

LAPORAN TAHUNAN
PENELITIAN HIBAH BERSAING



UBAYA
UNIVERSITAS SURABAYA

**PERANCANGAN DAN ANALISA PERFORMANSI
FUZZY CONTROL DAN H^∞ CONTROL
UNTUK TRAJECTORY TRACKING AR.DRONE QUADROTOR**

Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun

Ketua : Agung Prayitno, S.T., M.Eng (0725107901)
Anggota: Ir. Veronica Indrawati, M.T. (0708046601)

**Universitas Surabaya
November 2014**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Kegiatan : Perancangan dan Analisa Performansi Fuzzy Control dan H-Infinity Control Trajectory Tracking AR.Drone Quadrotor

Peneliti / Pelaksana

Nama Lengkap : AGUNG PRAYITNO S.T., M.Eng
NIDN : 0725107901
Jabatan Fungsional :
Program Studi : Teknik Elektro
Nomor HP : 087854417676
Surel (e-mail) : prayitno_agung@staff.ubaya.ac.id

Anggota Peneliti (1)

Nama Lengkap : Ir. VERONICA INDRAWATI M.T.
NIDN : 0708046601
Perguruan Tinggi : Universitas Surabaya

Institusi Mitra (jika ada)

Nama Institusi Mitra :
Alamat :
Penanggung Jawab :
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp. 53.750.000,00
Biaya Keseluruhan : Rp. 116.700.000,00

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik



(Dr. Dra. Amelia Santoso, M.T.)
NIP/NIK 193015

Surabaya, 7 - 11 - 2014,
Ketua Peneliti,



(AGUNG PRAYITNO S.T., M.Eng)
NIP/NIK204037

Menyetujui,
Ketua LPPM



(Dr. Yoan Nursari Simanjuntak, S.H., M.Hum)
NIP/NIK 196008

RINGKASAN

Pada penelitian tahun I ini, algoritma *fuzzy logic controller* (FLC) dirancang dan diimplementasikan untuk menyelesaikan *trajectory tracking AR.Drone quadrotor* secara *autonomous*. Parameter model dari AR.Drone diperoleh dengan pendekatan *data modeling* dan divalidasi untuk masing masing *basic flight* yang meliputi terbang dengan *pitch*, *roll*, *yawrate* dan *vertical rate* tertentu. Sebagai input dari FLC dipilih jarak antara posisi AR.Drone terhadap referensi posisi serta sudut antara arah AR.Drone dengan referensi posisi. Sedangkan output dari FLC adalah nilai *pitch* dan *yawrate* yang akan menjadi sinyal kontrol bagi AR.Drone. Pada paper ini, data navigasi AR.Drone berupa *forward speed* (v_x), *sideward speed* (v_y) dan *yaw* akan digunakan untuk mengestimasi posisi dan orientasi dari AR.Drone. Untuk mengkompensasi pergeseran ke arah sumbu y selama *trajectory tracking*, nilai v_y juga digunakan untuk kriteria dalam besarnya kompensasi roll. Algoritma FLC diimplementasikan pada AR.Drone 2.0 Elite Edition dengan menggunakan software LabVIEW dan diuji dengan beberapa macam *trajectory* antara lain garis lurus, garis lurus dengan belokan tegak lurus, *trajectory* berbentuk kotak dan *trajectory* melengkung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa AR.Drone dapat mengikuti *trajectory* yang diberikan dengan baik dengan initial posisi dan orientasi yang berbeda beda.

Kata Kunci: *roll, pitch, yawrate, vertical rate, trajectory tracking, fuzzy control,*

AR.Drone

PRAKATA

Laporan Tahunan ini merupakan laporan kepada DIKTI sebagai bentuk tanggung jawab sebagai penerima penelitian skema Penelitian Hibah Bersaing 2014-2015. Laporan ini juga merupakan bentuk sharing hasil penelitian kami kepada masyarakat umum. Dengan selesainya penelitian tahun I ini, saya sebagai ketua tim penelitian mengucapkan terima kasih kepada semua anggota dan tim mahasiswa yang terlibat dalam penelitian ini. Kerja keras dan usaha bersama memperlihatkan hasil yang signifikan dari penelitian ini. Saat ini kita sudah menyelesaikan tahun I dan telah menyampaikan proposal penelitian tahun II yang akan fokus pada rancangan dan implementasi H-infinity controller untuk trajectory tracking AR.Drone Quadrotor. Untuk capaian ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang selalu mencurahkan rahmat kepada semua makhluknya.
2. Dr. Yoan Nursari Simanjuntak, S.H., M.Hum. sebagai ketua LPPM Universitas Surabaya yang telah memfasilitasi penelitian ini
3. Dr. Dra. Amelia Santoso, M.T. sebagai Dekan Fakultas Teknik yang telah memfasilitasi penelitian ini.
4. Seluruh anggota tim penelitian baik dosen dan mahasiswa yang terlibat : Ibu Veronica, Gabriel, Thomas dan Steven yang telah bekerja keras dan kompak untuk mengerjakan penelitian ini.
5. Rekan rekan sejawat dosen di Jurusan Teknik Elektro Universitas Surabaya.
6. Keluarga tim peneliti yang selalu memberi semangat dan motivasi.

Semoga laporan tahunan ini memberikan kontribusi keilmuan kepada masyarakat umum dan sekaligus sebagai bentuk tanggung jawab peneliti dalam menerima hibah ini dari DIKTI. Semoga dengan selesainya tahun I ini memberikan tambahan semangat baru bagi tim peneliti untuk segera menyelesaikan penelitian tahun II dan mendapatkan hasil sesuai yang diharapkan yang menghasilkan luaran dan kontribusi keilmuan yang berarti.

DAFTAR ISI

Halaman Sampul.....	i
Halaman Pengesahan	ii
Ringkasan	iii
Prakata	iv
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vii
Daftar Gambar	viii
Bab I Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Sistematika Penulisan Laporan	2
Bab II Tinjauan Pustaka	3
Bab III Tujuan dan Manfaat Penelitian	7
3.1. Tujuan Penelitian	7
3.2. Manfaat Penelitian.....	7
Bab IV Metode Penelitian	8
4.1. Menyiapkan Program Data Acquisition Untuk Eksperimen Terbang AR.Drone Dengan Menggunakan Software LabVIEW	8
4.2. Eksperimen pengambilan data terbang untuk proses pemodelan	10
4.3. Estimasi parameter dan pemodelan AR.Drone	12
4.4. Rancangan dan Implementasi Fuzzy Logic Controller pada AR.Drone ...	13
Bab V Hasil Yang Dicapai	18
Bab VI Rencana Penelitian Tahun II	21
Bab VII Kesimpulan dan Saran	23
7.1. Kesimpulan	23
7.2. Saran	23
Daftar Pustaka	24

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Parameter Model AR.Drone	12
---	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Konfigurasi Input-Output AR.Drone.....	5
Gambar 2. Degree of Freedom AR.Drone	6
Gambar 3. Front Panel	9
Gambar 4. Block Diagram	9
Gambar 5. Struktur Model AR.Drone	10
Gambar 6. Proses pengambilan data navigasi AR.Drone	11
Gambar 7. Data Flow Program Pada LabVIEW Untuk AR.Drone 2.0	13
Gambar 8. Blok Diagram FLC Controlled System	14
Gambar 9. Distance and angle calculation	14
Gambar 10. Fuzzy Logic Controller	16
Gambar 11. Pengujian Trajectory Tracking	17
Gambar 12. Hasil Pengujian dengan Trajectory Lurus	18
Gambar 13. Pengujian dengan trajectory belok	19
Gambar 14. Pengujian dengan trajectory kotak	19
Gambar 15. Pengujian dengan trajectory melengkung	20
Gambar 16. Tahapan penelitian selama 2 tahun	21
Gambar 17. Blok $H-\infty$ control trajectory tracking yang akan dirancang.....	22

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Quadrotor secara umum telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti untuk monitoring keamanan gedung, *aerial photography and video*, *aerial surveillance*, *property assessment and real estate promotion* dll. Namun demikian kebanyakan masih dikendalikan secara manual oleh pengguna dari *ground station*. Agar *quadrotor* dapat terbang secara *autonomous*, tentunya perlu dirancang suatu *autonomous flight tasks control* yang memungkinkan *quadrotor* dapat terbang dengan berbagai manuver untuk misi atau tugas tertentu. *Autonomous flight tasks* meliputi *vertical take-off and landing*, *hover flight*, *tracking an object or path*, dan *trajectory tracking*. Desain dan pengembangan algoritma kontrol untuk *trajectory tracking* merupakan salah satu topik yang menarik untuk diriset. Agar pengembangan algoritma tidak terhalang waktu, diperlukan sebuah platform *quadrotor* yang secara hardware sudah bagus dan siap sehingga algoritma kontrol yang didesain dapat dicoba pada platform tersebut. Salah satu platform yang dapat digunakan adalah AR Drone dan digunakan dalam penelitian ini.

AR Drone adalah salah satu *quadrotor* yang saat ini banyak digunakan sebagai platform penelitian pengembangan algoritma kontrol *quadrotor* di berbagai universitas di dunia. Pemilihan AR Drone untuk penelitian ini karena platform ini relatif murah dan mempunyai *on-board electronics* yang di dalamnya sudah terdapat *motherboard* beserta lengkap dengan *processor* dan *Wi-Fi chip*, sensor *accelerometer*, sensor *gyroscope*, sensor *ultrasonic*, mikrokontroler dan dua buah kamera. Platform ini juga telah disertakan *real time operating system* yang memungkinkan berbagai tugas dapat dilakukan secara bersamaan seperti berkomunikasi dengan *ground station* melalui *Wi-Fi*, *sensor acquisition*, *video data sampling*, *image processing*, *state estimation*, dan *closed-loop control*.

Trajectory tracking memungkinkan AR Drone *quadrotor* untuk terbang mengikuti referensi yang diberikan dalam koordinat ruang. Contoh real aplikasi dari algoritma ini adalah *autonomous flight quadrotor* untuk terbang formasi untuk kepentingan show/hiburan.

Dalam keseluruhan penelitian selama 2 tahun akan dirancang dua buah algoritma kontrol untuk menyelesaikan masalah *trajectory control* pada AR Drone *quadrotor* yaitu *fuzzy logic control* dilakukan pada tahun pertama ini dan *H-∞ control* untuk tahun kedua. Dari hasil tinjauan pustaka, belum ditemukan penelitian menggunakan algoritma ini

untuk misi misi *trajectory tracking* pada AR Drone, sehingga topik ini menjadi sangat menantang. Fokus penelitian tahun I ini adalah mendapatkan rancangan *fuzzy logic controller (FLC)* untuk menyelesaikan permasalahan *trajectory tracking*.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasar latar belakang di atas, permasalahan pada penelitian tahun I ini dapat dirumuskan sbb:

- a. Bagaimana mendapatkan model dinamik dari *AR Drone quadrotor* yang akan menjadi model dari sistem saat perancangan *fuzzy logic control*?
- b. Bagaimana merancang dan mensimulasikan *fuzzy logic control* untuk *trajectory tracking AR Drone Quadrotor*?
- c. Bagaimana merealisasikan algoritma *fuzzy logic control* yang telah dirancang pada platform *AR Drone Quadrotor*?
- d. Bagaimana menghitung *RMSE* dari hasil simulasi dan implementasi serta menganalisis hasil tersebut sebagai luaran dari penelitian ini.

1.3. Sistematika Penulisan Laporan

Laporan Tahunan penelitian ini ditulis dengan sistematika sebagai berikut:

Bab 1 : Pendahuluan menjelaskan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah dan sistematika penulisan laporan.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka menjelaskan tentang ringkasan dari study literatur yang berkaitan dengan penelitian.

Bab 3 : Tujuan dan Manfaat Penelitian menjelaskan tentang tujuan dan manfaat dari penelitian

Bab 4 : Metodologi Penelitian menjelaskan tahapan tahapan penelitian dan detail pekerjaan yang dilakukan dari awal penelitian sampai akhir penelitian ini.

Bab 5 : Hasil Yang Dicapai menjelaskan hasil hasil yang telah dicapai.

Bab 6 : Rencana Penelitian tahun ke - 2 yang menjelaskan tahapan penelitian yang akan dilaksanakan pada tahun ke-2.

Bab 7 : Kesimpulan dan Saran berisi kesimpulan dan saran dari laporan kemajuan ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Helikopter dengan 4 buah baling baling tetap yang tersusun secara diagonal atau yang umum dikenal dengan quadrotor, menjadi bidang riset yang sangat berkembang pada beberapa tahun ini. Platform ini dipilih karena mempunyai konstruksi mekanik yang sederhana tetapi mempunyai kemampuan terbang stationer, terbang vertikal, terbang dengan kecepatan rendah dan dapat juga bermanuver secara cepat. Namun demikian pesawat ini juga mempunyai beberapa kelemahan antara lain keterbatasan supply energi dan beban yang dapat diangkut. Tantangan lain pada pesawat ini adalah susah untuk dikontrol dikarenakan sistemnya yang non linear [1]. Namun demikian banyak aplikasi yang telah dihasilkan dengan pemanfaatan quadrotor ini yang antara lain dapat digunakan untuk *monitoring* dan analisis lalu lintas, *aerial photography and video*, *aerial surveillance and intelligence for law enforcement*, *property assessment* dan *real estate promotion* dll [2]. Namun demikian kebanyakan masih diterbangkan secara manual oleh operator di *ground station*.

Agar quadrotor dapat terbang secara *autonomous*, tentunya perlu dirancang suatu *autonomous flight tasks control* yang memungkinkan quadrotor dapat terbang dengan berbagai manuver untuk misi atau tugas tertentu. *Autonomous flight tasks* meliputi *vertical take-off and landing*, *hover flight*, *tracking an object or path*, dan *trajectory tracking*. Desain dan pengembangan algoritma kontrol untuk trajectory tracking merupakan salah satu topik yang menarik untuk diriset. Agar pengembangan algoritma tidak terhalang waktu, diperlukan sebuah platform quadrotor yang secara hardware sudah bagus dan siap sehingga algoritma kontrol yang didesain dapat dicoba pada platform tersebut. Salah satu platform yang dapat digunakan untuk penelitian ini adalah AR Drone.

Menurut [3] ada beberapa *layer* untuk mengimplementasikan *autonomous UAV*. *Layer* pertama adalah *kernel control* yang bertanggung jawab pada *asymtotic stability*. *Layer* kedua adalah *command generator* yang berperan membangkitkan perintah terbang kepada *kernel control*. *Layer* ketiga adalah *flight scheduling* yang berfungsi untuk menentukan *flight plan*, *flight tasks* dan *references*. AR.Drone telah mempunyai *layer* pertama yang menerima perintah terbang melalui *Wi-Fi*. *Angle stabilization* dan *vertical speed* dikontrol dengan software pada *inner board* bawaan AR.Drone. Sedangkan AR.Drone belum mempunyai *layer* kedua dan ketiga, ini memungkinkan para peneliti untuk mengeksplor berbagai algoritma kontrol untuk *flight tasks* AR.Drone.

AR Drone adalah salah satu quadrotor yang saat ini banyak digunakan sebagai platform penelitian pengembangan algoritma kontrol quadrotor di berbagai universitas di dunia. Pemilihan AR Drone untuk penelitian ini karena platform ini relatif murah dan mempunyai *on-board electronics* yang di dalamnya sudah terdapat *motherboard* beserta lengkap dengan *processor* dan *Wi-Fi chip*, sensor *accelerometer*, sensor *gyroscope*, sensor *ultrasonic*, mikrokontroler dan dua buah kamera. Platform ini juga telah disertakan *real time operating system* yang memungkinkan berbagai tugas dapat dilakukan secara bersamaan seperti berkomunikasi dengan *ground station* melalui *Wi-Fi*, *sensor acquisition*, *video data sampling*, *image processing*, *state estimation*, dan *closed-loop control*. [4]

AR.Drone yang digunakan sebagai platform pada penelitian ini adalah AR.Drone 2.0 Elite Edition seperti ditunjukkan pada Gambar 1. AR.Drone ini secara garis besar tersusun dari: frame yang terbuat dari *carbon fiber*, body pesawat dan pelindung yang terbuat dari *foam*, 4 buah motor dan *propeler*, *innerboard electronic* dan dua buah kamera. Spesifikasi komponen penting pada AR.Drone ini adalah sbb: *4 brushless inrunner motors. 14.5W 28,500 RPM, 1GHz 32 bit ARM Cortex A8 processor with 800MHz video DSP TMS320DMC64x, 1GB DDR2 RAM at 200MHz, 3 axis gyroscope 2000°/second precision, 3 axis accelerometer +/-50mg precision, 3 axis magnetometer 6° precision, Pressure sensor +/- 10 Pa precision, Ultrasound sensors for ground altitude measurement, 60 FPS vertical QVGA camera for ground speed measurement, Linux 2.6.32, USB 2.0 high speed for extensions, Wi-Fi, HD Camera. 720p 30FPS*. [5]

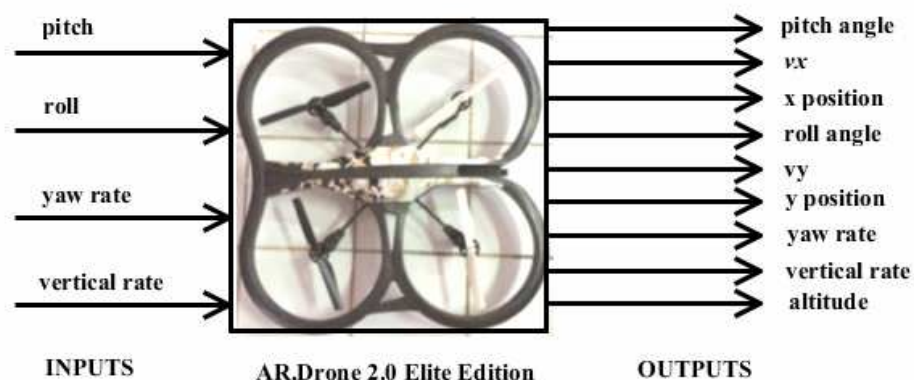
Dengan internal kontroler bawaan pada AR.Drone memungkinkan pengguna untuk mengendalikan manuver terbang AR.Drone dengan mudah karena sebenarnya AR.Drone dirancang sebagai sebuah *reality game*. Aplikasi untuk mengendalikan AR.Drone ini dapat didownload di *Google Play* bagi pengguna *Android* ataupun di *AppStore* bagi pengguna *iOS*. Beberapa aplikasi yang dapat digunakan untuk mengontrol AR.Drone ini adalah *AR.FreeFlight 2.0* dan *AR.Race 2*. Namun demikian, Parrot, sebagai pembuat AR.Drone juga menyertakan *Software Development Kit (SDK)* [6] yang memungkinkan pengguna untuk mengakses AR.Drone dengan *Wi-fi* sehingga dapat melakukan kontrol, merancang algoritma kontrol sendiri dan melakukan *data acquisition* dengan berbagai macam software.

Pada *internal controller* yang sudah disertakan pada AR.Drone pengguna dapat melakukan beberapa kontrol dasar yang meliputi *take-off*, *landing*, *hover* dan *emergency stop*. Setiap perintah kontrol tersebut sudah tersedia *closed-loop control* pada *internal*

controller AR.Drone tersebut. Sebagai contoh perintah *take-off*, *internal controller* akan melakukan aksi dengan urutan sebagai berikut: [7]

- Jalankan semua motor
- Naikkan *thrust* dari semua motor secara berimbang untuk menaikkan ketinggian AR.Drone hingga stabil di sekitar 1 meter.
- Lakukan koreksi kecepatan rotor untuk mempertahankan *zero attitude (roll, pitch)* dan *zero yaw*.
- Monitoring kamera bawah untuk mempertahankan posisi drone agar tetap di atas titik *take-off* nya tadi.

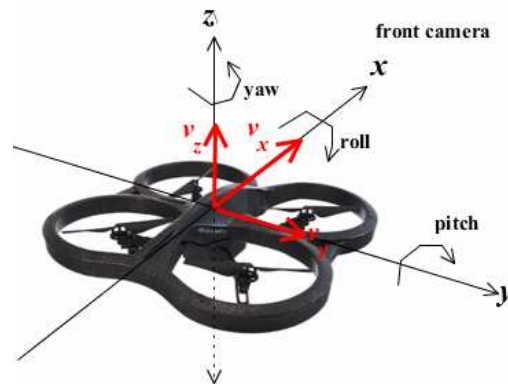
Selain kontrol dasar tersebut, pengguna juga dapat mengontrol gerak AR.Drone dengan 4 buah input yang meliputi: *pitch*, *rol*, *yaw rate* dan *vertical rate*. Jika keempat input ini tidak ada (bernilai 0) maka secara otomatis drone akan bekerja seperti halnya pada kondisi *hover*. Output AR.Drone yang dapat direkam data navigasinya antara lain : *actual roll angle*, *forward speed v_x* , *x-position estimation*, *actual roll angle*, *sideward speed v_y* , *y-position estimation*, *yaw rate*, *yaw estimation*, *vertical rate*, *altitude*, *video from bottom camera* dan *front camera*.



Gambar 1. Konfigurasi Input-Output AR.Drone

AR.Drone mempunyai *6 degree of freedom (DOF)* yaitu tiga buah komponen *translational* berupa posisi *x,y,z* dan tiga buah komponen *rotational* berupa sudut *pitch*, *roll*, *yaw*. Untuk memperjelas pemahaman, perhatikan Gambar 2 di bawah. Pusat koordinat adalah titik tengah dari AR.Drone dengan sumbu *x* searah dengan kamera depan. Kecepatan *translational* dari AR.Drone dinyatakan dengan *forward speed v_x* , *sideward speed v_y* dan *vertical speed v_z* . *Pitch* adalah sudut akibat pergerakan rotasi AR.Drone terhadap sumbu *y*, *roll* adalah sudut akibat rotasi terhadap sumbu *x* sedangkan

yaw adalah sudut akrobat rotasi terhadap sumbu z . Variabel variabel tersebut merupakan output dari AR.Drone yang disebabkan oleh kombinasi dari 4 buah sinyal kontrol berupa *roll*, *pitch*, *yaw rate* ataupun *vertical rate*.



Gambar 2. Degree of Freedom AR.Drone

Banyak riset yang telah dilakukan dengan menggunakan berbagai macam quadrotor dan AR.Drone sebagai platform risetnya. Michael Mogenson [9] membuat AR.Drone LabVIEW toolkit yang memudahkan bagi para mahasiswa, pengajar ataupun peneliti untuk mempelajari AR.Drone 1.0. Dengan toolkit ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol, membaca data navigasi dan membaca data gambar/video dari kedua kamera *onboard* yang terpasang pada AR.Drone. Krajnik dkk [1] menjelaskan bahwa AR.Drone dapat digunakan sebagai platform riset dan pendidikan. Dalam papernya dijelaskan tentang *hardware* dan *software* pada AR.Drone, bagaimana mendapatkan dinamik model dari sistem drone dengan data modeling dan menunjukkan beberapa algoritma dasar untuk *position stabilization*, *object following* dan *autonomous navigation*. Sun Yue [9] melakukan pemodelan dan identifikasi parameter model dengan berbagai eksperimen. Berdasarkan model dinamik yang diperoleh *local* dan *global controller* serta *filter* didesain. *Local controller* digunakan untuk mengontrol *throttle*, *roll*, *pitch* dan *yaw* sedangkan *global controller* digunakan untuk *position control* yang menggunakan Kinect sebagai sensor. Filter digunakan untuk mereduksi *noise* dari sensor. Jacco dan Mario [3] menggunakan gabungan Sensor GPS dan sensor barometer untuk menentukan posisi dari drone. Sensor GPS digunakan untuk menentukan posisi horisontal sedangkan sensor barometer digunakan untuk menentukan altitude dari drone. Guilherme dkk [10] menggunakan *predictive* dan *nonlinear robust control strategy* untuk menyelesaikan masalah *path tracking* dari quadrotor. Struktur kontrol yang digunakan ada dua yaitu MPC untuk mengikuti *trajectory* dari *reference* dan *non linear H^∞ controller* untuk stabilisasi pergerakan rotasi.

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tahun I ini adalah untuk mendapatkan algoritma *fuzzy logic controller* untuk menyelesaikan *trajectory tracking* yang diberikan. Pada penelitian ini referensi *trajectory* akan dibangkitkan dengan *remote control* oleh pengguna dan pada saat bersamaan posisi dan orientasi drone akan direkam selama terbang. Dengan algoritma yang sudah dirancang AR.Drone akan terbang secara *autonomous* untuk mengikuti referensi *trajectory* tadi. Performansi dari algoritma kontrol yang dirancang akan dianalisis dengan *root mean square error (RMSE)*.

3.2. Manfaat Penelitian

Keutamaan penelitian ini adalah bahwa algoritma kontrol tersebut belum ditemukan digunakan pada penelitian lain untuk *trajectory tracking* pada AR Drone quadrotor sehingga hasil penelitian akan memberikan kontribusi yang nyata pada pengembangan algoritma *flight tasks control* pada AR Drone quadrotor. Kontribusi ilmiah utama yang ditargetkan pada penelitian ini adalah diperolehnya algoritma *fuzzy control* yang dapat sebagai *autonomous trajectory tracking AR Drone*. Dengan algoritma *trajectory tracking* ini akan memungkinkan bagi AR Drone *men-tracking* referensi yang diberikan secara *autonomous* dalam menyelesaikan misi yang diberikan seperti halnya *indoor monitoring* keamanan gedung bertingkat, show terbang formasi dll.

BAB IV

METODE PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian tahun I ini dilakukan dengan tahapan tahapan terencana. Dengan alasan efisiensi waktu, tahapan yang dapat dilakukan secara paralel dilakukan secara paralel oleh anggota tim sedangkan tahapan yang harus berjalan serial akan dilakukan secara bertahab. Tahapan pelaksanaan penelitian tahun I ini adalah sebagai berikut:

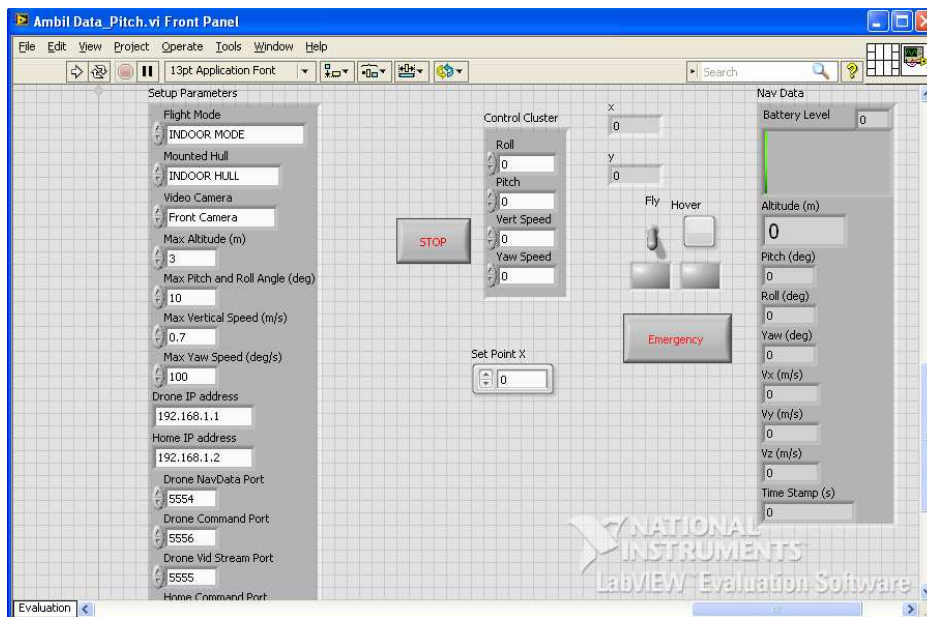
- Menyiapkan program data acquisition eksperimen terbang AR.Drone dengan menggunakan software LabVIEW.
- Eksperimen pengambilan data terbang untuk proses pemodelan
- Estimasi parameter dan pemodelan AR.Drone
- Rancangan dan implementasi *fuzzy logic controller* pada AR.Drone
- Melakukan eksperimen *autonomous trajectory tracking* dan menganalisa dengan RMSE

Tahap pertama dan kedua dilakukan secara serial, sedangkan tahapan berikutnya dilakukan secara paralel. Detil informasi masing masing tahap dijelaskan di bawah.

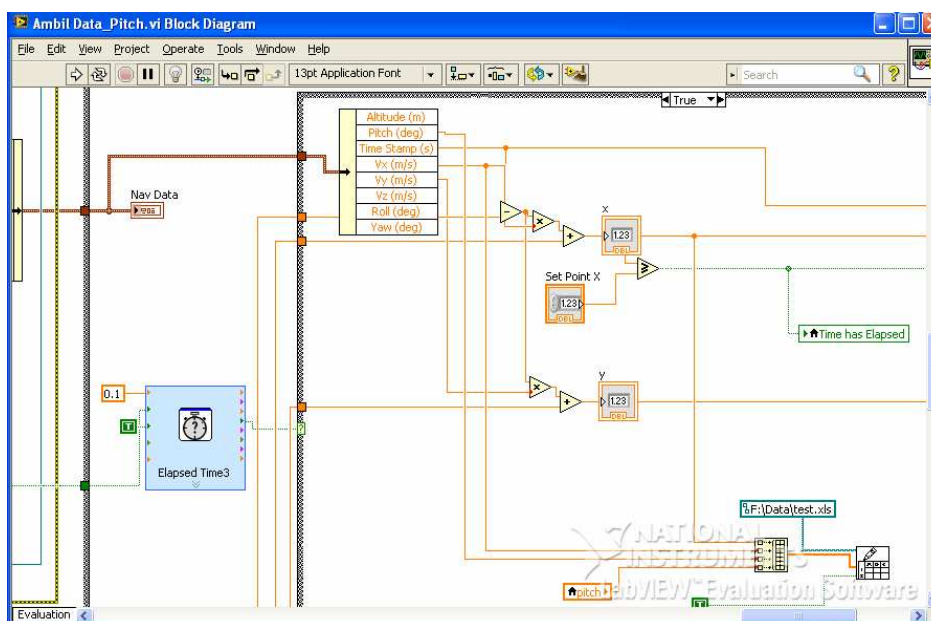
4.1. Menyiapkan Program Data Acquisition Untuk Eksperimen Terbang AR.Drone Dengan Menggunakan Software LabVIEW.

Tahap ini merupakan tahap awal dan penting pada penelitian ini. Untuk mendapatkan data terbang diperlukan program yang memungkinkan untuk mengontrol terbang AR.Drone dan merekam semua data navigasinya. Adanya *onboard internal controller* pada AR.Drone memungkinkan drone diakses *via wi-fi* untuk dikendalikan dari *ground station* melalui komputer. Untuk itulah pada tahap ini dirancang program komputer yang akan digunakan untuk mengendalikan AR.Drone dengan menggunakan software LabVIEW. LabVIEW dipilih karena software ini memiliki kemudahan dalam programming dengan blok blok virtual instrument yang secara otomatis membangkitkan front panel, sehingga memudahkan dalam membuat graphical user interface. Dari hasil tinjauan pustaka terdapat AR.Drone Labview toolkit [8] yang dikembangkan saat itu untuk AR.Drone 1.0, yang tidak dapat digunakan untuk AR.Drone 2.0 yang dipakai dalam penelitian ini. Dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi program AR.Drone LabVIEW

toolkit dan *update firmware* sehingga dapat digunakan untuk penelitian ini. Front panel dan block diagram program ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Fitur yang digunakan dalam penelitian ini adalah kontrol dasar terbang yang meliputi *fly*, *landing*, *hover*, dan *emergency stop*. Selanjutnya terbang dengan reference input yang meliputi input *pitch*, *roll*, *yaw rate* dan *vertical speed*. Untuk fungsi akuisisi data data navigasi yang direkam adalah *ref pitch*, *actual pitch*, *forward speed*, *x-position*, *ref roll*, *actual roll*, *sideward speed*, *y-position*, *ref yaw rate*, *actual yaw rate*, *yaw estimation*, *ref vertical speed*, *actual vertical speed*, *z-position*.



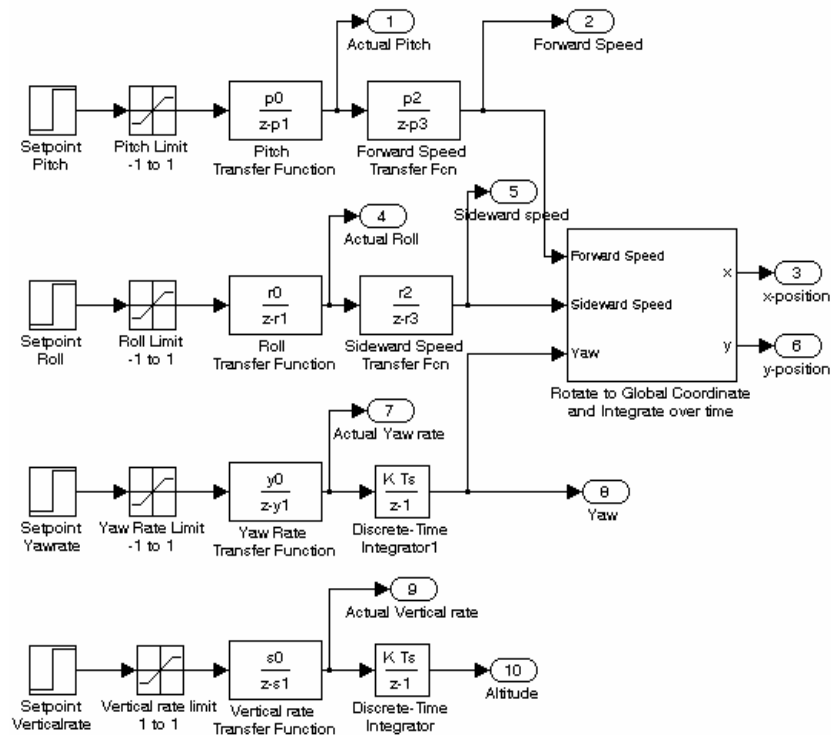
Gambar 3. Front Panel



Gambar 4. Block Diagram

4.2. Eksperimen pengambilan data terbang untuk proses pemodelan

Tujuan dari tahap ini adalah untuk mendapatkan data eksperimen terbang yang akan digunakan untuk estimasi parameter model dari platform AR Drone quadrotor. Dengan struktur model AR.Drone yang dirancang Krajnik[1] seperti Gambar 5, eksperimen pengambilan data terbang dilakukan untuk masing masing input AR.Drone roll, pitch, yaw rate dan vertical rate dengan indoor hull maupun outdoor hull. Pada masing masing input ini, dilakukan eksperimen untuk beberapa nilai reference input dalam rentang -0.35 s.d 0.35 kemudian data navigasi yang diperlukan akan direkam.



Gambar.5. Struktur Model AR.Drone

Secara umum prosedur eksperimen untuk pengambilan data dilakukan sebagai berikut:

- Pitch: berikan nilai setpoint pitch yang diinginkan (misalkan -0.3) dan *take-off* kan dengan kondisi *hover on*, setelah ketinggian *AR.Drone* stabil di 1 meter *switch-off hover* sehingga drone akan bergerak ke depan dengan sudut pitch tertentu beberapa detik kemudian *switch-on hover* lagi dan *landing*-kan. Data yang direkam selama terbang adalah setpoint pitch (dalam rentang -1 s.d 1), pitch yang terukur (θ) [dalam satuan derajat], *forward speed* (v_x) [m/s], dan estimasi *x-position* [meter].

- Roll: berikan nilai setpoint roll yang diinginkan (misal 0.25) dan *take-off* kan dengan kondisi *hover on*, setelah ketinggian *AR.Drone* stabil di 1 meter *switch-off hover* sehingga drone akan bergerak ke samping dengan sudut roll tertentu beberapa detik kemudian *switch-on hover* lagi dan *landing*-kan. Data yang direkam selama terbang adalah setpoint roll (dalam rentang -1 s.d 1), roll yang terukur (ϕ)[dalam satuan derajat], *sideward speed* (v_y)[m/s], dan estimasi *y-position* [meter].
- Yaw rate: berikan nilai setpoint yaw rate yang diinginkan (misalkan -0.2) dan *take-off* kan dengan kondisi *hover on*, setelah ketinggian *AR.Drone* stabil di 1 meter *switch-off hover* sehingga drone akan bergerak pivot pada ketinggian tersebut dengan kecepatan putar tertentu selama beberapa detik kemudian *switch-on hover* lagi dan *landing*-kan. Data yang direkam selama terbang adalah setpoint yaw rate (dalam rentang -1 s.d 1), yaw yang terukur (ψ) [dalam satuan derajat]. Yaw rate dihitung dengan menghitung selisih sudut antar sampling dan dibagi dengan sampling time.
- Vertical rate: berikan nilai setpoint vertical rate yang diinginkan (misalkan 0.2) dan *take-off* kan dengan kondisi *hover on*, setelah ketinggian *AR.Drone* stabil di 1 meter *switch-off hover* sehingga drone akan bergerak vertical dengan kecepatan tertentu selama beberapa detik kemudian *switch-on hover* lagi dan *landing*-kan. Data yang direkam selama terbang adalah setpoint *vertical rate* (dalam rentang -1 s.d 1), ketinggian yang terukur (z)[dalam satuan meter]. *Vertical rate* (v_z)dihitung dengan menghitung selisih ketinggian antar sampling dan dibagi dengan sampling time.

Gambar 6 menunjukkan proses pengambilan data navigasi untuk proses pemodelan ini.



Gambar 6. Proses pengambilan data navigasi AR.Drone

4.3. Estimasi parameter dan pemodelan AR.Drone

Estimasi masing masing parameter model pada struktur model AR.Drone dilakukan dengan menggunakan *least-square method*. Untuk menjelaskan proses estimasi diambil contoh estimasi nilai r_0 dan r_1 . Untuk estimasi parameter ini diperlukan data setpoint roll (ϕ_{ref}) dan roll yang terukur (ϕ). Kedua data navigasi ini disusun seperti pada persamaan 2 berikut:

$$\begin{bmatrix} \phi(t) \\ \phi(t+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(t-1) & \phi_{ref}(t-1) \\ \phi(t) & \phi_{ref}(t) \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \phi(n-1) & \phi_{ref}(n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

Jika secara umum persamaan di atas dapat dinyatakan dengan bentuk sebagai berikut :

$$y = \Phi \hat{\vartheta} \dots\dots\dots(3)$$

dimana y adalah vektor output, Φ adalah matrix regressor dan $\hat{\vartheta}$ adalah vektor paramater. Dengan menggunakan *least-square method* vektor parameter dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\hat{\vartheta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi y \dots\dots\dots(4)$$

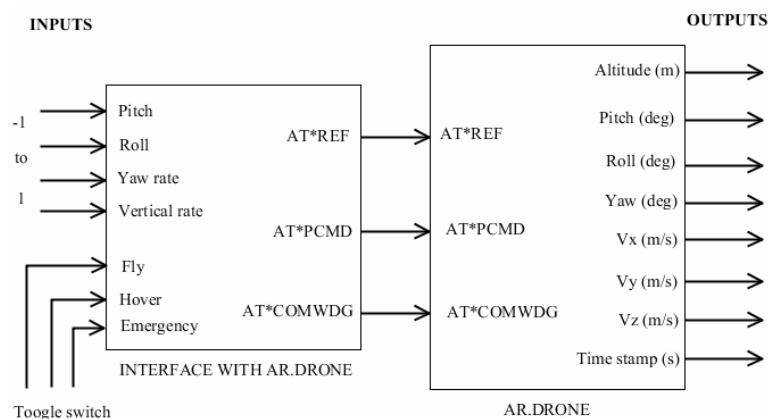
Dengan menggunakan persamaan (4) diperoleh nilai parameter dari ke empat model seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

TABLE I. NILAI PARAMETER MODEL

<i>Parameters of model</i>	<i>Indoor Hull</i>	<i>Outdoor Hull</i>
p_0	9.0989	7.2056
p_1	0.6382	0.6465
p_2	-0.0233	-0.0221
p_3	0.9197	0.9600
r_0	8.3805	8.9479
r_1	0.6613	0.6232
r_2	0.0199	0.0217
r_3	0.9277	0.932
y_0	95.9915	83.6962
y_i	0.121	-0.0105
z_0	0.4808	0.2795
z_i	0.5167	0.7278

4.4. Rancangan dan Implementasi Fuzzy Logic Controller pada AR.Drone

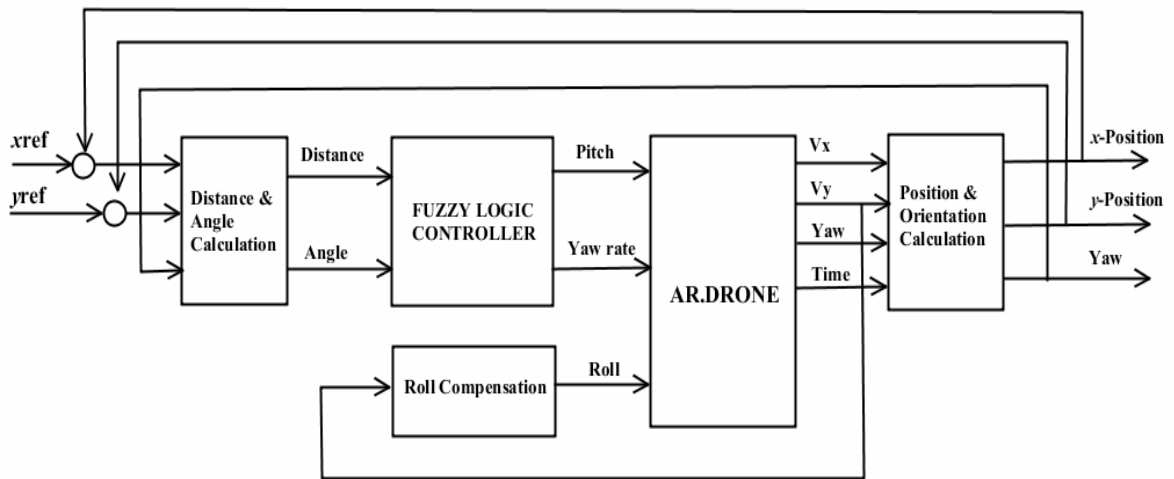
Untuk mengimplementasikan algoritma fuzzy logic controller untuk menyelesaikan trajectory tracking pada AR.Drone 2.0, ada beberapa tahap yang dilakukan. Tahap pertama adalah mempersiapkan program komputer di ground station untuk mengakses onboard electronic AR.Drone via Wi-fi untuk keperluan monitoring, control dan data acquisition. Untuk keperluan ini AR.Drone LabVIEW Toolkit [8] yang dirancang untuk AR.Drone 1.0 dimodifikasi ulang blok diagram dan front panelnya agar dapat digunakan untuk AR.Drone 2.0. Beberapa point penting modifikasi yang dilakukan adalah melakukan update firmware dengan versi 2.4.8, memodifikasi pengiriman AT*REF dan AT*PCMD yang dibuat bergantian, memperbaiki akses komunikasi komputer dengan user datagram protocol (UDP) pada onboard electronicnya serta membuat front panel sesuai dengan kebutuhan control, data acquisition dan monitoring saat implementasi trajectory tracking pada penelitian ini. Secara garis besar hasil modifikasi akhir, program komputer mempunyai data flow seperti ditunjukkan pada blok diagram pada Gambar 7.



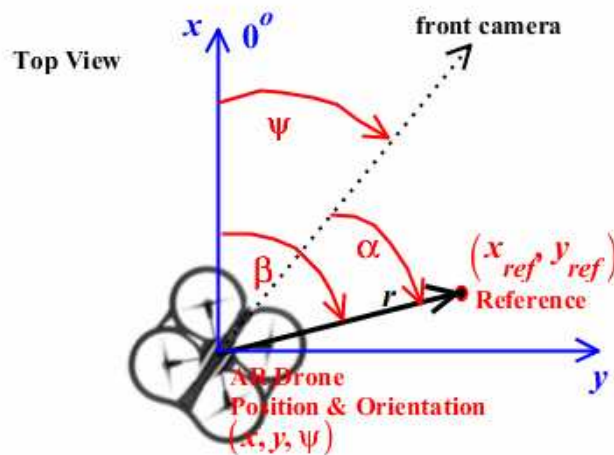
Gambar 7. Data Flow Program Pada LabVIEW Untuk AR.Drone 2.0

Tahap selanjutnya adalah merancang skema kontrol yang akan diterapkan pada AR.Drone. Blok diagram sistem terkontrol yang diterapkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 8 di bawah. Secara garis besar terdapat 5 buah subsystem yaitu subsystem AR.Drone, subsystem fuzzy logic controller, subsystem distance and angle calculation, subsystem position and orientation calculation serta subsystem roll compensation. Subsystem AR.Drone adalah sistem AR.Drone itu sendiri yang dikontrol via komunikasi wi-fi yang telah dipersiapkan pada tahap sebelumnya. Subsystem distance

and angle calculation mempersiapkan nilai distance dan angle yang akan menjadi input bagi fuzzy logic controller. Nilai distance (r) adalah jarak antara titik referensi (x_{ref}, y_{ref}) dengan current position (x, y) dari AR.Drone, sedangkan angle (α) adalah selisih antara sudut terhadap titik referensi (β) dan current orientation (ψ) of AR.Drone seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 8. Blok Diagram FLC Controlled System



Gambar 9. Distance and angle calculation

Nilai distance (r) dapat dinyatakan dalam persamaan (1).

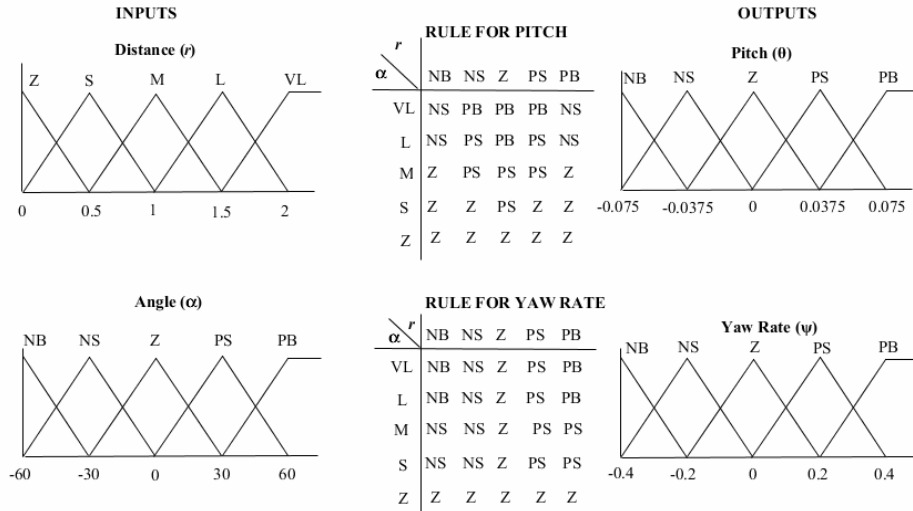
$$r = \sqrt{(x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2} \quad (1)$$

Sedangkan untuk perhitungan dan angle (α) dilakukan dengan algoritma sebagai berikut ini:

$$\beta = \frac{\arctg\left(\frac{y_{ref} - y}{x_{ref} - x}\right)}{\pi} \cdot 180;$$

if $|\beta - \psi| < 180^\circ$ **then**
 $\alpha = \beta - \psi;$
else
 if $\beta < 0$ **then**
 $\beta = 360 - |\beta|;$
 end if
 if $\psi < 0$ **then**
 $\psi = 360 - |\psi|;$
 end if
 $\alpha = \beta - \psi;$
end if

Subsystem fuzzy logic controller mempunyai dua buah input yaitu distance (r) dan angle (α) serta dua buah output yaitu pitch (θ) dan yaw rate (ψ_{rate}). Untuk input distance, range input yang digunakan adalah dari 0 s.d 2 meter dan dinyatakan ke dalam 5 buah triangular membership function. Sedangkan input angle mempunyai range dari -60o s.d 60o juga dinyatakan ke dalam 5 buah triangular membership function. Output pitch mempunyai range nilai dari -0.075 s.d 0.075 yang terbagi menjadi 5 buah triangular membership function sedangkan output yawrate mempunyai range nilai dari -0.4 s.d 0.4 yang terbagi menjadi 5 buah triangular membership function. Dengan 2 buah input dengan masing masing 5 buah membership function dan 2 buah output maka akan dihasilkan 2 x 25 rules dalam algoritma fuzzy logic controller ini. Defuzzyfikasi output menggunakan metode center of gravity. Detil dari rancangan ini dapat di lihat pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Fuzzy Logic Controller

Subsystem position and orientation calculation digunakan untuk menghitung posisi dan orientasi AR.Drone dengan menggunakan data forward speed (V_x), sideward speed (V_y), yaw (ψ) dan time stamp (t) AR.Drone. Perhitungan tersebut dinyatakan dalam algoritma di bawah.

if RESET = TRUE **then**

$$Yaw_{reset} = Yaw_i$$

$$X = 0;$$

$$Y = 0;$$

else

$$Yaw_{reset} = Yaw_{reset};$$

$$dY = (Time_i - Time_{i-1}) \cdot V_x;$$

$$dY = (Time_i - Time_{i-1}) \cdot V_y;$$

end if

$$Yaw_{value} = Yaw_i - Yaw_{reset};$$

$$X_i = X_{i-1} + dX \cdot \cos(Yaw_{value}) + dY \cdot \cos(Yaw_{value} + 90);$$

$$Y_i = Y_{i-1} + dX \cdot \sin(Yaw_{value}) + dY \cdot \sin(Yaw_{value} + 90);$$

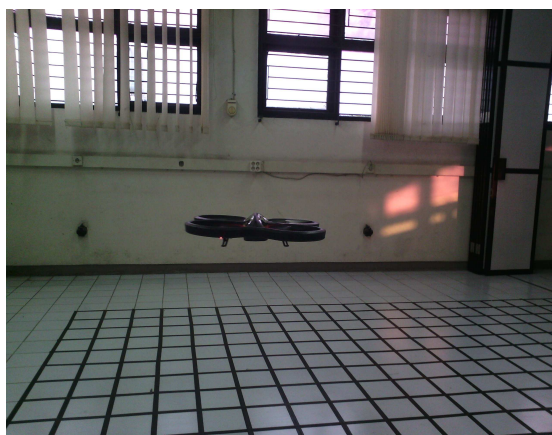
dimana i adalah nomor sample. Pada saat RESET dilakukan, posisi dan orientasi AR.Drone di set menjadi (0,0,0). Untuk mereset orientasi dari AR.Drone digunakan variabel Yaw_{reset} yang akan mengurangi nilai yaw saat itu Yaw_i sehingga nilai Yaw_{value} menjadi nol.

Roll compensation adalah subsystem untuk mengkompensasi sideward speed (v_y) selama trajectory tracking. Kompensasi ini dilakukan dengan cara yang simple dengan memberikan nilai input roll kepada AR.Drone dengan nilai pada rentang 0.3 s.d -0.3 untuk sideward speed yang dibaca antara -0.6 s.d 0.6 m/s secara proportional.

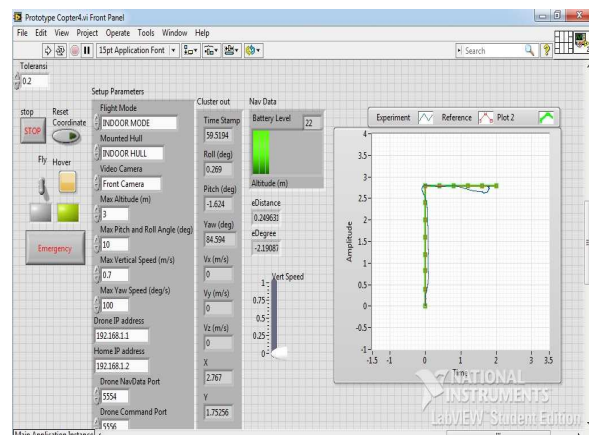
Untuk menguji performansi dari fuzzy logic controller untuk menyelesaikan trajectory tracking, beberapa bentuk reference trajectory dibuat untuk eksperimen. Eksperimen dilakukan di dalam ruang Laboratorium Otomasi industri Gedung TC.3 Teknik Elektro Universitas Surabaya dengan ukuran lapangan 4 x 4 meter. Prosedur pengujian dilakukan sebagai berikut:

- Membangkitkan reference trajectory dengan berbagai macam bentuk
- Data trajectory yang telah dibangkitkan dipanggil melalui program sebagai setpoint yang akan diikuti oleh AR.Drone.
- AR.Drone diterbangkan dari initial position dan orientation dengan mode hover.
- Setelah ketinggian stabil di sekitar 1 meter, switch ke auto dengan mematikan mode hover. AR.Drone akan bekerja dengan fuzzy logic controller untuk mengikuti trajectory yang sudah diberikan.
- AR.Drone akan kembali ke posisi mode hover setelah mencapai akhir dari trajectory. Untuk mempermudah monitoring, dibuatlah grafik reference trajectory dan real time eksperimen pada front panel LabVIEW.
- Pengujian selesai AR.Drone dapat dilandingskan.

Gambar 11 menunjukkan proses pengujian dan front panel LabVIEW saat pengujian.



a. AR.Drone Saat Trajectory Tracking



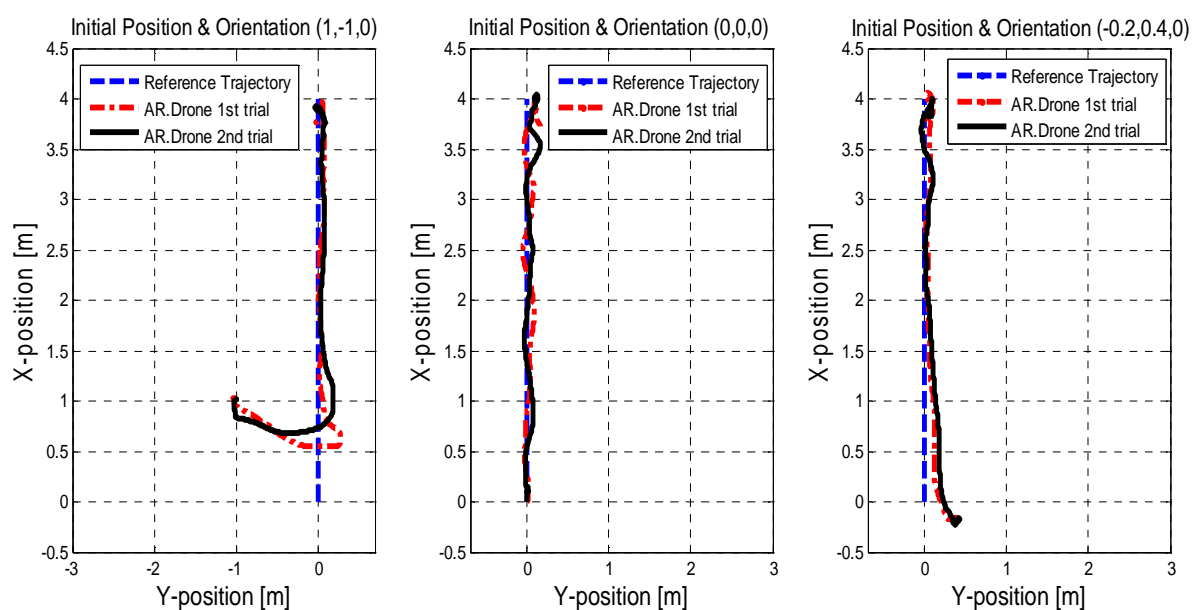
b. Front Panel

Gambar 11. Pengujian Trajectory Tracking

BAB V

HASIL YANG DICAPAI

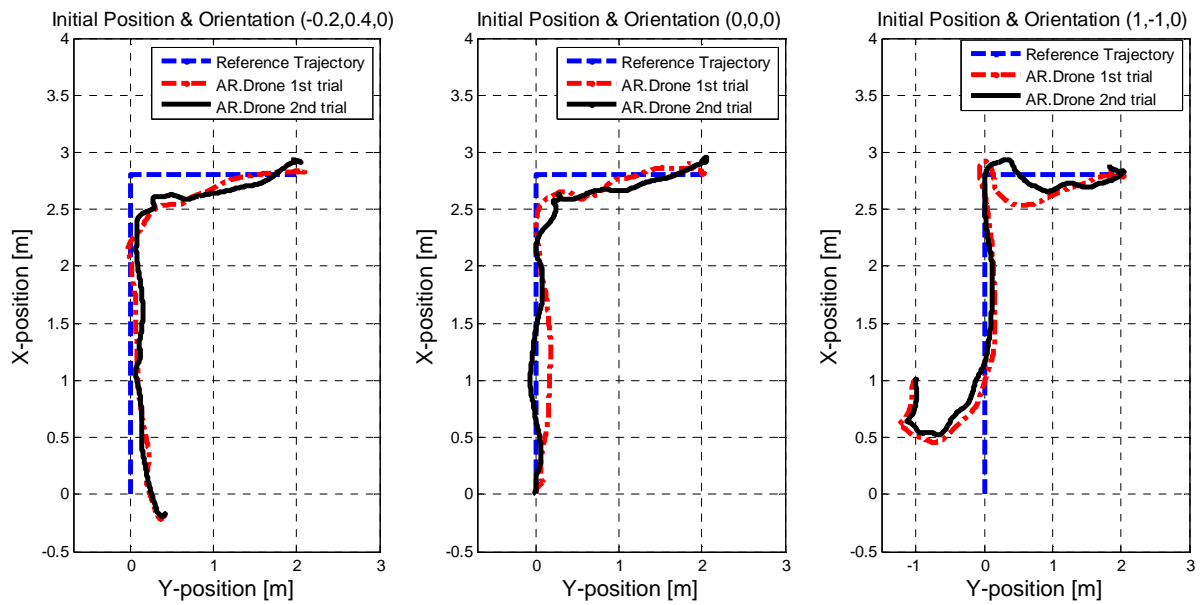
Hasil pengujian rancangan fuzzy logic controller untuk beberapa bentuk reference trajectory ditunjukkan pada bab ini. Pengujian pertama dilakukan terhadap referensi trajectory lurus. AR.Drone diuji dengan beberapa initial position kemudian diterbangkan dan secara autonomous dengan kontroler yang dirancang. Gambar 12 menunjukkan hasil dari pengujian pada trajectory lurus untuk beberapa initial position.



Gambar 12. Hasil Pengujian dengan Trajectory Lurus

Terlihat bahwa AR.Drone dapat mengikuti trajectory dengan baik. Pada initial position AR.Drone (1,-1,0), sudut AR.Drone terhadap referensi trajectory sangat besar sehingga AR.Drone akan menuju trajectory dengan sudut yang besar, ketika mencapai trajectory terjadi overshoot yang relatif kecil. Dengan initial position dan orientation yang sama dengan initial referensi terlihat bahwa AR.Drone dengan mudah mengikuti trajectory. Demikian juga dengan initial position AR.Drone yang mempunyai sudut terhadap referensi yang kecil dalam hal ini (-0.2, 0.4, 0), trajectory dapat dengan mudah diikuti

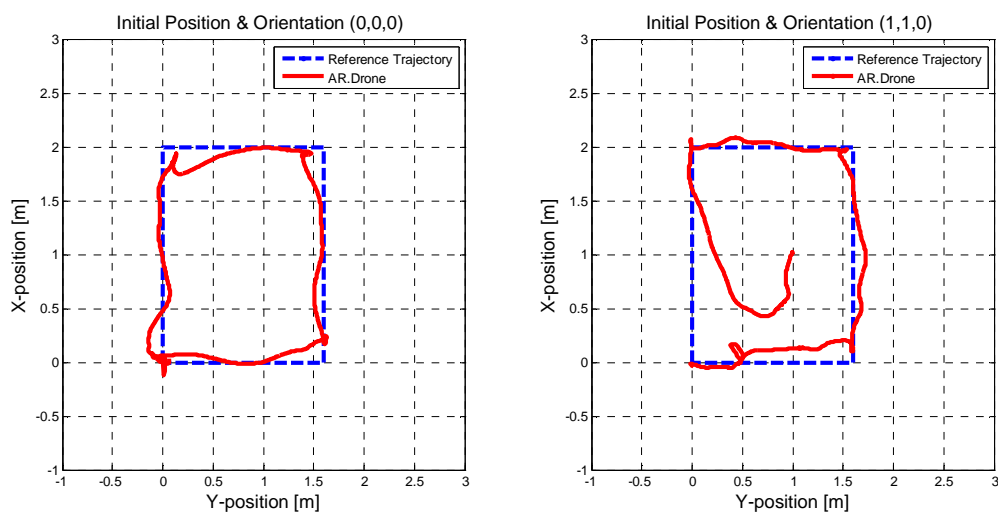
Selanjutnya AR.Drone diuji dengan menggunakan trajectory dengan belokan tegak lurus ke kanan. Seperti sebelumnya initial position AR.Drone juga dilakukan dari beberapa posisi untuk melihat kemampuan dari AR.Drone dalam mengikuti trajectory. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengujian dengan trajectory belok

Terlihat bahwa secara umum AR.Drone memiliki kelemahan saat mengikuti belokan yang ada. Posisi dari AR.Drone terlihat tertinggal terhadap referensinya sehingga terlihat ketika referensi sudah berbelok posisi AR.Drone masih tertinggal. Namun secara umum dari berbagai inital position AR.Drone dapat mengikuti trajectory yang diberikan.

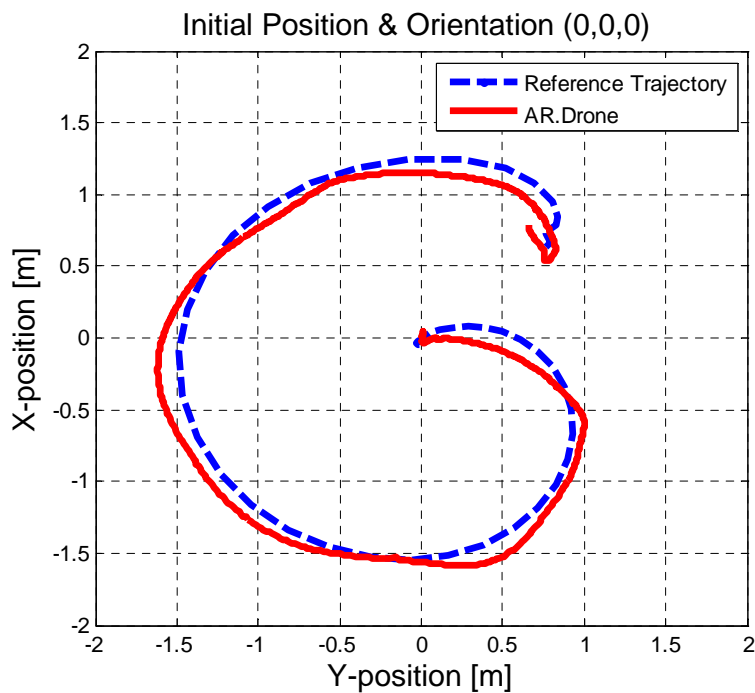
Pengujian selanjutnya dilakukan terhadap trajectory berbentuk kotak dengan beberapa initial position AR.Drone untuk melihat responnya. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 14 berikut ini.



Gambar 14. Pengujian dengan trajectory kotak

Dari hasil terlihat bahwa kelemahan yang sama terjadi pada setiap belokan yang ada. Pada saat referensi lurus, AR.Drone dapat mengikutinya dengan baik. AR.Drone juga dapat mengikuti trajectory dari initial position di bagian tengah dari trajectory berbentuk kotak tersebut.

Pengujian terakhir dilakukan terhadap trajectory melengkung berbentuk huruf “G”. Referensi trajectory ini didapat dengan merekam data navigasi AR.Drone yang diterbangkan secara manual dengan program di ground station dengan memberikan pasangan nilai pitch dan yaw rate secara sequence . Gambar 15 adalah hasil dari pengujian trajectory yang dimaksud.



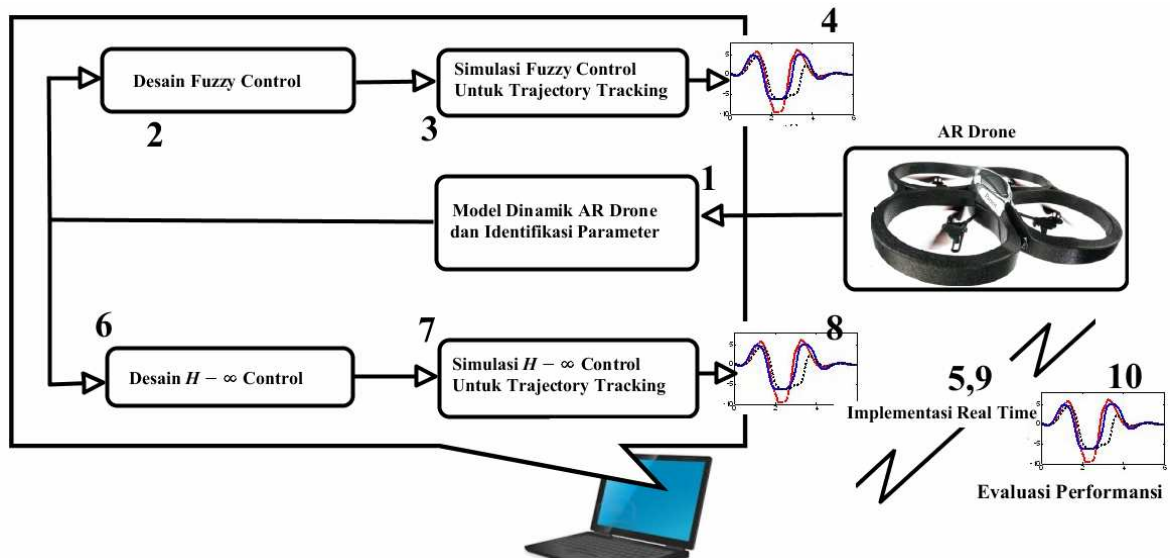
Gambar 15. Pengujian dengan trajectory melengkung

Terlihat bahwa AR.Drone dapat mengikuti trajectory melengkung dengan baik walaupun terdapat error posisi x dan y yang relatif kecil.

BAB VI

RENCANA PENELITIAN TAHUN II

Penelitian Tahun ke II akan fokus pada rancangan dan implementasi $H-\infty$ control untuk menyelesaikan problem trajectory tracking pada AR.Drone. Sesuai dengan tahapan yang telah disusun pada proposal penelitian lalu (Gambar 16) , penelitian tahun II ini akan mulai dengan tahapan ke 6 dan dijelaskan sebagai berikut:



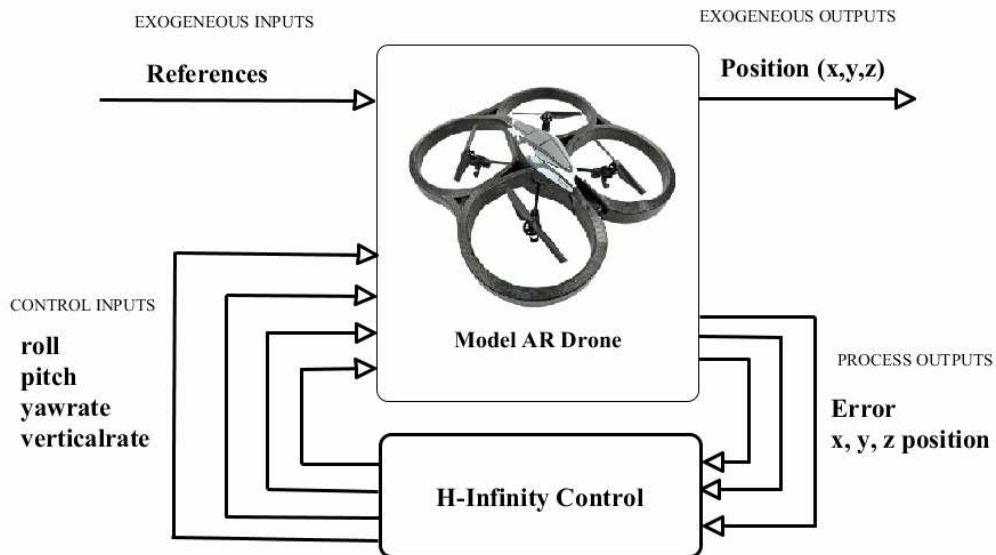
Gambar.16. Tahapan penelitian selama 2 tahun

Tahap 6 dan 7: Desain $H-\infty$ Control dan Simulasi Trajectory Tracking

Rancangan $H-\infty$ control akan dibuat seperti blok pada gambar dibawah. Sesuai dengan konsep $H-\infty$ control maka dipilih:

- *Exogeneous Inputs: Reference trajectory*
- *Control Inputs: roll, pitch, yawrate dan verticalrate*
- *Exogeneous Outputs: Position (x,y,z)*
- *Process Outputs: Error : x-position, y-position dan z-position.*

Rancangan kontrol akan disimulasikan pada model AR Drone untuk mengetahui performansi dari AR Drone dalam mengikuti reference yang diberikan.



Gambar 17 Blok $H-\infty$ control trajectory tracking yang akan dirancang.

Tahap 8: Analisa Respon Sistem dan Perhitungan RMSE Untuk $H\infty$ control

Pada tahap ini, reference trajectory akan dibandingkan dengan position output dari model AR Drone. Root means square error (RMSE) akan digunakan sebagai tools untuk mengetahui performansi dari kontroler yang didesain. Rumus RMSE yang digunakan sbb:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (y_r - y)^2}$$

dimana:

y_r adalah posisi referensi

y adalah posisi terukur

z adalah jumlah data

Tahap 9: Implementasi $H\infty$ control Pada AR Drone

Algoritma $H-\infty$ control akan diimplementasikan dengan software LabVIEW, dimana data *real time* eksperimen akan direkam untuk validasi dan perhitungan RMSE.

Tahap 10: Evaluasi Performansi

Tahap ini adalah tahapan terakhir dari penelitian ini melakukan evaluasi performansi algoritma kontrol berdasarkan nilai RMSE yang diperoleh dari hasil simulasi dan implementasi masing masing kontroler. Selanjutnya didukung dengan pengalaman desain dan implementasi diharapkan diperoleh kesimpulan yang bernilai dari penelitian ini.

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Penelitian tahun I sudah selesai dilakukan dan menghasilkan parameter model AR.Drone seperti yang dituliskan pada Tabel 1 pada Laporan Tahunan penelitian ini. Model AR.Drone ini sudah diseminarkan dalam Seminar Nasional CITEE 2014 yang diselenggarakan oleh UGM pada tanggal 7-8 Oktober 2014 dengan paper berjudul “Model AR.Drone Dengan Indoor dan Outdoor Hull”. [11] Selanjutnya rancangan fuzzy logic controller (FLC) juga telah berhasil diimplementasikan pada platform AR.Drone dengan menggunakan program yang dibuat dengan LabVIEW. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa FLC yang didesain dapat mengikuti berbagai macam bentuk referensi trajectory yang diberikan. Dalam pengujian ini diberikan referensi berbentuk garis lurus, garis lurus dengan belokan tegak lurus, referensi berbentuk kotak dan referensi melengkung. Hasil penelitian ini sudah diterima di Jurnal Telkomnika (Terakreditasi A oleh DIKTI) dan akan diterbitkan pada Vol 12, No 4: December 2014 dengan judul “Trajectory Tracking of AR.Drone Quadrotor Using Fuzzy Logic Controller”. [12]

7.2. Saran

Pada penelitian ini masih ada sedikit kendala pada permasalahan bagaimana mengatasi pergeseran nilai yaw dari AR.Drone setiap saat. Adanya pergeseran ini sedikit mempersulit pengontrolan dan akurasi dari algoritma yang dikontrol. Solusi mengatasi pergeseran ini akan menjadi kontribusi penting dalam berbagai rancangan kontrol untuk AR.Drone

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Krajnik T, Vonasek V, Fiser D, Faigl J. *AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education*. Research and Education in Robotics :EUROBOT. Heidelberg, 2011; draft version.
- [2] Mary C, Totu L C, Koldbaek S K. *Modeling and Control of Autonomous Quad-Rotor*. Dept of Electronic Systems University of Aalborg Denmark. Project Report. 2010.
- [3] Jacco vand der Spek, Mario V. *AR.Drone Autonomous Control and Position Determination*. Bachelor Thesis. TU-Delft. 2012.
- [4] Pierre-Jean B, Francois C, David V, Nicolas P. *The Navigation and Control Technology Inside the AR Drone Micro UAV*. 18th IFAC World Congress, Milano Italy. 2011; reprint
- [5] <http://ardrone2.parrot.com> accessed on 11 August 2014
- [6] Stephane P, Nicolas B. *AR.Drone Developer Guide*. Parrot. SDK 1.6. 2011
- [7] Gerrard M. *Modeling and Control of the Parrot AR.Drone*. SEIT UNSW Canberra. Final Project Report. 2012.
- [8] Michael M. *The AR Drone LabVIEW Toolkit: A Software Framework for the Control of Low Cost Quadrotor Aerial Robots*. Master of Science Thesis. TUFTS University. 2012.
- [9] Sun Y. *Modeling, Identification and Control of a Quadrotor Drone Using Low-Resolution Sensing*. Master of Science Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2012.
- [10] Guilherme V R, Manuel G O, Francisco R R. *Nonlinear H^∞ Controller for the Quad-Rotor Helicopter with Input Coupling*. 18th IFAC World Congress, Milano Italy. 2011; reprint.
- [11] Agung Prayitno, Veronica Indrawati, "Model AR.Drone Dengan Indoor dan Outdoor Hull", Proceeding Conference on Information Technology and Electrical Engineering (CITEE), Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2014.
- [12] Agung Prayitno, Veronica Indrawati, Gabriel Utomo, "Trajectory Tracking of AR.Drone Quadrotor Using Fuzzy Logic Controller", Jurnal Telkomnika, draft