotor yang didapat dari Simulator Gazebo disimpan dan diplot dengan perangkat lunak MATLAB. Hasilnya ditampilkan dalam bentuk lintasan 2 dimensi agar lebih mudah diamati. Hasilnya dapat diamati pada gambar 8a-8h.

Dari lintasan Quadrotor pada Gambar 8a hingga 8d dapat disimpulkan bahwa algoritma path planning telah bekerja dengan baik. Quadrotor mampu bergerak menuju tujuan dengan efektif tanpa menabrak rintangan yang menghalanginya. Pada Gambar 8c-8d, Quadrotor pada awalnya titik local minima. Akibatnya, Quadrotor akan menggunakan metode *wall-following* untuk mengelilingi rintangan, keluar dari local minima, dan meluncur menuju titik tujuan.

Dari lintasan pada Gambar 8e hingga 8h, terlihat bahwa kendali formasi juga bekerja dengan baik. Pada gambar 8e dan 8f,



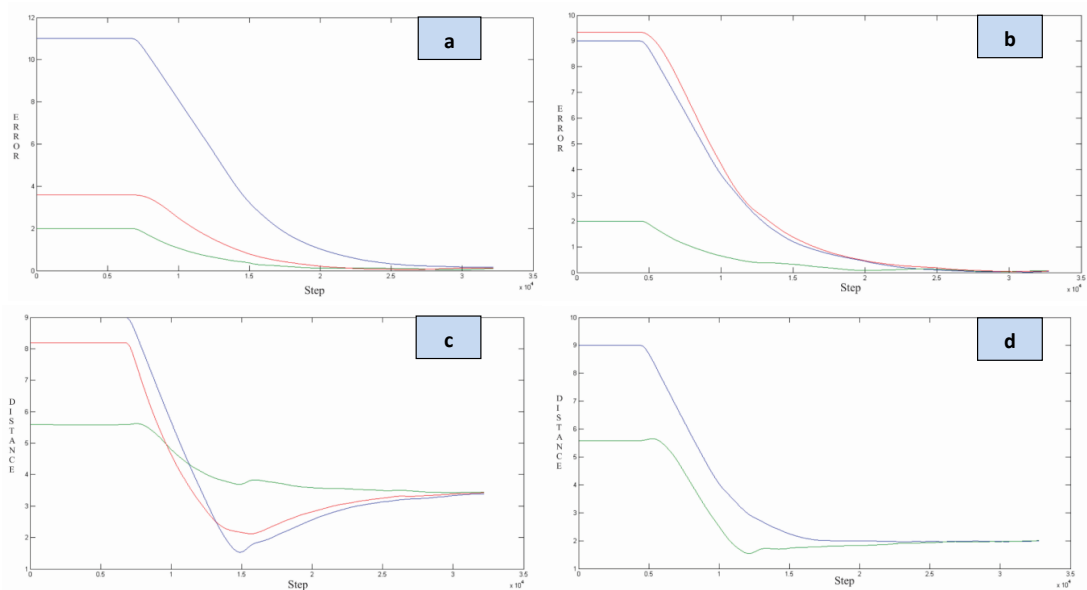
gambar 8g dan 8h, tiga buah Quadrotor mampu mempertahankan formasi lingkaran dan garis menuju titik tujuan sambil



dari posisi acak, tiga buah Quadrotor mampu membentuk formasi garis dan lingkaran. Pada

menghindari rintangan.

Gambar 8a-8h. Hasil simulasi algoritma *path planning*



Gambar 9a-9d Grafik eror posisi dan jarak Quadrotor

Evaluasi hasil kendali formasi juga bisa dilakukan dengan mengamati grafik error posisi tiap quadrotor relatif terhadap posisi tujuan dalam formasi serta grafik jarak antar quadrotor seperti pada Gambar 9.

Teramati pada Gambar 9a dan 9b, nilai error antara posisi Quadrotor dengan posisi tujuan dalam formasi semakin kecil baik untuk proses pembentukan formasi garis (Gambar 9a) maupun lingkaran (Gambar 9b). Jarak antar Quadrotor untuk kedua proses tersebut juga semakin mendekati suatu nilai yang sama (Gambar 9c dan 9d).

3.3 Implementasi

Implementasi teori dan algoritma diatas dapat dilakukan dalam beberapa tahap secara sekuensial. Quadrotor yang digunakan adalah Parrot AR Drone 2.0.

Pertama, quadrotor dibekali kemampuan untuk melakukan navigasi dengan mengaplikasikan algoritma navigasi visual-inertial berbasis PTAM dan GPS. Sebagai tambahan, dapat ditambah dengan sensor jarak untuk membantu kamera dalam mendeteksi rintangan. Setelah setiap

Quadrotor mampu mengetahui posisinya masing – masing dan mengetahui posisi rintangan di sekitarnya, algoritma potential field dan virtual leader mulai dijalankan pada sistem Quadrotor yang ada. Setelah disimulasikan menggunakan Simulator Gazebo, algoritma dijalankan pada Quadrotor menggunakan Robot Operating System.

Tahap selanjutnya adalah membangun jaringan komunikasi untuk multi-Quadrotor. Pada AR Drone standar, digunakan protokol Wi-Fi dengan setiap Quadrotor menjadi sebuah *access point*. Untuk itu perlu disediakan sebuah access point khusus tersendiri, dimana nantinya setiap Quadrotor sudah disetting untuk langsung tersambung dengan jaringan access point khusus tersebut, dengan alamat IP yang berbeda-beda. Sehingga, setiap Quadrotor dapat mengirimkan data beserta ID-nya ke user dan user dapat memberi perintah ke Quadrotor tertentu atau mem-broadcast perintah ke semua Quadrotor yang tersambung dalam jaringan.



Gambar 10. Implementasi algoritma kendali formasi

Setelah semua tahap awal dari navigasi, path planning, dan perancangan jaringan sudah memadai, algoritma kendali

formasi dapat diimplementasi seperti pada Gambar 10.

3.4 Publikasi

Hasil penelitian untuk algoritma yang telah digunakan untuk path planning dan kendali formasi telah dipublikasikan pada ARIS 2014 (*International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems*) di NTUST, Taiwan sebagai berikut:

- A Cascade Controller for Linearized Quadrotor Model*, Diterima
- Path Planning and Formation Control via Potential Function for UAV Quadrotor*, Diterima dan memperoleh Best Conference Paper Award: Excellent Award.
- Selanjutnya, kami juga telah men-submit paper tentang pengolahan citra untuk navigasi visual Quadrotor ke ICITEE (*International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*) 2014 dan sedang mempersiapkan 2 paper mengenai sistem navigasi visual-inertial dan algoritma advanced path-planning untuk IC3INA 2014 dan Robionetics 2014. Ketiga konferensi tersebut telah masuk dalam indeks IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil di atas disimpulkan (a) Algoritma berhasil dirancang diverifikasi dengan ROS, (b) Navigasi visual berhasil mengetahui koordinat posisi quadrotor dengan akurat, (c) Potential Field dapat digunakan untuk path planning dan formasi Quadrotor. Bentuk formasi dapat disesuaikan dengan tempat terjadinya bencana. Formasi melingkar untuk area luas, seperti lahan yang luas. Formasi lurus untuk area sempit, seperti lorong-lorong.

Novelty yang dihasilkan adalah (a) Menggunakan potential field untuk path planning pada Quadrotor, (b) Membuat local minima solver untuk algoritma path planning dengan potential fields, (c) Virtual Leader sebagai algoritma formation control untuk multi-quadrotor.

Formasi quadrotor dapat diharapkan untuk menghemat waktu penanganan pasca bencana karena pada waktu yang sama dapat dijalankan quadrotor dengan jumlah lebih dari satu dan saling berkoordinasi.

5. REFERENSI

1. P. I. Corke, Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB, ser. Springer tracts in advanced robotics. Berlin: Springer, 2011, no. v. 73
2. H. Duan, Q. Luo, Y. Shi, and G. Ma, "Hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for multi-UAV formation reconfiguration," *IEEE Comp. Int. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 16–27, 2013. W. Justh, P. S. Krishnaprasad – Kendali formasi dengan menggunakan persamaan Frenet-Serret
3. J. Engel, J. Sturm, and D. Cremers, "Camera-based navigation of a low-cost quadcopter," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, Oct. 2012, pp. 2815–2821.
4. Y. Hwang and N. Ahuja, "A potential field approach to path planning," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 1, pp. 23–32, Feb. 1992.
5. O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," in *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, vol. 2, Mar. 1985, pp. 500–505.
6. Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," in *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, Apr. 1991, pp. 1398–1404 vol.2.