

Sistem Penjejak Pipa pada Balon Udara dengan Menggunakan Kamera dan Kontrol Logika *Fuzzy*

Dion Hayu Fandiantoro, Muhammad Rivai, dan Rudy Dikairono
 Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: dionhayu@gmail.com, muhammad_rivai@ee.its.ac.id, rudydikairono@ee.its.ac.id

Abstrak— Balon udara merupakan salah satu jenis Unmanned Aerial Vehicle (UAV) yang mampu bergerak secara otomatis, salah satu aplikasinya adalah sebagai penjejak pipa. Pada dasarnya digunakan sistem navigasi dengan bantuan global positioning system (GPS) dan kontrol PID untuk mengatur arah tujuan. Tetapi penggunaan GPS pada daerah yang tidak memiliki ruang terbuka bebas tidaklah memungkinkan dikarenakan pada daerah tersebut sinyal GPS menjadi lemah ataupun hilang. Sehingga dibutuhkan sebuah sistem yang dapat bekerja secara independen tanpa menggunakan GPS dalam proses penjejakan pipa. Digunakan proses pengolahan citra dengan contour finding dan region of interest yang terpadu dalam sebuah sistem yang terdiri dari Raspberry Pi dan Arduino Mega dalam memandu balon udara untuk menyusuri pipa, sehingga balon udara dapat berjalan secara otomatis menyusuri pipa. Serta digunakan kontrol logika fuzzy untuk menentukan kecepatan motor untuk mempertahankan keseimbangan dan untuk menyusuri pipa.

Hasil dari pengujian yang dilakukan dengan simulasi menggunakan pipa fleksibel berwarna biru pada tugas akhir ini menunjukkan bahwa balon udara dapat menyusuri pipa dengan panduan pipa fleksibel. Selain menyusuri pipa fleksibel, balon udara juga dipertahankan kondisi roll-nya untuk selalu setimbang. Didapatkan kesalahan ukur dalam proses penjejakan pipa sebesar 4,7%, sedangkan untuk kondisi roll didapatkan kesalahan sebesar 0,76%.

Kata Kunci— UAV, Blimp, Tracking, OpenCV, IMU

I. PENDAHULUAN

PADA dasarnya, balon udara adalah sebuah alat yang mampu terbang dengan kecepatan sangat rendah maupun mengambang di udara dengan perubahan ketinggian yang kecil. Dengan perkembangan teknologi robotik bidang penerbangan, penggunaan balon udara juga semakin berkembang. Saat ini balon udara banyak dipakai sebagai media komersial [1], selain itu penggunaan balon udara juga banyak digunakan untuk memonitoring cuaca dengan menerbangkan balon pada ketinggian sekitar 18-37 km [2]. Pengembangan balon sebagai pesawat tanpa awak banyak dilakukan pada bidang transportasi kargo [3], monitoring lingkungan [4], monitoring trafik kendaraan [5], dan juga pada bidang telekomunikasi [6].

Mengacu pada penggunaan balon untuk memonitoring trafik ataupun lingkungan, penggunaan sistem posisi dan penjejak menjadi komponen utama dalam sistem kontrol dan sistem navigasi balon udara. Sistem yang paling banyak dipakai saat ini merupakan sistem sederhana yang mengandalkan bantuan global positioning satellite (GPS)

dengan titik lintang dan bujur yang sudah didefinisikan [7] dan sistem kontrol PID untuk mengatur ketinggian dan arah tujuan balon udara saat ini [8].

Tetapi pada realisasinya, dengan hanya menggunakan GPS untuk sistem navigasi masalah kurang. Dikarenakan penyimpangan yang terjadi masalah besar dengan orde meter [9]. Selain itu, GPS tidak dapat digunakan pada daerah dengan gedung-gedung tinggi atau pada tempat yang tidak memiliki ruang terbuka bebas (line-of-sight), dikarenakan sinyal GPS yang tidak dapat diterima pada daerah yang disebutkan sebelumnya.

Oleh karena itu diajukan sebuah metode navigasi baru dengan penggunaan pipa sebagai media penjejak dengan menggunakan kamera. Metode ini dapat bekerja secara independen tanpa bantuan GPS dalam navigasinya, dan dapat bekerja otomatis, serta balon dapat dikendalikan dari jarak jauh.

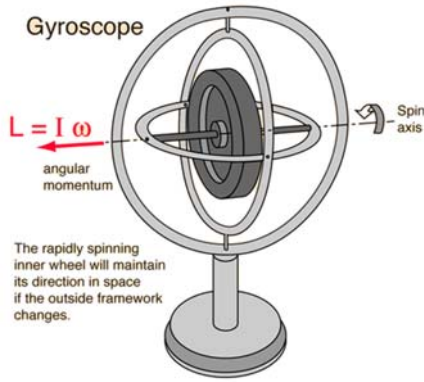
II. DASAR TEORI

A. Akselerometer

Akselerometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran (vibrasi), dan mengukur percepatan akibat gravitasi (inklinasi) [11]. Akselerometer dapat digunakan untuk mengukur getaran pada mobil, mesin, bangunan, dan instalasi pengamanan. Akselerometer juga dapat diaplikasikan pada pengukuran aktivitas gempa bumi dan peralatan-peralatan elektronik, seperti permainan 3 dimensi, mouse komputer, dan telepon. Untuk aplikasi yang lebih lanjut, sensor ini banyak digunakan untuk keperluan navigasi. Percepatan merupakan suatu keadaan berubahnya kecepatan terhadap waktu. Bertambahnya suatu kecepatan dalam suatu rentang waktu disebut percepatan (akselerasi). Namun jika kecepatan semakin berkurang daripada kecepatan sebelumnya, disebut perlambatan (deakselerasi). Percepatan juga bergantung pada arah/orientasi karena merupakan penurunan kecepatan yang merupakan besaran vektor. Berubahnya arah pergerakan suatu benda akan menimbulkan percepatan pula. Untuk memperoleh data jarak dari sensor akselerometer, diperlukan proses integral ganda terhadap keluaran sensor [12].

B. Giroskop

Giroskop digunakan untuk mengukur orientasi berdasarkan prinsip momentum sudut. Giroskop konvensional adalah giroskop mekanikal, yang terdiri dari sebuah piringan yang berputar di sumbu putar. Sumbu putar ini terpasang pada suatu rangka yang disebut gimbal. Jumlah gimbal menentukan



Gambar 1. Giroskop

jumlah aksis giroskop. Giroskop yang memiliki satu gimbal hanya dapat berputar dengan satu poros, giroskop yang memiliki dua gimbal dapat berputar dengan dua poros, dan giroskop yang memiliki tiga gimbal dapat berputar dengan tiga poros [13].

Prinsip rotor giro adalah kekakuan dalam ruang atau inersia giroskopik. Hukum pertama Newton menyatakan bahwa gaya total suatu benda adalah nol, maka gerak benda tidak akan terjadi.

$$\sum F = 0 \text{ (dalam kesetimbangan)} \quad (1)$$

Rotor berputar dalam giroskop mempertahankan sikap konstan dalam ruang selama tidak ada gaya luar yang mengubah gerakannya. Stabilitas ini meningkat jika rotor memiliki massa yang besar dan berputar dengan cepat [14].

C. Algoritma Madgwick AHRS [15]

Madgwick AHRS adalah metode untuk proses orientasi dari sensor IMU dengan menggunakan algoritma gradient decent untuk mengestimasi nilai orientasi dari ketiga sumbu yang ada pada giroskop, akselerometer dan magnetometer. Dimana diketahui bahwa giroskop pada IMU mempunyai nilai drift. Drift pada giroskop adalah pergeseran nilai derajat dari sumbu awal. Pada metode ini sudut-sudut euler dirubah menjadi Kuaternion [15].

Konsep dasar dari Magwick AHRS adalah mencari antara relative frame atau yang biasa disebut perpindahan frame. Contoh dapat dilihat pada gambar di atas frame A relative terhadap frame B. Dimana nilai perpindahan frame A ke frame B dapat direpresentasikan dalam bentuk kuaternion seperti persamaan 2.

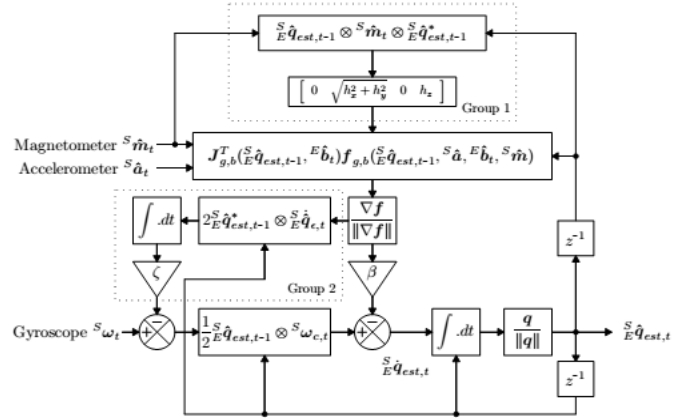
$${}^A_B \hat{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3] \\ = \left[\cos \frac{\theta}{2} - rx \sin \frac{\theta}{2} - ry \sin \frac{\theta}{2} - rz \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (2)$$

$${}^A_B \hat{q} * = {}^B_A \hat{q} = [q_0 - q_1 - q_2 - q_3] \quad (3)$$

Bahwa untuk mencari nilai matrik yang baru, kedua matrik tersebut dikalikan dengan aturan cross product dimana dengan menggunakan aturan Hamilton. Seperti persamaan 4.

$$a \otimes b = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3] \otimes [b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3] \\ = \begin{bmatrix} a_0 b_0 & -a_1 b_1 & -a_2 b_2 & -a_3 b_3 \\ a_0 b_1 & +a_1 b_0 & +a_2 b_3 & -a_3 b_2 \\ a_0 b_2 & -a_1 b_3 & +a_2 b_0 & +a_3 b_1 \\ a_0 b_3 & +a_1 b_2 & -a_2 b_1 & +a_3 b_0 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

Pada gambar 2 dijelaskan alur dari metode madgwick. Untuk mengetahui representasi pergeseran frame berdasarkan sumbu garis normal gravitasi bumi menggunakan persamaan



Gambar 2. Diagram Blok Algoritma AHRS Madgwick [15]

gradient decent. Dimana algoritma gradient decent mempunyai fungsi seperti persamaan (5). Dengan demikian apabila dicross product ketiga quaternion tersebut akan menghasilkan matrik baru (9).

$$f({}_E^S \hat{q}, E_{\hat{a}}, S_{\hat{s}}) = {}_E^S \hat{q} * \otimes E_{\hat{a}} \otimes {}_E^S \hat{q} - S_{\hat{s}} \quad (5)$$

$${}_E^S \hat{q} = [q_1 - q_2 - q_3 - q_4] \quad (6)$$

$$E_{\hat{g}} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (7)$$

$$S_{\hat{a}} = [0 \ ax \ ay \ az] \quad (8)$$

$$f_g({}_E^S \hat{q}, S_{\hat{a}}) = \begin{bmatrix} 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) - ax \\ 2(q_1 q_2 + q_3 q_4) - ay \\ 2(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2) - az \end{bmatrix} \quad (9)$$

Setelah proses untuk mencari nilai f, kemudian dicari hasil dari matrik jacobi sesuai dengan persamaan (10).

$$J_g({}_E^S \hat{q}) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Kemudian setelah kedua matrik f dan J telah didapatkan hasil. Untuk mencari nilai dari matrik gradient decent adalah sesuai dengan persamaan (11).

$$\nabla f = j^T \times f \quad (11)$$

Untuk mencari nilai estimasi dari kuaternion, kuaternion pada giroskop dikurangkan dengan hasil kuaternion pada proses algoritma gradient decent yang sudah dibagi dengan nilai normalisasi dan dikalikan dengan nilai pembobotan(beta), sesuai dengan persamaan (12).

$${}^S_E \hat{q}_{est, t} = {}^S_E \hat{q}_{\omega, t} - \beta \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (12)$$

Untuk mencari nilai beta atau pembobotan dapat menggunakan persamaan (13).

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \hat{q} \otimes [0 \ \bar{\omega}_{max} \ \bar{\omega}_{max} \ \bar{\omega}_{max}] \right\| \sqrt{\frac{3}{4}} \bar{\omega}_{max} \quad (13)$$

D. Computer Vision

Computer Vision adalah pencitraan komputer dimana aplikasi tidak melibatkan manusia dalam sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari bagaimana komputer dapat mengenali obyek yang diamati atau diobservasi. Cabang ilmu ini bersama kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) akan mampu menghasilkan sistem kecerdasan visual (Visual Intelligence System) [16].

Proses-proses dalam computer vision dapat dibagi menjadi tiga aktivitas, yaitu:

1. Memperoleh atau mengakuisisi citra digital.
2. Melakukan teknik komputasi untuk memproses atau memodifikasi citra.
3. Menganalisis dan menginterpretasi citra dan menggunakan hasil pemrosesan untuk tujuan tertentu.

E. Warna

Dengan menggunakan 3 buah reseptor manusia dapat membedakan banyak warna. Warna tricromatic RGB dalam sistem grafis umumnya menggunakan 3 byte. Mesin dapat membedakan antara berbagai kode warna, namun perbedaan tersebut belum tentu dapat menunjukkan perbedaan yang dapat ditangkap oleh mata manusia. Tiap 3 byte pada pixel RGB mencakup 1 byte pixel untuk tiap warna Red (merah), Green (hijau), Blue (biru) [17].

Gambar direpresentasikan sebagai matrik dengan elemen integer atau pixel. Biasanya pixel tidak disimpan dalam bentuk matrik sederhana, namun menggunakan data yang lebih rumit. Dan terkadang memudahkan secara matematis jika kita beranggapan gambar berwarna sebagai matrik dari vektor tiga dimensi [18].

F. Logika Fuzzy

Logika fuzzy adalah metodologi sistem kontrol pemecahan masalah, yang cocok untuk diimplementasikan pada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, embedded system, jaringan PC, multi-channel atau workstation berbasis akuisisi data, dan sistem kontrol. Metodologi ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi keduanya [19].

G. Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi himpunan fuzzy diperlukan untuk proses inferensi atau penalaran. Dalam hal ini yang dioperasikan adalah derajat keanggotaannya. Derajat keanggotaan sebagai hasil dari operasi dua buah himpunan fuzzy disebut sebagai fire strength atau α -predikat [19].

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem fuzzy, yaitu:

1. Variabel fuzzy merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem fuzzy.
2. Himpunan fuzzy merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel fuzzy.
3. Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel fuzzy.

Domain himpunan fuzzy adalah keseluruhan nilai yang diizinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan fuzzy [20][21].

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Diagram Blok Sistem

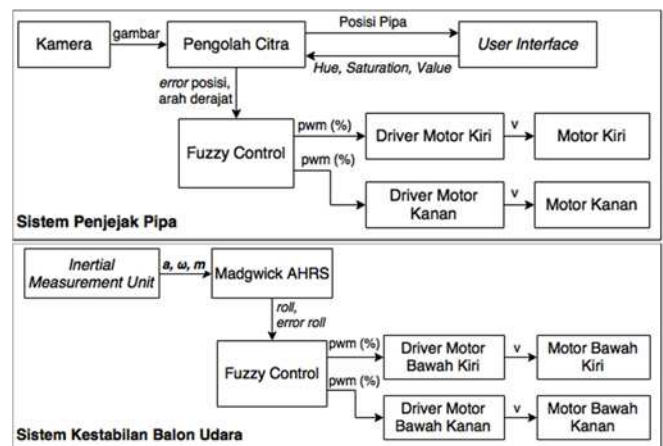
Sistem yang dirancang terdiri dari lima bagian besar yaitu sensor, Raspberry Pi, Arduino Mega 2560, H-Bridge, dan Aktuator. Untuk sensor, terdiri dari sensor akselerometer, giroskop dan magnetometer yang tergabung menjadi satu pada

sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU). Serta kamera yang digunakan pada proses penjejakan pipa dengan bantuan pengolahan citra yang ada pada Raspberry Pi. Penggunaan Raspberry Pi, selain sebagai pengolah citra, juga sebagai *user interface* utama yang dapat diakses melalui layar atau *remote desktop*. Seluruh data dari sensor IMU diolah langsung dengan algoritma Madgwick AHRS untuk didapatkan nilai *roll*-nya, yang kemudian diolah dengan logika *fuzzy* untuk menstabilkan gerak *roll* dari balon udara yang digunakan. Sedangkan data yang telah diolah oleh pengolah citra yang terdapat pada Raspberry Pi, ditransfer dengan komunikasi *serial* menuju Arduino Mega 2560 untuk diolah dengan logika *fuzzy* untuk memandu balon udara dalam mengikuti dan menjejak pipa gas.

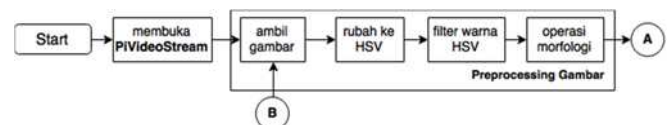
B. Kalkulasi Penjejak Pipa

Proses pengambilan citra dan filter warna dilakukan pada Raspberry Pi 3, bahasa yang dipakai adalah bahasa python dengan versi 3.4. Proses pengambilan citra dan filter warna dibantu dengan library OpenCV 3.0. Kemudian citra yang didapat dirubah menjadi HSV yang dilanjutkan pemfilteran warna

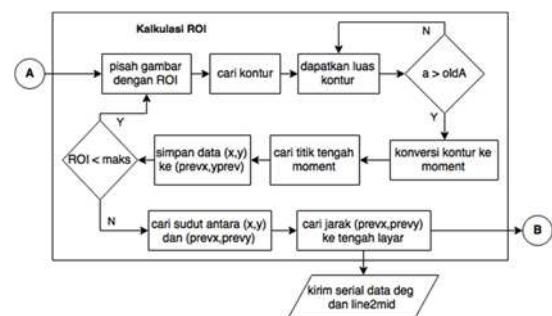
Dari gambar 3.11 diatas dilakukan pengambilan gambar terlebih dahulu dengan format BGR, setelah itu gambar



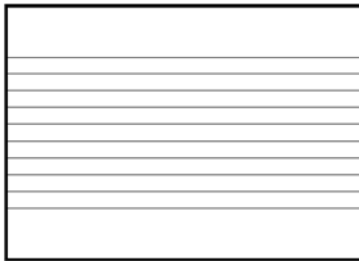
Gambar 3. Blok Diagram Sistem yang Dirancang



Gambar 4. Diagram Alir Proses Preprocessing



Gambar 5. Diagram Alir Proses Kalkulasi Perbelokan



Gambar 6. Gambaran Lokasi ROI yang Diinginkan

dirubah formatnya menjadi HSV yang kemudian gambar difilter dengan masukan dari pengguna berupa Hue, Saturation, dan Value. Citra yang didapat dimorfologikan terlebih dahulu. Setelah itu citra yang didapat dapat dimasukan kedalam program penjejak pipa. Penjejakan pipa menggunakan metode ROI (*Region of Interest*) dan *contour finding*.

Metode ROI digunakan untuk mempermudah proses *contour finding*. Setiap kotak yang terbentuk dicari posisi konturnya dengan fungsi *findContours* setelah itu dicari kontur terluas dengan memanfaatkan fungsi *contourArea*. setelah didapatkan posisinya, dicari nilai tengah dari kontur yang ditemukan dengan mengubah kontur menjadi *moments* agar dapat diakses secara *array*. Nilai x dan y terletak pada kombinasi posisi array m10, m01 dan m00. Untuk mendapatkan nilai x dan y yang benar digunakan rumus:

$$x = \frac{m10}{m00} \text{ dan } y = \frac{m01}{m00} \tag{14}$$

Setelah didapatkan nilai x dan y pada setiap kotak ditemukan, maka jalur dari pipa yang ingin dijejak dapat dikalkulasikan dengan rumus:

$$\text{deg} = \tan^{-1} \frac{y1-y2}{x1-x2} * \left(\frac{180}{\pi}\right) \tag{15}$$

C. Perhitungan Fuzzy untuk Kecepatan Motor

Prinsip dasar dalam perancangan basis aturan kontrol logika fuzzy sesuai dengan tabel 1 adalah sebagai berikut, jika variabel proses *roll* telah mencapai nilai yang diinginkan, perubahan error bernilai nol, balon udara berada dalam kondisi stabil dan pengendali logika *fuzzy* dipertahankan konstan. Namun apabila sebaliknya, nilai variabel belum sesuai dengan

Tabel 1. Basis Aturan Fuzzy Motor Kiri-Kanan

| line2mid direction | Fkiri | Kiri | Tengah | Kanan | Fkanan |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| eKiri | PKi, CKa | NKi, NKa | NKi, CKa | PKi, CKa | CKi, PKa |
| eLurus | PKi, CKa | NKi, CKa | CKa, CKa | NKi, CKa | CKi, PKa |
| eKanan | PKi, CKa | CKi, PKa | CKa, CKi | NKi, NKa | CKi, PKa |

Tabel 2. Basis Aturan Fuzzy Motor Bawah Kiri-Bawah Kanan

| e-roll roll | Fkiri | Kiri | Tengah | Kanan | Fkanan |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| eKiri | CBKi, PBKa | CBKi, PBKa | NBKi, PBKa | PBKi, NBKa | PBKi, CBKa |
| eTengah | CBKi, PBKa | NBKi, PBKa | PBKi, PBKa | PBKi, NBKa | PBKi, CBKa |
| eKanan | CBKi, PBKa | NBKi, PBKa | PBKi, NBKa | PBKi, CBKa | PBKi, CBKa |

Keterangan:

- CBKi = Cepat Bawah Kiri, CKi = Cepat Kiri,
- NBKi = Normal Bawah Kiri, NKi = Normal Kiri,
- PBKi = Pelan Bawah Kiri, PKi = Pelan Kiri,
- CBKa = Cepat Bawah Kanan, CKa = Cepat Kanan,
- NBKa = Normal Bawah Kanan, NKa = Normal Kanan,
- PBKa = Pelan Bawah Kanan, PKa = Pelan Kanan.

yang diinginkan, dan balon mengalami *roll* maka sinyal kendali berubah sesuai dengan besarnya nilai *error roll* dan nilai *roll* saat ini.

Sedangkan untuk kendali logika fuzzy pada perbelokan sesuai dengan tabel 2, terdapat nilai *error* yang menandakan balon tidak berada pas diatas pipa dan nilai direksi pipa yang menandakan pipa berbelok. Jika nilai *error* nol dan direksi juga nol, balon udara berada pas diatas pipa yang sedang dijejak.

IV. HASIL DAN ANALISA

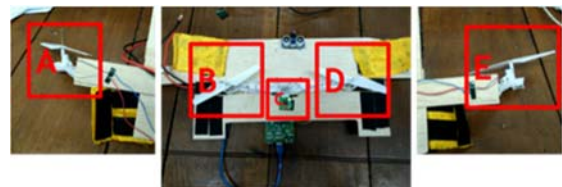
A. Realisasi Desain Balon Udara

Pada tugas akhir ini digunakan dua balon udara air swimmer yang akan diisi dengan helium. Volume dari balon udara ini adalah 0.1274 m3. Dua balon udara air swimmer mempunyai volume untuk diisi helium sebesar 0.2548 m3.

Gambar 8 menunjukkan lokasi daripada kamera beserta motor yang digunakan. Pada alat yang dibuat, digunakan dua set motor yaitu motor bawah dan mtor samping. Hal ini

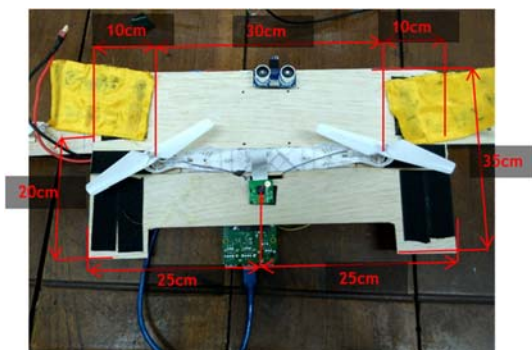


Gambar 7. Realisasi Balon Udara yang Digunakan



- Keterangan:
 A = Motor Samping Kanan
 B = Motor Bawah Kanan
 C = Kamera
 D = Motor Bawah Kiri
 E = Motor Samping Kiri
 Dimasukkan dalam gambar

Gambar 8. Realisasi Kotak Kontrol dan Lokasi Motor



Gambar 9. Posisi Kamera dan Motor Bawah

digunakan untuk mempermudah perhitungan belok serta perhitungan dari keseimbangan. Gambar 9 menunjukkan ukuran dari lokasi penempatan kamera, motor bawah kiri dan kanan, serta ukuran kotak kontrol yang digunakan.

B. Pengujian Roll Algoritma Madgwick

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur performa dari filter Madgwick untuk *Inertial Measurement Unit* yang digunakan. Didapatkan data sesuai pada gambar 11. Dari data yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa filter Madgwick memberikan data yang akurat dengan *error* rata-rata sebesar $5,3^\circ$ untuk hasil *pitch* dan $0,3^\circ$ untuk hasil *roll*.

C. Pengujian Jarak Perhitungan dan Jarak Sesungguhnya dengan Menggunakan Pengolahan Citra

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui error dari perhitungan berdasarkan pengolahan citra dibandingkan dengan jarak sesungguhnya. Didapatkan data sesuai pada gambar 12. Berdasarkan data yang diperoleh, metode penjeakan pipa dengan menggunakan ROI dan *contour finding* mampu menjejak pipa dengan ketelitian 0.3 cm

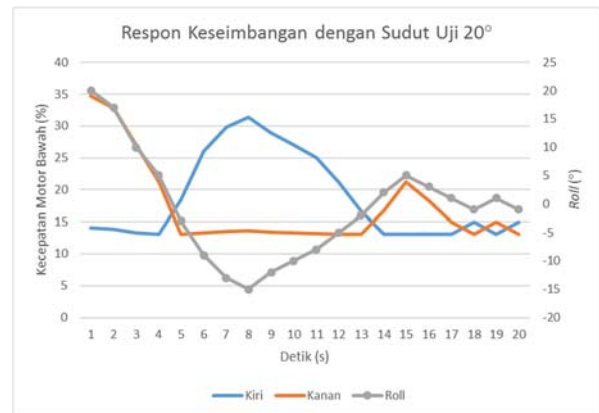
D. Pengujian Respon Keseimbangan



Gambar 12. Grafik Pengujian Jarak dengan Kamera

Tabel 3. Data Pengujian Keseimbangan

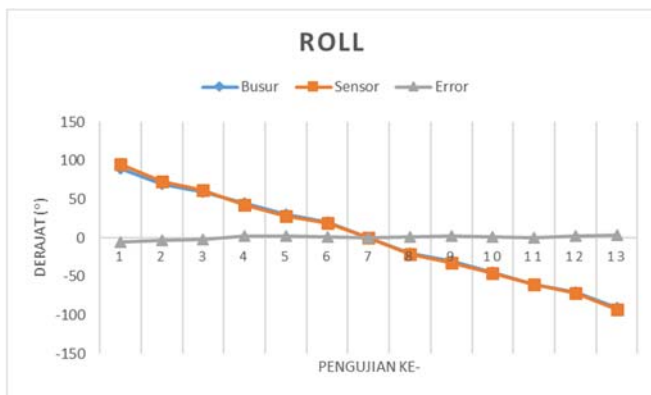
| Detik (s) | Sudut Uji (°) | Kiri (%) | Kanan (%) | Roll (°) |
|-----------|---------------|----------|-----------|----------|
| 1 | 20 | 14 | 35 | 20 |
| 2 | | 14 | 33 | 17 |
| 3 | | 13 | 27 | 10 |
| 4 | | 13 | 21 | 5 |
| 5 | | 18 | 13 | -3 |
| 6 | | 26 | 13 | -9 |
| 7 | | 30 | 14 | -13 |
| 8 | | 31 | 14 | -15 |
| 9 | | 29 | 13 | -12 |
| 10 | | 27 | 13 | -10 |
| 11 | | 25 | 13 | -8 |
| 12 | | 21 | 13 | -5 |
| 13 | | 17 | 13 | -2 |
| 14 | | 13 | 17 | 2 |
| 15 | | 13 | 21 | 5 |
| 16 | | 13 | 18 | 3 |
| 17 | | 13 | 15 | 1 |
| 18 | | 15 | 13 | -1 |
| 19 | | 13 | 15 | 1 |
| 20 | | 15 | 13 | -1 |



Gambar 13. Grafik Pengujian Respon Keseimbangan.

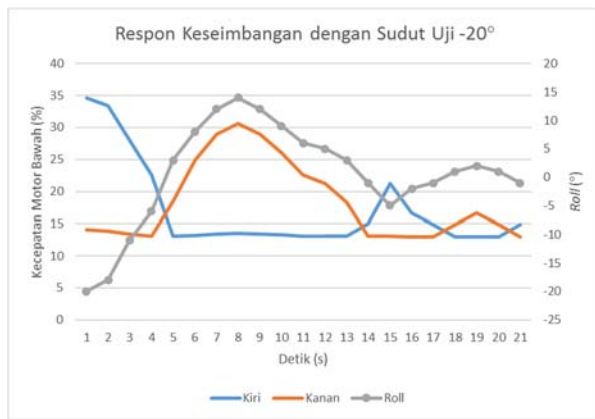
Tabel 4. Data Pengujian Keseimbangan

| Detik (s) | Sudut Uji (°) | Kiri (%) | Kanan (%) | Roll (°) |
|-----------|---------------|----------|-----------|----------|
| 1 | -20 | 35 | 14 | -20 |
| 2 | | 33 | 14 | -18 |
| 3 | | 28 | 13 | -11 |
| 4 | | 23 | 13 | -6 |
| 5 | | 13 | 18 | 3 |
| 6 | | 13 | 25 | 8 |
| 7 | | 13 | 29 | 12 |
| 8 | | 14 | 31 | 14 |
| 9 | | 13 | 29 | 12 |
| 10 | | 13 | 26 | 9 |
| 11 | | 13 | 23 | 6 |
| 12 | | 13 | 21 | 5 |
| 13 | | 13 | 18 | 3 |
| 14 | | 15 | 13 | -1 |
| 15 | | 21 | 13 | -5 |
| 16 | | 17 | 13 | -2 |
| 17 | | 15 | 13 | -1 |
| 18 | | 13 | 15 | 1 |
| 19 | | 13 | 17 | 2 |
| 20 | | 13 | 15 | 1 |
| 21 | | 15 | 13 | -1 |



Gambar 11. Grafik Pembacaan Roll dengan Filter Madgwick

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon dari sistem keseimbangan pada balon yang telah dirancang. Didapatkan hasil sesuai pada tabel 5 dan 6.



Gambar 14. Grafik Pengujian Respon Keseimbangan

V. KESIMPULAN

Telah dirancang balon udara dengan kendali yang terdiri dari image processing untuk menjejak pipa dan sensor IMU dengan kontrol fuzzy untuk mempertahankan keseimbangan. Berdasarkan data yang diperoleh, metode penjejakan pipa dengan menggunakan ROI dan *contour finding* mampu menjejak pipa dengan ketelitian 0.3 cm dan data yang didapat dari pengujian sensor giroskop dapat disimpulkan bahwa metode filter magdwick mampu memfilter data giroskop dengan kesalahan rata-rata sebesar 0,76% atau 0.3°. Serta Penggunaan logika *fuzzy* dapat diterapkan pada sistem kontrol pergerakan balon dan keseimbangan balon, dengan *variable* yang digunakan berupa jarak *error* posisi dan derajat arah pipa untuk sistem motor pergerakan balon, serta data giroskop *roll* dan *error roll* untuk sistem keseimbangan balon udara.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. "E-Ballon" <URL: <http://www.eballoon.org/balloon/balloon-usages.html>>. Mei. 2016
- [2] Anonim. "Intro to Weather Balloons" <URL: <http://www.highaltitudescience.com/pages/intro-to-weather-balloons>>. Mei. 2016
- [3] Skuza, J. R., Park, Y., & Kim, H. J. et al. "Feasibility study of cargo airship transportation systems powered by new green energy technologies". NASA Center for AeroSpace Information. 2014
- [4] Elfes, A., Bueno, S. S., Bergerman, M., & Ramos, J. G., Jr. "A semi-autonomous robotic airship for environmental monitoring missions". In Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. Leuven. Belgium. Mei. 1998
- [5] Kanistras, K., Martins, G., & Rutherford, M. J., et al. "Survey of unmanned aerial vehicles (UAVs) for traffic monitoring". In Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Netherlands. 2014
- [6] Yang, Y., Wu, J., & Zheng, W. "Design, modeling and control for a stratospheric telecommunication platform". Acta Astronautica. 80(November–December). 181–189. 2012
- [7] Ramos, J. G., Jr., Carneiro de Paiva, E., & Azinheira, J. R., et al. "Autonomous flight experiment with a robotic unmanned airship". In IEEE international conference on robotics and automation. Seoul. Korea. 2001
- [8] de Paiva, E. C., Bueno, S. S., & Gomes, S. B. V., et al. "A control system development environment for AURORA's semi-autonomous robotic airship". In 1999 IEEE international conference on robotics and automation. Detroit. USA. 1999
- [9] Anonim, "Explanation of GPS/GNSS Drift" <URL: [https://sites.aces.edu/group/crops/precisionag/Publications/Timely%](https://sites.aces.edu/group/crops/precisionag/Publications/Timely%20Information/GPS-GNSS_Drift.pdf)

- 20Information/GPS-GNSS_Drift.pdf>. Mei. 2016
- [10] D. Jeronimo, R. Alcacer dan F. C. Alegria. "Line Following and Ground Vehicle Tracking by an Autonomous Aerial Blimp". Institute for Systems and Robotics Lisboa. 2016
- [11] G. Pang dan H. Liu. "Evaluation of a low-cost MEMS accelerometer for distance measurement". *Journal of Intelligent and Robotic System* 30. 2001
- [12] K. Seifert dan O. Camacho. "Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers". Freescale Semiconductor. 2007
- [13] A. Noth, S. Fux dan S. Bouabdallah. "Inertial Measurement Unit" <URL: [http://sky-sailor.ethz.ch/docs/Development_of_a_Plannar_Low_Cost_Inertial_Measurement_Unit_for_UAVs_and_MAVs_\(Fux2008\).pdf](http://sky-sailor.ethz.ch/docs/Development_of_a_Plannar_Low_Cost_Inertial_Measurement_Unit_for_UAVs_and_MAVs_(Fux2008).pdf)>. Januari. 2016
- [14] Anonim. "hyperphysic.phy-astr.gsu.edu". <URL: <http://hyperphysic.phy-astr.gsu.edu/hbase/gyr.html>>. Mei. 2016
- [15] S. O. Madgwick. "An Efficient Orientation Filter for Inertial and Inertial/Magnetic Sensor Arrays". *Report x-io and University of Bristol (UK)*. 2010
- [16] W. R. Hamilton. "Elements of Quaternions". Longmans: Green & Company. 1866
- [17] R. Munir. "Pengolahan Citra Digital dengan Pendekatan Algoritmik Informatika". Bandung. 2004
- [18] S. I. Syaifi. "Open Computer Vision (OpenCV)". 2011
- [19] L. Shapiro dan G. C. Stockman. "Computer Vision". Prentice Hall. 2001
- [20] T. Pavlidis. "Algorithms for Graphic and Image Processing". 1882.
- [21] D. Davies, D. Bathurst dan R. Bathurst. "The Telling Image: The Changing Balance Between Pictures and Words in Technological Age". Clarendon Pr. 1990
- [22] T. Sutojo, E. Mulyanto dan V. Suhartono. "Kecerdasan Buatan". Yogyakarta: Andi Offset. 2011
- [23] S. Kusumadewi. "Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)". Yogyakarta: Graha Ilmu. 2003
- [24] R. AS. "Modul Pembelajaran Rekayasa Perangkat Lunak". Bandung. 2011