PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH GANGGUAN UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

TUGAS AKHIR

****

Oleh

Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026

PROGRAM STUDI TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG  
2023

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH GANGGUAN UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

Oleh

**Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026**

(Program Studi Teknik Fisika)

Dalam era perkembangan teknologi, penggunaan *quadrotor* telah menjadi semakin relevan dalam berbagai bidang, termasuk militer, sipil, teknologi, dan ilmu pengetahuan. Namun, penggunaan *quadrotor* tunggal untuk menyelesaikan tugas sehari-hari masih memiliki keterbatasan, seperti efisiensi yang rendah, kesulitan dalam mengeksekusi tugas kompleks, dan batasan dalam cakupan area.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, pengembangan *swarm* *quadrotor* atau kelompok *quadrotor* yang bekerja bersama sebagai satu kesatuan telah menjadi fokus penelitian. *Swarm* *quadrotor* digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pemetaan area di mana *quadrotor* perlu menjaga jarak yang dekat satu sama lain. Namun, penggunaan *swarm* *quadrotor* dalam jarak dekat menghadirkan tantangan terkait interaksi aerodinamika yang dapat mempengaruhi kinerja, stabilitas, dan keamanan *quadrotor*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol kestabilan yang memungkinkan *quadrotor* dalam *swarm* untuk terbang dalam jarak yang sangat dekat tanpa mengalami gangguan signifikan akibat interaksi aerodinamika. Penelitian ini melibatkan pemodelan gangguan udara dan sistem pergerakan *quadrotor*, penggunaan algoritma kontrol PID, *Backstepping*, dan *feed forward,* simulasi menggunakan Simulink pada aplikasi MATLAB dan implementasi pada tiga unit *quadrotor*.

Hasil dari penelitian sejauh ini adalah berinteraksi dengan *quadrotor* via pemrograman bahasa python dengan laptop memanfaatkan protokol komunikasi jaringan nirkabel dan memberikan perintah dari laptop. Pengukuran gangguan udara menggunakan dua skema, menunjukkan bahwa gangguan udara terbesar didapatkan dari pantulan udara dengan tanah. Data respons pergerakan *quadrotor* dari penelitian sebelumnya dapat digunakan sebagai data awal untuk mempelajari simulasi pada simulink, tetapi perlu dilakukan pengukuran dengan lintasan yang lebih panjang untuk memastikan pergerakan *quadrotor* mencapai keadaan tunak.

Untuk langkah selanjutnya proses pengerjaan tugas akhir, melanjutkan pengerjaan tahap pertama akuisisi dan analisis data dan mulai mempelajari langkah awal pengerjaan tahap kedua simulasi. Pengukuran gangguan udara akan dilakukan pada dua buah *quadrotor* yang lain. Pengukuran respons pergerakan *quadrotor* dengan lintasan yang lebih panjang.

Kata kunci: swarm *quadrotor*, kontrol, simulasi, turbulensi udara. 

*ABSTRACT*

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH GANGGUAN UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

*By*

***Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026***

*(Engineering Physics Study Program)*

*In the era of technological development, the use of quadrotors has become increasingly relevant in various fields, including military, civil, technology, and science. However, the use of a single quadrotor to accomplish daily tasks still has limitations, such as low efficiency, difficulty in executing complex tasks, and limitations in area coverage.*

*To overcome these limitations, the development of quadrotor swarms or groups of quadrotors working together as a single unit has been the focus of research. Quadrotor swarms are used in a variety of applications, including area mapping where quadrotors need to keep a close distance from each other. However, the use of quadrotor swarms in close proximity presents challenges related to aerodynamic interactions that can affect quadrotor performance, stability and safety.*

*This research aims to develop a stability control system that enables quadrotors in a swarm to fly in very close proximity without experiencing significant disturbances due to aerodynamic interactions. The research involves modeling the air disturbance and quadrotor movement system, the use of PID, Backstepping, and feed forward control algorithms, simulation using Simulink on MATLAB application and implementation on three quadrotor units.*

*The results of the research so far are interacting with the quadrotor via python language programming with a laptop utilizing the wireless network communication protocol and giving commands from the laptop. Air disturbance measurements using two schemes show that the largest air disturbance is obtained from air reflection with the ground. Quadrotor movement response data from previous research can be used as initial data to study simulations on simulink, but it is necessary to take measurements with a longer trajectory to ensure the quadrotor movement reaches a steady state.*

*For the next step of the final project process, continue working on the first stage of data acquisition and analysis and start studying the initial steps of working on the second stage of simulation. Air disturbance measurements will be conducted on two other quadrotors. Measurement of quadrotor movement response with a longer trajectory.*

*Keywords: swarm quadrotor, control, simulation, air turbulence.*

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH GANGGUAN UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

HALAMAN PENGESAHAN

Oleh

**Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026**

**(Program Studi Teknik Fisika)**

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui

Tim Pembimbing

Tanggal ………………………..

|  |  |
| --- | --- |
| Pembimbing 1 | Pembimbing 2 |
| (Ir. Estiyanti Ekawati, M.T., Ph.D.)  NIP. 196908052008012020 | (Faqihza Mukhlish, S.T., M.T., Ph.D.)  NOPEG. 121110001 |

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat beserta karunia-Nya, serta diberi-Nya kemudahan dalam menyelesaikan penulisan Laporan Kemajuan Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Kontrol Pergerakan Untuk Mengatasi Pengaruh Gangguan Udara Dalam Formasi *Multiquadrotor*”. Penulisan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tahap sarjana pada Program Studi Sarjana Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Laporan Kemajuan tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik, tidak lepas dari bimbingan dan dukungan dari banyak pihak, sehingga dalam kesempatan ini penulis dengan segala hormat mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Estiyanti Ekawati, M.T., Ph.D., selaku pembimbing yang telah meluangkan waktu dan pikirannya untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan penelitian dan penyusunan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini,
2. Kedua orang tua yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis,
3. Seluruh Dosen dan Staf di Program Studi Sarjana Teknik Fisika yang telah membekali banyak ilmu pengetahuan yang bermanfaat selama penulis menjalani studi di Program Studi Sarjana Teknik Fisika,
4. Salsabila Gitta Arifani yang memberikan dukungan dalam proses pengambilan data dan penyusunan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini serta senantiasa memberikan semangat kepada penulis,
5. Rekan-rekan di laboratorium CITA atas kebersamaan selama penelitian ini dilaksanakan,
6. Teman-teman S1 Teknik Fisika Angkatan 2020 yang memberikan dukungan dan semangat kepada penulis, dan
7. Semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis memohon maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam penulisan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini ke arah yang lebih baik. Semoga segala yang tertuang dalam Laporan Kemajuan Tugas akhir ini memberikan manfaat bagi kita semua baik sekarang maupun dimasa yang akan datang.

Bandung, Desember 2023

Penulis

DAFTAR ISI

[ABSTRAK i](#_Toc153712481)

[*ABSTRACT* ii](#_Toc153712482)

[HALAMAN PENGESAHAN iii](#_Toc153712483)

[KATA PENGANTAR iv](#_Toc153712484)

[DAFTAR ISI vi](#_Toc153712485)

[DAFTAR GAMBAR viii](#_Toc153712486)

[DAFTAR TABEL ix](#_Toc153712487)

[DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG x](#_Toc153712488)

[BAB I PENDAHULUAN 1](#_Toc153712489)

[1.1 Latar Belakang 1](#_Toc153712490)

[1.2 Permasalahan 3](#_Toc153712491)

[1.3 Tujuan dan Sasaran 4](#_Toc153712492)

[1.4 Batasan dan Asumsi 5](#_Toc153712493)

[1.5 Sistematika 5](#_Toc153712494)

[BAB II STUDI LITERATUR 7](#_Toc153712495)

[2.1 Sistem Dinamik *Quadrotor* 7](#_Toc153712497)

[2.2 Protokol Komunikasi *Quadrotor* 10](#_Toc153712498)

[*2.2.1* *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* 11](#_Toc153712499)

[*2.2.2* *User Datagram Protocol (UDP)* 11](#_Toc153712500)

[2.3 Sistem Kontrol pada *Quadrotor* 11](#_Toc153712501)

[*2.3.1* *PID Control* 12](#_Toc153712502)

[2.3.2 Backstepping-Integral Control 13](#_Toc153712503)

[*2.3.3* Feed Forward Control 14](#_Toc153712504)

[2.4 Simulasi Menggunakan MATLAB/Simulink 15](#_Toc153712505)

[*2.4.1* *Dryden Wind Turbulence Model* 16](#_Toc153712506)

[BAB III METODOLOGI DAN KEMAJUAN 18](#_Toc153712507)

[3.1 Metodologi 18](#_Toc153712508)

[3.1.1 Akuisisi dan Analisis Data 19](#_Toc153712509)

[3.1.2 Simulasi 20](#_Toc153712510)

[3.1.3 Implementasi dan Validasi 21](#_Toc153712511)

[3.2 Kemajuan 22](#_Toc153712512)

[3.2.1 Flowchart Pelaksanaan Tugas Akhir 22](#_Toc153712513)

[3.2.2 Set up *Quadrotor* dan Medan Terbang 24](#_Toc153712514)

[3.2.3 Set Up Aplikasi, *Library* dan Pemrograman 27](#_Toc153712515)

[3.2.4 Uji Terbang 30](#_Toc153712516)

[3.2.5 Pengukuran Gangguan Udara 31](#_Toc153712517)

[3.2.6 Pengukuran Respons Pergerakan *Quadrotor* 34](#_Toc153712518)

[BAB IV RENCANA SELANJUTNYA DAN PENUTUP 38](#_Toc153712519)

[4.1 Rencana Selanjutnya 38](#_Toc153712520)

[4.2 Penutup 38](#_Toc153712521)

[DAFTAR PUSTAKA 39](#_Toc153712522)

DAFTAR GAMBAR

[Gambar 1.2.1 Diagram tulang ikan rumusan permasalahan 4](#_Toc153712523)

[Gambar 2.1.1 Dinamika pada *Quadrotor* 7](#_Toc153712524)

[Gambar 2.3.1 Cara kerja sistem kontrol pada umumnya 12](#_Toc153712525)

[Gambar 2.3.2 Skema kontrol PID 13](#_Toc153712526)

[Gambar 2.4.1 Model turbulensi angin Dryden pada simulasi Simulink 16](#_Toc153712527)

[Gambar 3.1.1 Diagram alir metodologi penelitian 18](#_Toc153712528)

[Gambar 3.1.2 Skema akuisisi data karakteristik turbulensi udara 19](#_Toc153712529)

[Gambar 3.1.3 Karakteristik dinamik *quadrotor* 19](#_Toc153712530)

[Gambar 3.1.4 Skema kontrol pergerakan *quadrotor* 20](#_Toc153712531)

[Gambar 3.1.5 Arsitektur komunikasi sistem 21](#_Toc153712532)

[Gambar 3.1.6 Skema validasi performa implementasi sistem kontrol 22](#_Toc153712533)

[Gambar 3.2.1 *Update* diagram alir proses pengerjaan tugas akhir 23](#_Toc153712534)

[Gambar 3.2.2 *Quadrotor* Parrot AR.Drone 2.0 24](#_Toc153712535)

[Gambar 3.2.3 Komponen pada *quadrotor* Parrot AR.Drone 2.0 25](#_Toc153712536)

[Gambar 3.2.4 Antarmuka aplikasi AR.FreeFlight 25](#_Toc153712537)

[Gambar 3.2.5 Medan terbang *quadrotor* 26](#_Toc153712538)

[Gambar 3.2.6 Set up dan install library yang dibutuhkan 28](#_Toc153712539)

[Gambar 3.2.7 Antarmuka program simulasi yang dikembangkan 29](#_Toc153712540)

[Gambar 3.2.8 Program dasar untuk berinteraksi dengan *quadrotor* 29](#_Toc153712541)

[Gambar 3.2.9 Program Dasar untuk mengontrol dan mengetahui state *quadrotor* 30](#_Toc153712542)

[Gambar 3.2.10 Dokumentasi uji terbang menggunakan pemrograman 31](#_Toc153712543)

[Gambar 3.2.11 Skema pertama pengukuran gangguan angin 31](#_Toc153712544)

[Gambar 3.2.12 Skema kedua pengukuran gangguan angin 32](#_Toc153712545)

[Gambar 3.2.13 Dinamika udara dari *quadrotor* pada arah horizontal 33](#_Toc153712546)

[Gambar 3.2.14 Turbulensi udara yang dihasilkan *quadrotor* 34](#_Toc153712547)

[Gambar 3.2.15 Hasil pengukuran respons kecepatan *quadrotor* 018167 berbagai arah 35](#_Toc153712548)

DAFTAR TABEL

[Tabel 3.2.1 Hasil pengukuran kecepatan angin dengan skema pertama 32](#_Toc153712549)

[Tabel 3.2.2 Hasil pengukuran kecepatan angin dengan skema kedua 32](#_Toc153712550)

[Tabel 3.2.3 Hasil parameter FOPTD untuk arah maju 35](#_Toc153712551)

[Tabel 3.2.4 Hasil parameter FOPTD untuk arah mundur 36](#_Toc153712552)

[Tabel 3.2.5 Hasil parameter FOPTD untuk arah kanan 36](#_Toc153712553)

[Tabel 3.2.6 Hasil parameter FOPTD untuk arah kiri 36](#_Toc153712554)

DAFTAR SINGKATAN

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| SINGKATAN | Nama |  |
| PID | *Proportional Integral Derivative* | 2 |
| DCM | *Direction Cosine Matrix* | 3 |
| EF | *Earth Frame* | 7 |
| BF | *Body Frame* | 7 |
| OSI | *Open System Interconnection* | 10 |
| Wi-Fi | *Wireless Fidelity* | 10 |
| TCP/IP | *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* | 11 |
| UDP | *User Datagram Protocol* | 11 |
| GCS | *Ground Control Station* | 21 |
| FOPTD | *First Order Plus Time Delay* | 34 |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

BAB I  
PENDAHULUAN

## Latar Belakang

Saat ini, *quadrotor* memiliki potensi yang sangat tinggi dalam pengembangan aplikasi di bidang militer, sipil, teknologi, dan ilmu pengetahuan [1] [2]. Hal tersebut dikarenakan *quadrotor* menjadi salah satu robotik pesawat tanpa awak dengan keunggulan berupa struktur mekanik sederhana serta manuverabilitas yang dapat ditingkatkan [3]. Akan tetapi, penggunaan *single quadrotor* untuk memecahkan permasalahan sehari-hari masih memiliki keterbatasan, seperti efisiensi yang rendah dalam menjalankan tugas, sulit menjalankan tugas yang kompleks, dan tidak mampu mencakup area tugas yang luas. Maka dari itu, semakin gencar pengembangan sekelompok *quadrotor* atau *swarm quadrotor*. *Swarm quadrotor* akan berkoordinasi dan bekerja sama sebagai satu kesatuan dengan menjaga formasi yang diinginkan selama melaksanakan tugas [4].

Pengembangan *swarm* *quadrotor* yang semakin maju, membuatnya kini telah diaplikasikan dalam berbagai tujuan dan bidang keilmuan. Tak jarang pada aplikasi tersebut membutuhkan *swarm* dengan kerapatan atau jarak antar *quadrotor* yang berdekatan. Salah satu contohnya adalah untuk melakukan pemetaan area. Saat *quadrotor* harus menjaga jarak yang relatif aman satu sama lain, efisiensi pemetaan dapat terpengaruh karena cakupan area yang lebih luas mungkin tidak tercapai. Oleh karenanya, dibutuhkan formasi *swarm* *multiquadrotor* yang berdekatan satu sama lain.

Penggunaan *swarm quadrotor* yang mengharuskan jarak antar *quadrotor* berdekatan memunculkan permasalahan utama terkait dengan interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat. Ketika *quadrotor* terbang dalam formasi yang rapat, interaksi aerodinamika antar *quadrotor* dapat menciptakan gangguan yang berdampak negatif pada kinerja, stabilitas, dan keamanan *quadrotor* tersebut. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nekoo dkk (2021) telah dibuktikan bahwa rotor yang berputar pada *quadrotor* menyebabkan turbulensi udara di sekitarnya, dan akan memengaruhi kinerja dari *quadrotor* [5]. Hanya saja, penelitian tersebut terbatas membahas turbulensi pada sumbu vertical saja belum membahas pengaruh turbulensi pada sumbu horizontal.

Penelitian yang dilakukan oleh Regula G. (2013) telah merancang algoritma kontrol yang memungkinkan *quadrotor* dalam *swarm quadrotor* untuk menjaga jarak yang aman satu sama lain. Algoritma ini memberikan solusi untuk menghindari tabrakan dan menjaga jarak yang cukup [6]. Meskipun solusi ini efektif dalam mencegah tabrakan, mereka sering kali kurang efisien dalam mengatasi gangguan aerodinamika yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat [7]. Pembahasan pada penelitian tersebut cenderung mengutamakan mencegah tabrakan daripada mengatasi gangguan aerodinamika yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat.

Pemahaman yang mendalam tentang pengendalian dan kompensasi gangguan ini menjadi penting untuk mengoptimalkan penggunaan *swarm quadrotor* dalam pemetaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol kestabilan yang memungkinkan *quadrotor* dalam *swarm quadrotor* untuk terbang berdekatan tanpa mengalami gangguan yang signifikan akibat interaksi aerodinamika antar *quadrotor*.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Mukhlish dkk (2015) dikembangkan algoritma kontrol untuk mengompensasi pengaruh gangguan udara ketika *quadrotor* sedang terbang. Pada penelitian tersebut, gangguan udara bukan berasal dari *quadrotor* yang lain, namun berasal dari udara bebas karena uji coba dilakukan di tempat terbuka. Objek pada penelitian ini adalah sebuah *quadrotor* tunggal, bukan *swarm* *quadrotor*. pada penelitian yang dilakukan oleh Kamran dkk (2014) juga dibuat algoritma kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk mengatasi gangguan udara. Berdasarkan kedua penelitian tersebut kontrol PID terbukti telah berhasil mengurangi kesalahan rute penerbangan yang disebabkan gangguan dari udara [8] [9].

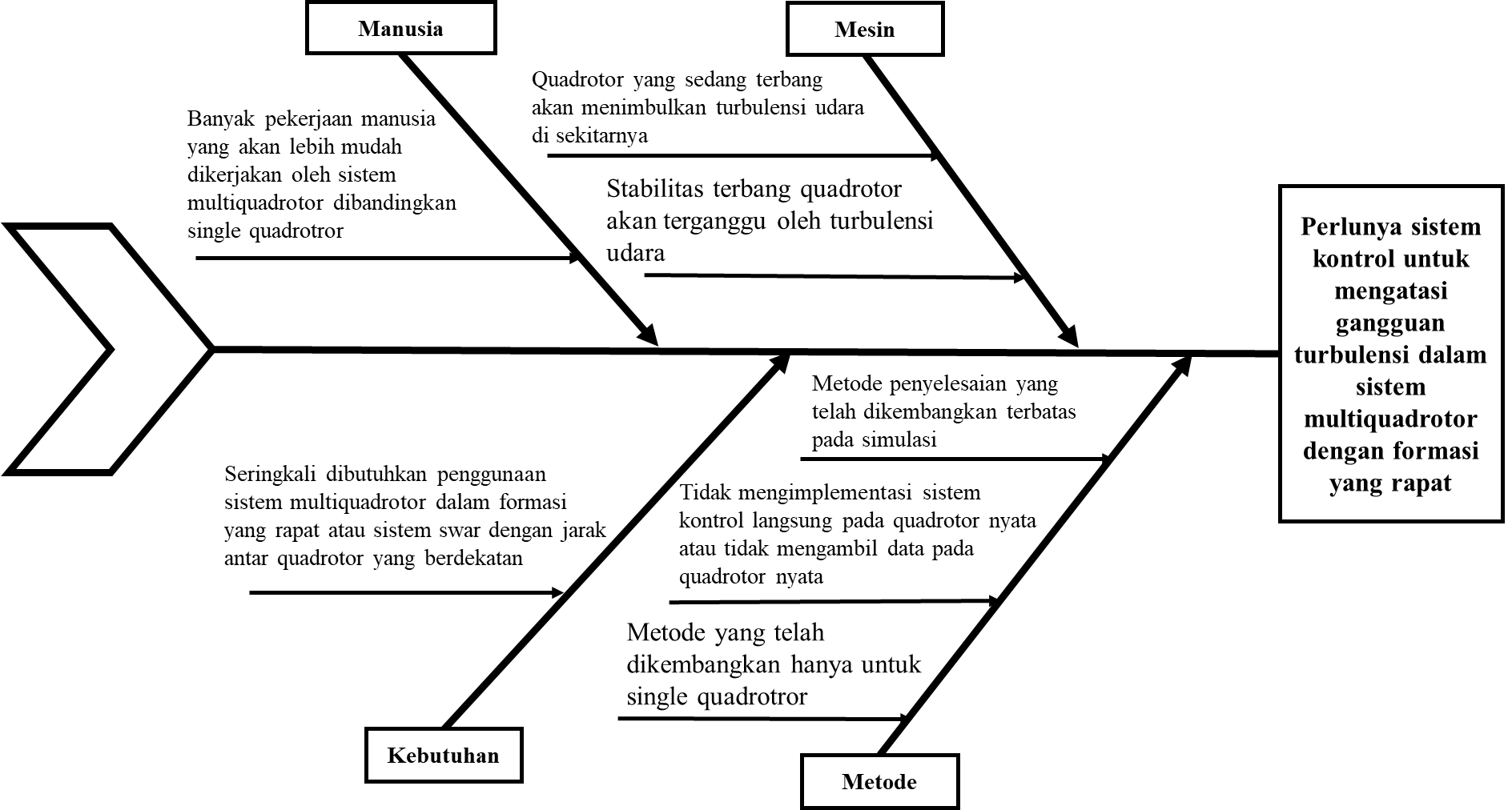
Penelitian mengenai kontrol *quadrotor* akan gangguan udara kini mulai dilakukan dengan menggunakan simulasi [10]. Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Dounia dkk (2020) yang memodelkan satu buah sistem pergerakan *quadrotor* dalam alat simulasi Simulink pada aplikasi MATLAB. Gangguan udara disimulasikan dengan *Dryden Wind Turbulence Model* pada *toolbox aeroblocks*. Blok tersebut akan menerima *input* parameter seperti ketinggian, kecepatan *quadrotor*, kecepatan udara, *Direction Cosine Matrix* (DCM), dan model turbulensi [11].

Metode tersebut dapat diaplikasikan pada simulasi dalam penelitian yang akan dilakukan. Untuk parameter-parameter *Dryden Wind Turbulence Model,* kita perlu melakukan karakterisasi turbulensi udara dari *quadrotor*. Sesuai dengan riset yang dilakukan oleh Abichandani dkk (2020) pengukuran pengaruh udara dapat dilakukan dengan menggunakan anemometer [12]. Kontrol yang digunakan dalam simulasi tersebut adalah kontrol *backstepping-integral*. Kontrol tersebut telah terbukti dapat mengatur pergerakan sebuah *quadrotor* agar dapat mengatasi gangguan turbulensi udara [10].

Penelitian ini akan fokus pada mengatasi gangguan aerodinamika yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat. Penelitian ini akan merancang model matematis yang memadai untuk pergerakan *quadrotor* dan gangguan udara yang dihasilkan *quadrotor* dalam kawanan. Berdasarkan model ini akan dirancangsistem kontrol menggunakan metode PID, *Backstepping Integral*, dan *Feed Forward Control.* Sistem kontrol ini dirancang melalui perangkat ‘simulink’ pada aplikasi MATLAB dan diimplementasikan pada tiga buah *quadrotor* Parrot AR Drone 2.0 Power Edition. Diharapkan hasil studi ini dapat memberikan kontribusi untuk peningkatan kinerja kontrol konfigurasi *multiquadrotor*.

## Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, Pencarian akar masalah dilakukan dengan menggunakan analisis sebab-akibat (*fishbone diagram*), seperti pada Gambar 1.2.1 berikut.



Gambar 1.2.1 Diagram tulang ikan rumusan permasalahan

Berdasarkan analisis pada Gambar 1.2.1 di atas, dapat disimpulkan bahwa akar permasalahan dari penelitian ini adalah diperlukannya sistem kontrol untuk mengatasi gangguan turbulensi dalam sistem *multiquadrotor* dengan formasi rapat. Untuk menyelesaikan akar permasalahan tersebut, disusun rumusan permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik gangguan yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat ?
2. Bagaimana algoritma sistem kontrol yang memungkinkan *quadrotor* untuk tetap stabil ketika terbang dalam jarak yang dekat dengan mengompensasi gangguan yang muncul ?
3. Bagaimana memastikan kinerja sistem kontrol yang dikembangkan melalui simulasi dan eksperimen bekerja dengan baik dalam situasi dunia nyata ?

## Tujuan dan Sasaran

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem kontrol kestabilan yang dapat memungkinkan *drone* dalam *swarm* untuk terbang dalam jarak yang sangat dekat satu sama lain tanpa mengalami gangguan yang signifikan. Sasaran yang ingin dicapai melalui pemenuhan tujuan tersebut adalah:

1. Menganalisis karakteristik gangguan yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat.
2. Mengembangkan pemodelan sistem sesuai dengan karakteristik setiap *quadrotor* yang digunakan dalam *swarm quadrotor*.
3. Merancang algoritma kontrol yang efektif untuk mengompensasi gangguan yang muncul, sehingga *quadrotor* dalam *swarm* dapat terbang dalam jarak yang sangat dekat satu sama lain tanpa mengalami gangguan yang signifikan.
4. Menguji dan memvalidasi sistem kontrol yang dikembangkan melalui simulasi dan eksperimen untuk memastikan kinerja yang baik dalam situasi dunia nyata.

## Batasan dan Asumsi

Batasan dan asumsi pada pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. *Quadrotor* yang digunakan dalam *swarm quadrotor* Parrot AR *Quadrotor* 2.0 Power Edition sebanyak 3 buah.
2. Kondisi lingkungan dianggap stabil dan tidak berubah-ubah selama penerbangan *quadrotor*.
3. *Quadrotor* dalam *swarm quadrotor* akan memiliki sensor yang memadai untuk deteksi dan menghindari tabrakan.
4. *Quadrotor* dalam *swarm quadrotor* akan berkomunikasi secara terus-menerus untuk berkoordinasi.

## Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir akan terdiri dari enam bab dengan sistematika sebagai berikut.

1. BAB I Pendahuluan

Bab pertama berisi latar belakang penelitian yang menjadi dasar dalam menentukan masalah. Latar belakang akan berfokus membahas permasalahan yang dialami objek penelitian. Permasalahan yang dikaji adalah diperlukannya sistem kontrol untuk mengatasi gangguan turbulensi dalam sistem *multiquadrotor* dengan formasi rapat. Pada bab ini akan dicantumkan pula pembahasan terkait tujuan, manfaat, batasan, dan asumsi penelitian.

1. BAB II Studi Literatur

Bab kedua berisi dasar teori dan konsep yang akan digunakan dalam penelitian sebagai acuan dasar untuk merancang sistem kontrol pergerakan udara untuk *multiquadotor.* Adapun teori yang digunakan untuk merancang sistem kontrol adalah sistem dinamik *quadrotor*, arsitektur komunikasi *quadrotor*, sistem kontrol pada *quadrotor*, dan simulasi menggunakan MATLAB/ Simulink.

1. BAB III Metodologi dan Kemajuan

Bab ketiga berisi penjelasan langkah-langkah yang akan dilakukan untuk merancang sistem kontrol pergerakan udara pada *multiquadrotor*. Langkah-langkah tersebut diilustrasikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) yang dilengkapi dengan penjelasan untuk tiap langkah yang digunakan. Pada bab ini, akan dijelaskan pula hasil kemajuan penelitian.

1. BAB IV Rencana Selanjutnya & Penutup

Bab empat akan berisi perencanaan proses penelitian yang akan dilakukan berdasarkan kemajuan yang telah didapat. Penelitian direncanakan agar dapat mendapatkan keluaran sesuai dengan harapan dan selesai tepat waktu. Selain itu, akan disusun pula penutup laporan kemajuan berupa harapan untuk proses penelitian yang dilakukan.

BAB II  
STUDI LITERATUR

# PERSAMAAN, GAMBAR, DAN TABEL

## Model Sistem *Quadrotor*

### Persamaan Dinamika *Quadrotor*

*Quadrotor* adalah salah satu jenis robot terbang dengan empat motor. Kelebihan *quadrotor* ada pada kemampuan manuvernya yang memungkinkan untuk bergerak leluasa di udara. Pergerakan *quadrotor* dapat dikendalikan dengan kontrol manual menggunakan *remote control* atau dengan sebuah sistem kontrol otomatis. Pengendalian pergerakan *quadrotor* dengan sistem kontrol otomatis memerlukan sebuah dinamika yang menggambarkan karakter dari *quadrotor* atau dinamika *quadrotor*. Dinamika *quadrotor* berdasarkan penelitian Kucherov dkk. (2021) dapat diidentifikasi berdasarkan *earth frame* (EF) dan *body frame* (BF) seperti yang ditunjukkan Gambar 2.1.1. EF adalah sistem posisi tetap (𝑋YZ) sedangkan BF adalah sistem posisi bergerak (𝑋’𝑌’𝑍’) yang berasal dari pusat gravitasi *quadrotor*. Variabel 𝜑, 𝜃, 𝜓 adalah sudut *roll, pitch,* dan *yaw* dalam EF [13].



Gambar 2.1.1 Dinamika pada *Quadrotor*

Persamaan untuk dinamika *quadrotor* pada ruang 3 dimensi dapat dituliskan dalam bentuk:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.1) |

adalah vektor linier, dan adalah vektor kecepatan sudut, adalah massa *quadrotor*, adalah matriks inersia dari objek yang di kontrol, adalah matriks identitas, adalah gaya resultan, adalah momen resultan yang bekerja pada pusat massa dari *quadrotor*.

Jika gaya dari luar diabaikan, maka gaya yang dihasilkan menentukan pergerakan *quadrotor* pada sumbu zdapat ditulis:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.2) |

Pada sistem koordinat Euler, orientasi *quadrotor* relatif terhadap sistem koordinat inersia XYZ dapat dituliskan sebagai matriks rotasi

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | (II.3) | |
|  | | (II.4) | |

Matriks pada persamaan (II.4) menggunakan notasi dan Jika persamaan (II.3) dan (II.4) dikombinasikan maka dapat dihasilkan:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.5) |
|  | (II.6) |
|  | (II.7) |

Dimisalkan , , masing- masing adalah momen inersia *quadrotor* untuk sumbu X, Y, dan Z yang melalui pusat massanya. Kemudian adalah kecepatan sudut terhadap sumbu X, Y, dan Z. Jika gaya dari luar diabaikan, persamaan diferensial dari kecepatan sudut dapat dituliskan dalam bentuk:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.8) |
|  | (II.9) |
|  | (II.10) |

Persamaan (II.8) – (II.10) adalah persamaan dinamika Euler. Jika menggunakan kerja motor - maka persamaannya adalah:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.11) |
|  | (II.12) |
|  | (II.13) |

Pada persamaan (II.11) – (II.13) adalah jarak antara pusat massa *quadrotor* dan motor dengan , adalah inersia rotor, adalah gaya mekanik yang memberikan gerakan rotasi *drone*, ditulis pada persamaan:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.14) |
|  | (II.15) |
|  | (II.16) |
|  | (II.17) |

adalah faktor yang menghubungkan momen dengan kecepatan sudut dari motor ke pada persamaan (II.14) – (II.17). Mempertimbangkan identitas dari semua motor, lokasi yang simetris, dan struktur yang *rigid*, maka dapat ditentukan momen dan pada ketinggian tetap (sumbu Z) dalam persamaan (II.11) – (II.13) adalah:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.8) |

Dinamika rotasi dari *quadrotor* pada persamaan (II.11) – (II.13) dapat ditulis dalam bentuk:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.11) |
|  | (II.12) |
|  | (II.13) |

Jika diberikan kondisi dan momen diketahui, maka posisi dapat diketahui dengan melakukan 2 kali diferensial:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.13) |

Demikian juga dengan posisi [13].

### Pendekatan dengan Fungsi Ramp

## Protokol Komunikasi *Quadrotor*

*Swarm* *quadrotor* merujuk pada kelompok *quadrotor* yang bekerja secara kolektif dalam suatu sistem. *Quadrotor* dalam *swarm* berkomunikasi dan berkoordinasi untuk mencapai tujuan tertentu, meniru prinsip kerja kelompok serangga atau burung dalam alam. Protokol komunikasi berupa jaringan nirkabel pada *swarm quadrotor* mengatur pertukaran informasi antara *quadrotor* dalam suatu kelompok menggunakan teknologi jaringan nirkabel.

Secara umum, jaringan nirkabel didefinisikan sebagai media transmisi yang dapat beroperasi tanpa menggunakan kabel dalam suatu sistem komunikasi. Jenis jaringan ini lebih fleksibel dan sederhana dibandingkan jenis jaringan lainnya karena banyak pengguna dapat dengan mudah terhubung ke jaringan pada saat yang bersamaan. Jaringan nirkabel adalah jenis jaringan yang menggunakan komunikasi radio nirkabel untuk menghubungkan perangkat jaringan seperti *router*, komputer, server, dan banyak lainnya. Jaringan nirkabel diterapkan pada lapisan fisik, yang merupakan lapisan 1 dari model *Open System Interconnection* (OSI). OSI adalah sebuah model referensi untuk vendor atau developer agar pembuatan perangkat lunak memiliki sifat interpolasi. Selain lapisan fisik atau *application layer,* lapisan lain yang ada pada model OSI adalah *presentation, session, transport, network*, dan *data-link*.

Jaringan nirkabel memiliki *Access point* yang bekerja secara efektif dengan *transceiver* radio untuk mengembangkan koneksi yang memungkinkan sinyal radio ditransmisikan dan diterima. Sinyal ini dikenali oleh perangkat *client*, dan setelah mengonfirmasi saluran komunikasi akan menyediakan akses tambahan ke jaringan. *Access point* nirkabel mengadopsi standar komunikasi nirkabel umum, yaitu protokol IEEE 802.11. Aplikasi yang paling umum dari standar ini adalah WiFi, yang dikenal sebagai *Wireless Fidelity* [14].

### *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

TCP/IP adalah *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*. TCP/IP merupakan jenis protokol yang memungkinkan komunikasi antar perangkat jaringan. Satu komputer dengan TCP/IP dapat berkomunikasi dengan komputer lain pada satu lingkup jaringan nirkabel. TCP/IP adalah protokol yang berada di lapisan *transport* pada model OSI. Pada protokol ini proses transfer data akan dilakukan dengan cara membagi data yang akan dikirimkan ke perangkat lain menjadi paket-paket kecil yang ditambahkan informasi untuk verifikasi data tersebut. Proses verifikasi pada saat penerimaan data merupakan salah satu keunggulan TCP/IP untuk memastikan bahwa data yang dikirimkan tidak mengalami kerusakan [15].

### *User Datagram Protocol (UDP)*

UDP adalah *User Datagram Protocol* yang merupakan salah satu protokol dengan posisi lapisan yang sama dengan TCP/IP pada model OSI yaitu pada lapisan *transport*. Tidak seperti TCP/IP data yang dikirimkan melalui protokol UDP berupa datagram dan tidak memiliki informasi verifikasi sehingga memiliki kemungkinan data akan rusak saat pengiriman. Tetapi, protokol UDP memiliki keunggulan dalam ukuran data yang kecil saat data dikirimkan. Hal tersebut membuat proses pengiriman data pada protokol UDP memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan TCP/IP [16].

## Pengukuran Berbasis Citra

### Distorsi Kamera

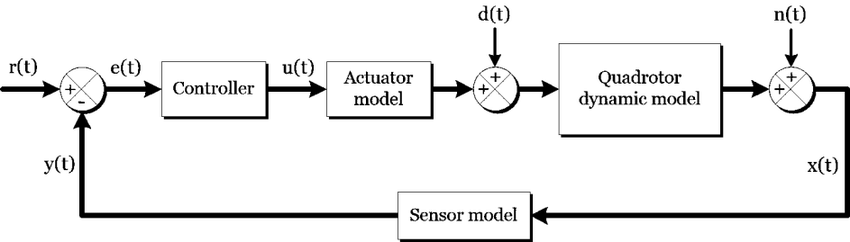
### ArUco

### Moving Average

## Sistem Kontrol pada *Quadrotor*

Sistem kontrol pada *quadrotor* adalah serangkaian elemen dan algoritma yang bertujuan mengatur dan menjaga kestabilan, posisi, dan gerakan *quadrotor*. Sistem ini memanfaatkan sensor dan aktuator untuk memonitor dan mengendalikan kondisi *quadrotor* secara *real-time* [17].

Cara kerja sistem kontrol pada *quadrotor*, sesuai pada Gambar 2.3.1, dibagi menjadi tiga elemen dasar yaitu elemen *sensing* (sensor), elemen algoritma kontrol, dan elemen aktuator. *Quadrotor* dilengkapi dengan sensor seperti g*yroscopes, accelerometers*, dan *magnetometers* untuk mengukur orientasi dan percepatan. Algoritma kontrol digunakan untuk menerjemahkan data sensor menjadi sinyal kontrol yang sesuai. Motor dan *propeller* pada *quadrotor* berperan sebagai aktuator yang menerapkan sinyal kontrol untuk menghasilkan gerakan yang diinginkan .



Gambar 2.3.1 Cara kerja sistem kontrol pada umumnya

Dengan adanya sistem kontrol pada *quadrotor*, terdapat banyak keuntungan atau kelebihan. *Quadrotor* mampu menjaga kestabilan *quadrotor* dalam berbagai kondisi. Memungkinkan *quadrotor* untuk melakukan manuver dengan presisi. Dapat diterapkan pada sistem *swarm* untuk menjaga formasi. Namun tidak sedikit juga kekurangan sistem kontrol pada *quadrotor*. Beberapa metode kontrol memiliki kompleksitas yang tinggi. Beberapa sistem kontrol sensitif terhadap perubahan parameter dinamika.

### *PD Control*

Kontrol PID (Proporsional-Integral-Derivatif) adalah metode pengendalian yang digunakan dalam sistem otomatis untuk meminimalkan kesalahan antara *output* yang diinginkan dengan *output* aktual. Tujuan utama dari kontrol PID adalah menjaga sistem agar tetap stabil dan responsif terhadap perubahan lingkungan atau *input* yang diberikan [9].

Kelebihan dari kontrol PID terletak pada kemampuannya yang relatif mudah diimplementasikan dan dapat berfungsi baik pada sistem yang kompleks. Selain itu, PID memiliki karakter responsif yang baik terhadap perubahan *input* dan mampu bekerja stabil dalam berbagai kondisi. Meskipun demikian, terdapat kekurangan pada kontrol PID, seperti rentan terhadap *overshooting* dan membutuhkan penyetelan parameter secara manual untuk mencapai kinerja optimal .



Gambar 2.3.2 Skema kontrol PID

Skema kontrol PID dapat dijelaskan pada Gambar 2.3.2. Elemen proporsional memberikan respons sebanding dengan kesalahan saat ini, elemen integral merespons terhadap kesalahan selama waktu, sementara elemen derivatif mengurangi *overshooting* dengan mengevaluasi laju perubahan kesalahan. Persamaan umum kontrol PID dapat dirumuskan sebagai

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.14) |

dengan u(t) sebagai sinyal kontrol, e(t) sebagai kesalahan saat ini, dan Kp, Ki, dan Kd sebagai konstanta kontrol proporsional, integral, dan derivatif [8] [9].

### Feed Forward Control

Kontrol *feed f*orward adalah suatu metode pengendalian di mana tindakan pengendalian langsung diterapkan pada sistem berdasarkan prediksi sebelumnya mengenai gangguan atau perubahan yang akan terjadi. Tujuannya adalah untuk meminimalkan efek gangguan tanpa menunggu sistem memberikan respons terhadap gangguan tersebut. Dalam hal ini, tindakan kontrol dilakukan sebelum gangguan benar-benar memengaruhi sistem [20].

Cara kerja kontrol *feed forward* dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, sistem di karakterisasi dengan baik sehingga respons sistem terhadap gangguan dapat diantisipasi. Prediksi ini kemudian digunakan untuk menghasilkan tindakan kontrol yang diterapkan pada sistem. Misalnya, pada *quadrotor*, kontrol *feed forward* dapat digunakan untuk mengompensasi gangguan turbulensi udara atau perubahan kecepatan angin yang diketahui dapat memengaruhi kinerja *quadrotor* . Rumus atau formula kontrol *feed forward* dapat dinyatakan sebagai jumlah tertimbang dari gangguan yang diantisipasi.

Kelebihan dari kontrol *feed forward* terletak pada kemampuannya untuk mengatasi gangguan tanpa menunggu sistem memberikan respons. Hal ini membuatnya sangat responsif dan efektif dalam merespons perubahan kondisi seketika. Kelebihan lainnya adalah pengurangan beban pada sistem umpan balik *(feedback)*, karena sebagian besar tugas dikendalikan sebelum terjadinya gangguan. Namun, kelemahan utamanya adalah kurangnya respons terhadap ketidakpastian dan variasi yang tidak dapat diprediksi dalam sistem.

## Software

### PyArDrone-python

### OpenCV-Python

### Matlab

MATLAB/Simulink adalah perangkat lunak pemrograman yang digunakan secara luas di berbagai industri, termasuk robotika dan kendaraan tanpa awak seperti *quadrotor*. MATLAB digunakan untuk analisis dan perhitungan numerik, sedangkan Simulink adalah alat pengembangan sistem dinamika dan kontrol. Tujuan penggunaan MATLAB/Simulink dalam simulasi *quadrotor* adalah untuk merancang, menguji, dan memvalidasi algoritma kontrol pada lingkungan yang aman dan efisien sebelum diimplementasikan pada *quadrotor* fisik. MATLAB/Simulink menyediakan platform yang kuat untuk pemodelan sistem dinamis, simulasi, dan analisis performa kontrol [21].

Cara Kerja penggunaan MATLAB/Simulink dalam simulasi *quadrotor* dibagi menjadi empat tahap. Tahap yang pertama adalah pemodelan *quadrotor* yang dilakukan dengan mendefinisikan parameter dinamis dan karakteristik fisiknya menggunakan blok-blok Simulink yang sesuai. Tahap kedua melakukan simulasi gangguan udara. Gangguan udara, seperti yang dihasilkan oleh model Turbulensi Angin Dryden, dapat diintegrasikan ke dalam model Simulink untuk mengevaluasi respons *quadrotor* terhadap kondisi lingkungan yang realistis. Tahap ketiga adalah melakukan desain kontrol. Algoritma kontrol, seperti PID atau *backstepping-integral*, dapat dirancang dan diimplementasikan dalam Simulink dengan menambahkan blok kontrol ke model sistem. Tahap yang terakhir adalah melakukan analisis performa. MATLAB/Simulink memungkinkan analisis performa sistem kontrol, seperti respons transien, stabilitas, dan kinerja sistem.

BAB III  
METODOLOGI

1. HASIL PENELITIAN

## Arsitektur Komunikasi

Metodologi yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan dari proyek tugas akhir ini

## Sistem Instrumentasi

### Kamera

### Kalibrasi Kamera

### Marka ArUco

## Sistem Kontrol

BAB IV  
HASIL DAN ANALISIS AWAL

1. HASIL PENELITIAN

## Rencana Selanjutnya

Rencana selanjutnya untuk proses pengerjaan tugas akhir, akan tetap mengerjakan tahap pertama yaitu tahap akuisisi dan analisis data dan mulai mempelajari langkah awal pengerjaan tahap kedua yaitu simulasi. Pengukuran gangguan udara menggunakan anemometer akan dilakukan pada dua buah *quadrotor* yang lain. Pengukuran respons pergerakan *quadrotor* dengan lintasan yang lebih panjang untuk memastikan pergerakan *quadrotor* mencapai keadaan tunak. Selanjutnya melakukan karakterisasi sistem dinamik untuk setiap *quadrotor* dengan variasi *input* yang diberikan. Pada pengerjaan tahap kedua, mulai mempelajari simulasi simulink dengan memanfaatkan data karakteristik *quadrotor* penelitian sebelumnya.

## Penutup

Demikian Laporan Kemajuan penelitian tugas akhir dengan judul “Perancangan Sistem Kontrol Pergerakan Untuk Mengatasi Pengaruh Gangguan Udara Dalam Formasi Multi*quadrotor*” telah disusun berdasarkan kegiatan penelitian yang telah dilakukan penulis selama satu semester dan berisi rencana penelitian selanjutnya.

Dengan demikian, Laporan Kemajuan ini diharapkan dapat memberikan gambaran terkait pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, hingga metode penelitian ditulis berdasarkan studi literatur yang sudah dilakukan oleh penulis dari beberapa jurnal, tugas akhir dan tesis. Laporan Kemajuan ini pun diharapkan dapat menjelaskan terkait metodologi dan metode yang dilakukan pada penelitian tugas akhir. Oleh karena itu, penulis berharap agar mendapatkan kritik dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan ataupun rencana penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] K. Martin, B. Stefan, Y. Kaloyan, C. Denis, Kambushev, and C. Nayden, “Influence of atmospheric turbulence on the control of flying robotics systems,” 2019.

[2] H. H. Hady, M. N. Elya, A. B. Azrena, and S. N. Makhtar, “Development of *Quadrotor* Control under Wind Disturbance,” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/ISMSIT52890.2021.9604649.

[3] P. Aleix, T. L. Brett, and P. H. Jonathan, “Dynamic Landing of an Autonomous *Quadrotor* on a Moving Platform in Turbulent Wind Conditions,” Paris, Perancis, Aug. 2020.

[4] G. Valerian, “Kontrol Formasi *Quadrotor* Menggunakan Metode Cyclic Leader Follower SFM Sebagai Media Pelacakan Lokasi Tesis,” Bandung, 2022.

[5] S. R. Nekoo, J. A. Acosta, G. Heredia, and A. Ollero, “Soft-Landing of Multi-Rotor Drones using a Robust Nonlinear Control and Wind Modeling,” in *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021, pp. 1070–1079. doi: 10.1109/ICUAS51884.2021.9476763.

[6] G. Regula and B. Lantos, “Formation Control of a Large Group of UAVs with Safe Path Planning,” Budapest, 2013.

[7] W. Zhikai, H. Deqing, H. Tianpeng, and Q. Na, “Active disturbance rejection control for a *quadrotor* UAV,” Chengdu, Nov. 2020.

[8] F. Mukhlish, E. Ekawati, M. Fakhruroji, and I. A. Prakosa, “Compensating Wind Disturbance on Gesture Commanded *Quadrotor*s Flight,” 2015.

[9] M. J. Kamran, D. Hazry, S. A. Faiz, M. T. Hassan, A. W. Faizan, and Hussain, “Altitude and Horizontal Motion Control of *Quadrotor* UAV in the Presence of Air Turbulence,” Dec. 2013.

[10] M. Dounia, B. Z. Abdeslem, and H. Ramdane, “Trajectory Tracking Performance with two Nonlinear Controllers of *Quadrotor* under Wind Effect,” in *Proceedings of the International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies, IC\_ASET 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 50–55. doi: 10.1109/IC\_ASET49463.2020.9318319.

[11] MathWorks, “Dryden Wind Turbulence Model (Continuous),” https://www.mathworks.com/help/aeroblks/drydenwindturbulencemodelcontinuous.html.

[12] P. Abichandani, D. Lobo, G. Ford, D. Bucci, and M. Kam, “Wind Measurement and Simulation Techniques in Multi-Rotor Small Unmanned Aerial Vehicles,” *IEEE Access*, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977693.

[13] D. Kucherov, A. Kozub, O. Sushchenko, and R. Skrynkovskyy, “Stabilizing the spatial position of a *quadrotor* by the backstepping procedure,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 23, no. 2, pp. 1188–1199, Aug. 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v23.i2.pp1188-1199.

[14] R. Nazir, A. A. laghari, K. Kumar, S. David, and M. Ali, “Survey on Wireless Network Security,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 3. Springer Science and Business Media B.V., pp. 1591–1610, May 01, 2021. doi: 10.1007/s11831-021-09631-5.

[15] B. A. Forouzan, *TCP/IP Protocol Suite*, 3rd ed. McGraw-Hill, Inc., 2005.

[16] F. Taha Al-Dhief *et al.*, “Performance Comparison between TCP and UDP Protocols in Different Simulation Scenarios,” 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329698255

[17] R. Khandait, V. Kumar, V. Bhurse, V. Tiwari, and S. Khubalkar, “Quadcopter Control using Different Controllers,” in *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power, ICICCSP 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICICCSP53532.2022.9862416.

[18] T. Huang and D. Huang, “Backstepping control for a *quadrotor* unmanned aerial vehicle,” in *Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, CAC 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, pp. 2475–2480. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9326765.

[19] M. Karahan and C. Kasnakoglu, “Nonlinear Modeling and Robust Backstepping Control of a *Quadrotor* Unmanned Aerial Vehicle,” in *2022 5th International Conference on Computer and Informatics Engineering, IC2IE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 94–99. doi: 10.1109/IC2IE56416.2022.9970136.

[20] B. Xu and K. Mou, “Adaptive Feed-Forward Control for Seeker Based on the Disturbance Observer,” in *Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC 2019)*, 2019.

[21] V. A. Budnyaev, I. F. Filippov, V. V. Vertegel, and S. Y. Dudnikov, “Simulink-based quadcopter control system model,” in *2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering, PIERE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 246–250. doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314676.