

DAFTAR ISI

| | |
|---|----|
| LEMBAR PENGESAHAN..... | 2 |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI..... | 3 |
| KATA PENGANTAR..... | 4 |
| HALAMAN PERSEMBAHAN..... | 6 |
| DAFTAR ISI..... | 7 |
| DAFTAR GAMBAR | 10 |
| DAFTAR TABEL | 14 |
| CATATAN REVISI DOKUMEN..... | 15 |
| ABSTRAK | 17 |
| ABSTRACT | 19 |
| RINGKASAN EKSEKUTIF..... | 21 |
| PENDAHULUAN..... | 23 |
| I. PROSES PERANCANGAN, IMPLEMENTASI SISTEM, DAN SIMULASI..... | 26 |
| A. Proses Perancangan | 26 |
| B. Implementasi Sistem Navigasi <i>Quadrotor</i> | 29 |
| B.1. Pengolahan data <i>Altitude quadrotor</i> | 29 |
| B.1.1 Spesifikasi dan Cara Kerja Sensor Akuisisi Data <i>Altitude</i> | 29 |
| B.1.2 Perancangan Akuisisi Data <i>Altitude</i> dengan menggunakan <i>Kalman Filter</i> | 30 |
| B.2. Pengolahan data <i>attitude quadrotor</i> | 31 |
| B.2.1. Akuisisi data akselerometer..... | 31 |
| B.2.2. Akuisisi data giroskop..... | 40 |
| B.2.3. Akuisisi data magnetometer | 43 |
| B.3. Algoritma estimasi orientasi <i>quadrotor</i> | 51 |
| B.3.1. Estimasi orientasi dengan menggunakan <i>Madgwick Filter</i> | 51 |
| B.3.2. Estimasi orientasi dengan menggunakan <i>Kalman Filter</i> | 61 |
| B.3.3. Akuisisi data <i>yaw</i> , <i>pitch</i> , dan <i>roll</i> | 67 |
| B.4. Alternatif lain perolehan data orientasi <i>quadrotor</i> | 70 |
| B.5. Perancangan <i>hardware</i> dan sistem <i>quadrotor</i> | 71 |
| B.5.1 Penggunaan sensor GY-88 untuk orientasi dan sensor VL53L0X untuk <i>Altitude</i> | 71 |
| B.5.2 Penggunaan sensor orientasi BNO-055 dan sensor <i>Altitude</i> VL53L0X..... | 73 |
| C. Simulasi Sistem Kendali <i>Quadrotor</i> | 76 |
| C.1. Proses Smoothing pada Reference Signal | 76 |
| C.1.1. Proses Smoothing pada <i>Altitude</i> Reference Signal | 76 |
| C.1.2. Proses Smoothing pada <i>Attitude</i> Reference Signal | 77 |
| C.2. Kendali <i>Attitude</i> dengan <i>Backstepping</i> pada Ranah Kontinu | 79 |
| C.3. Kendali <i>Attitude</i> dengan Model Reference Adaptive Control (MRAC) Augmented Backstepping pada Ranah Kontinu | 81 |
| C.4.1 Perancangan Reference Model Kontinu | 82 |

| | | |
|--------|---|-----|
| C.4.2 | Analisis Sistem Riil dengan <i>uncertainty</i> dan <i>disturbance</i> | 83 |
| C.4.3 | Perancangan MRAC-Augmented Backstepping Kontinu | 86 |
| C.4.4 | Perancangan Update Law | 90 |
| C.4. | Kendali L1 Adaptif Augmented Back-stepping Ranah Kontinu | 95 |
| C.5. | Kendali Backstepping Ranah Diskret | 99 |
| C.5.1 | Solusi Analitik | 99 |
| C.5.2 | Pendekatan Euler | 105 |
| C.6. | Kendali MRAC Augmented Backstepping Ranah Diskret | 108 |
| C.7. | Kendali Altitude Backstepping Ranah Kontinu | 117 |
| C.8. | Kendali Altitude MRAC Augmented Backstepping Ranah Kontinu | 119 |
| C.9. | Kendali Altitude L1 Adaptif Augmented Backstepping Ranah Kontinu | 123 |
| II. | PENGUJIAN, ANALISIS, DAN REVISI SISTEM QUADROTOR | 126 |
| A. | Pengujian Sistem Navigasi Quadrotor | 126 |
| A.1. | Pengujian Madgwick Filter pada IMU GY-88 | 126 |
| A.1.1. | Pengujian kinerja statis Madgwick Filter | 126 |
| A.1.2. | Pengujian Akurasi Madgwick Filter | 131 |
| A.2. | Pengujian Kalman Filter pada BNO-055 | 140 |
| A.2.1. | Perumusan magnetometer dengan Least Square Ellipse Fitting | 140 |
| A.2.2. | Pengujian akurasi sensor BNO-055 | 141 |
| A.3. | Pengujian Kalman Filter pada VL53L0X | 142 |
| A.3.1. | Pengujian dengan library Kalman Filter yang tersedia | 142 |
| A.3.2. | Pengujian dengan Kalman Filter tanpa menggunakan library (Revisi Sistem Altitude) | 147 |
| A.3.3. | Pengujian Tanggapan Perubahan ketinggian dengan menggunakan Algoritma Kalman Filter | 150 |
| B. | Pengujian Sistem Kendali Quadrotor | 153 |
| B.1. | Hasil Pengujian Smoothing Filter | 153 |
| B.2. | Hasil Pengujian Backstepping Control dengan Asumsi Sistem Ideal Kontinu | 156 |
| B.3. | Hasil Pengujian Backstepping Control pada Sistem dengan <i>uncertainty</i> dan <i>disturbance</i> Kontinu | 158 |
| B.4. | Hasil Pengujian MRAC-Augmented Backstepping pada Sistem dengan <i>uncertainty</i> dan <i>disturbance</i> secara Kontinu | 160 |
| B.5. | Hasil Pengujian Kendali L1 Adaptif pada Sistem dengan <i>uncertainty</i> dan <i>disturbance</i> Ranah Kontinu | 162 |
| B.6. | Hasil Pengujian Backstepping Control dengan Asumsi Sistem Ideal Ranah Diskret | 165 |
| B.7. | Hasil Pengujian MRAC-Augmented Backstepping pada Sistem dengan <i>uncertainty</i> dan <i>disturbance</i> Ranah Diskret | 167 |

| | | |
|-------|---|-----|
| B.8. | Perbandingan Implementasi antara <i>Backstepping Control</i> dengan MRAC-Augmented <i>Backstepping Control</i> pada Model Non-Ideal | 169 |
| B.9. | Perbandingan Implementasi antara MRAC-Augmented <i>Backstepping Control</i> dan \mathcal{L}_1 –Adaptive Augmented <i>Backstepping Control</i> | 172 |
| B.10. | Perbandingan Implementasi antara Sistem Kendali Kontinu dengan Sistem Kendali Diskret (pada implementasi MRAC) | 173 |
| III. | KESIMPULAN | 176 |
| IV. | SARAN | 178 |
| | DAFTAR PUSTAKA..... | 179 |
| | LAMPIRAN-LAMPIRAN | 181 |
| | LAMPIRAN L-1 | 181 |
| | LAMPIRAN L-2 | 193 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|-----|
| Gambar I. 1. Bagan Alir Metodologi Riset | 27 |
| Gambar I. 2. Proses Sensor Fusion untuk memperoleh orientasi quadrotor | 28 |
| Gambar I. 3. Sensor jarak CJVL53L0XV2 TOF (Time of Flight), posisi pin(kiri), rangkaian(kanan) | 29 |
| Gambar I. 4. Konfigurasi <i>reset</i> untuk sensor akselerometer, giroskop dan suhu yang terdapat pada sensor IMU tipe MPU-6050 [3]..... | 35 |
| Gambar I. 5. Sensitivitas sensor akselerometer terhadap nilai maksimum bit yang diperoleh sensor [3] | 35 |
| Gambar I. 6. Hasil rata-rata dari 10000 sampel data akselerometer..... | 36 |
| Gambar I. 7. Data sampel 20 dari 10000 sampel data akselerometer dalam bentuk csv..... | 36 |
| Gambar I. 8. List efek penggunaan <i>Digital Low Pass Filter</i> pada sensor IMU tipe MPU-6050 | 38 |
| Gambar I. 9. <i>Register</i> pada sensor IMU tipe MPU-6050 | 39 |
| Gambar I. 10. <i>Full scale range</i> pada giroskop yang berefek pada sensitivitas bit [3] | 41 |
| Gambar I. 11. Hasil rata-rata 10000 sampel untuk <i>gyroscope offset</i> | 41 |
| Gambar I. 12. Data sampel 20 dari 10000 sampel data giroskop dalam bentuk csv | 42 |
| Gambar I. 13. Blok diagram <i>filter</i> orientasi berbasis <i>Madgwick Filter</i> | 57 |
| Gambar I. 14. Blok diagram untuk <i>filter</i> orientasi MARG | 60 |
| Gambar I. 15. Sensor GY-88 (kiri) dan sensor BNO-055(kanan) untuk penentuan orientasi objek..... | 71 |
| Gambar I. 16. Sistem arsitektur pada <i>quadrotor</i> | 72 |
| Gambar I. 17. Skematik PCB untuk sistem arsitektur, sensor GY-88, dan sensor VL53L0X | 72 |
| Gambar I. 18. Hasil perancangan sistem elektronis PCB dengan sensor GY-88 | 73 |
| Gambar I. 19. Hasil rancangan PCB setelah disolder | 73 |
| Gambar I. 20. Skematik PCB untuk sistem arsitektur, sensor BNO-055, dan sensor VL53L0X | 74 |
| Gambar I. 21. Hasil perancangan sistem elektronis PCB dengan sensor BNO-055 | 75 |
| Gambar I. 22. Hasil rancangan PCB setelah disolder | 75 |
| | |
| Gambar II. 1. Hasil output 100 sampel orientasi berupa representasi <i>euler</i> | 129 |
| Gambar II. 2. Raw data magnetometer [kiri] dan hasil olahan dengan metode least square ellipse fitting [kanan]..... | 141 |
| Gambar II. 3. Pengujian sensor jarak VL53L0X dengan menggunakan penggaris dan dilakukan secara horizontal (terhadap penghalang papan berjarak 5 cm dari sensor [kiri] dan terhadap penghalang <i>note</i> hitam berjarak 60 cm dari sensor [kanan]) | 142 |
| Gambar II. 4. Grafik perbandingan antara pengukuran manual dan hasil pengukuran sensor dengan <i>library</i> “SimpleKalmanFilter” terhadap penghalang hitam | 144 |
| Gambar II. 5. Grafik perbandingan antara pengukuran manual dan hasil pengukuran sensor dengan <i>library</i> “SimpleKalmanFilter” terhadap penghalang papan..... | 146 |
| Gambar II. 6. Grafik perbandingan antara pengukuran manual dan hasil pengukuran sensor dengan perancangan <i>Kalman Filter</i> tanpa <i>library</i> terhadap penghalang gelap..... | 148 |
| Gambar II. 7. Grafik perbandingan antara pengukuran manual dan hasil pengukuran sensor dengan perancangan <i>Kalman Filter</i> tanpa <i>library</i> terhadap penghalang berwarna terang | 150 |
| Gambar II. 8. Perbandingan hasil pengukuran manual, pengolahan data dengan <i>library Kalman Filter</i> , dan pengolahan data dengan hasil rancangan sendiri <i>Kalman Filter</i> (a) ketika 5 cm (b) 27 cm terhadap penghalang berwarna gelap | 151 |
| Gambar II. 9. dan pengolahan data dengan hasil rancangan sendiri <i>Kalman Filter</i> (a) ketika 5 cm (b) 27 cm terhadap penghalang berwarna terang | 152 |
| Gambar II. 10. <i>Generated Smoothing Filter Altitude</i> | 153 |
| Gambar II. 11. <i>Generated Smoothing Filter Altitude Velocity</i> | 153 |
| Gambar II. 12. <i>Generated Smoothing Filter Altitude Acceleration</i> | 153 |
| Gambar II. 13. <i>Smoothing Filter Attitude Quaternion q0</i> | 153 |
| Gambar II. 14. <i>Smoothing Filter Attitude Quaternion q1</i> | 154 |
| Gambar II. 15. <i>Smoothing Filter Attitude Quaternion q2</i> | 154 |

| | |
|---|-----|
| Gambar II. 16. <i>Smoothing Filter Attitude Quaternion q_3</i> | 154 |
| Gambar II. 17. <i>Generated Smoothing Filter ω_x</i> | 154 |
| Gambar II. 18. <i>Generated Smoothing Filter ω_y</i> | 154 |
| Gambar II. 19. <i>Generated Smoothing Filter ω_z</i> | 154 |
| Gambar II. 20. <i>Generated Angular Acceleration ω_x</i> | 155 |
| Gambar II. 21. <i>Generated Angular Acceleration ω_y</i> | 155 |
| Gambar II. 22. <i>Generated Angular Acceleration ω_z</i> | 155 |
| Gambar II. 23. <i>Quadrotor Altitude Velocity</i> | 156 |
| Gambar II. 24. <i>Quadrotor Altitude</i> | 156 |
| Gambar II. 25. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_x</i> | 156 |
| Gambar II. 26. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_z</i> | 156 |
| Gambar II. 27. <i>Quadrotor quaternion q_0</i> | 156 |
| Gambar II. 28. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_1</i> | 156 |
| Gambar II. 29. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_2</i> | 157 |
| Gambar II. 30. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_3</i> | 157 |
| Gambar II. 31. <i>Desired Thrust</i> | 157 |
| Gambar II. 32. <i>Desired Torque</i> | 157 |
| Gambar II. 33. <i>Quadrotor Altitude Velocity</i> | 158 |
| Gambar II. 34. <i>Quadrotor Altitude</i> | 158 |
| Gambar II. 35. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_x</i> | 158 |
| Gambar II. 36. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_y</i> | 158 |
| Gambar II. 37. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_z</i> | 158 |
| Gambar II. 38. <i>Desired Thrust</i> | 158 |
| Gambar II. 39. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_0</i> | 159 |
| Gambar II. 40. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_1</i> | 159 |
| Gambar II. 41. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_1</i> | 159 |
| Gambar II. 42. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_3</i> | 159 |
| Gambar II. 43. <i>Desired Torque</i> | 159 |
| Gambar II. 44. <i>Quadrotor Altitude Velocity</i> | 160 |
| Gambar II. 45. <i>Quadrotor Altitude</i> | 160 |
| Gambar II. 46. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_x</i> | 160 |
| Gambar II. 47. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_y</i> | 160 |
| Gambar II. 48. <i>Quadrotor Angular Velocity ω_z</i> | 160 |
| Gambar II. 49. <i>Desired Thrust</i> | 160 |
| Gambar II. 50. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_0</i> | 161 |
| Gambar II. 51. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_1</i> | 161 |
| Gambar II. 52. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_2</i> | 161 |
| Gambar II. 53. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_3</i> | 161 |
| Gambar II. 54. <i>Desired Torque</i> | 161 |
| Gambar II. 55. <i>Quadrotor Altitude uncertainty</i> | 162 |
| Gambar II. 56. <i>Desired Thrust</i> | 162 |
| Gambar II. 57. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_0</i> | 162 |
| Gambar II. 58. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_1</i> | 162 |
| Gambar II. 59. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_2</i> | 162 |
| Gambar II. 60. <i>Quadrotor Attitude quaternion q_3</i> | 162 |
| Gambar II. 61. <i>Attitude Uncertainty θ_0</i> | 163 |
| Gambar II. 62. <i>Attitude Uncertainty θ_1</i> | 163 |
| Gambar II. 63. <i>Attitude Uncertainty θ_2</i> | 163 |
| Gambar II. 64. <i>Desired Torque τ_x</i> | 163 |
| Gambar II. 65. <i>Desired Torque τ_y</i> | 163 |
| Gambar II. 66. <i>Desired Torque τ_z</i> | 163 |

| | |
|--|-----|
| Gambar II. 67. Angular Velocity ω_x | 163 |
| Gambar II. 68. Angular Velocity ω_y | 163 |
| Gambar II. 69. Angular Velocity ω_z | 164 |
| Gambar II. 70. Quadrotor Altitude | 164 |
| Gambar II. 71. Angular Velocity ω_x | 165 |
| Gambar II. 72. Angular Velocity ω_y | 165 |
| Gambar II. 73. Angular Velocity ω_z | 165 |
| Gambar II. 74. Quadrotor attitude quaternion q_0 | 165 |
| Gambar II. 75. Quadrotor attitude quaternion q_1 | 166 |
| Gambar II. 76. Quadrotor attitude quaternion q_2 | 166 |
| Gambar II. 77. Quadrotor attitude quaternion q_3 | 166 |
| Gambar II. 78. Quadrotor Torque | 166 |
| Gambar II. 79. Norm of ω_{BC} | 166 |
| Gambar II. 80. Angular Velocity ω_x | 167 |
| Gambar II. 81. Angular Velocity ω_y | 167 |
| Gambar II. 82. Angular Velocity ω_z | 167 |
| Gambar II. 83. Quadrotor Attitude quaternion q_0 | 167 |
| Gambar II. 84. Quadrotor Attitude quaternion q_1 | 168 |
| Gambar II. 85. Quadrotor Attitude quaternion q_2 | 168 |
| Gambar II. 86. Quadrotor Attitude quaternion q_3 | 168 |
| Gambar II. 87. Uncertainty Estimator θ_0 | 168 |
| Gambar II. 88. Uncertainty Estimator θ_1 | 168 |
| Gambar II. 89. Uncertainty Estimator θ_2 | 168 |
| Gambar II. 90. Desired Torque τ_x | 169 |
| Gambar II. 91. Desired Torque τ_y | 169 |
| Gambar II. 92. Desired Torque τ_z | 169 |
| Gambar II. 93. Norm of ω_{BC} | 169 |
| Gambar II. 94. Error tidak konvergen quaternion q_0 | 170 |
| Gambar II. 95. Error konvergen quaternion q_0 | 170 |
| Gambar II. 96. Error tidak konvergen quaternion q_1 | 170 |
| Gambar II. 97. Error konvergen quaternion q_1 | 170 |
| Gambar II. 98. Error tidak konvergen quaternion q_2 | 170 |
| Gambar II. 99. Error konvergen quaternion q_2 | 170 |
| Gambar II. 100. Error tidak konvergen quaternion q_3 | 171 |
| Gambar II. 101. Error konvergen quaternion q_3 | 171 |
| Gambar II. 102. Error tidak konvergen altitude | 171 |
| Gambar II. 103. Error konvergen altitude | 171 |
| Gambar II. 104. Torsi dengan frekuensi tinggi hasil MRAC | 172 |
| Gambar II. 105. Torsi τ_x dengan frekuensi lebih rendah dan <i>smooth</i> hasil dari Kendali L1 Adaptif | 172 |
| Gambar II. 106. Torsi τ_y dengan frekuensi lebih rendah dan <i>smooth</i> hasil dari Kendali L1 Adaptif | 172 |
| Gambar II. 107. Torsi τ_z dengan frekuensi lebih rendah dan <i>smooth</i> hasil dari Kendali L1 Adaptif | 172 |
| Gambar II. 108. Thrust hasil MRAC | 173 |
| Gambar II. 109. Thrust hasil Kendali L1 Adaptif | 173 |
| Gambar II. 110. Quaternion q_0 tidak stabil | 173 |
| Gambar II. 111. Quaternion q_0 tidak <i>asymptotically stable</i> | 173 |
| Gambar II. 112. quaternion q_1 tidak stabil | 174 |
| Gambar II. 113. quaternion q_1 tidak <i>asymptotically stable</i> | 174 |
| Gambar II. 114. quaternion q_2 tidak stabil | 174 |
| Gambar II. 115. quaternion q_2 tidak <i>asymptotically stable</i> | 174 |
| Gambar II. 116. Quaternion q_1 tidak stabil | 174 |

| | |
|---|-----|
| Gambar II. 117.Quaternion q1 tidak <i>asymptotically stable</i> | 174 |
| Gambar II. 118.Quaternion q2 tidak stabil..... | 175 |
| Gambar II. 119.Quaternion q2 tidak <i>asymptotically stable</i> | 175 |
| Gambar II. 120.Quaternion q3 tidak stabil..... | 175 |
| Gambar II. 121.Quaternion q3 tidak <i>asymptotically stable</i> | 175 |
| Gambar II. 122.quaternion q3 tidak stabil..... | 175 |
| Gambar II. 123.quaternion q3 tidak <i>asymptotically stable</i> | 175 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----|
| Tabel I. 1. <i>Source code</i> pengolahan data akselerometer..... | 37 |
| Tabel I. 2. <i>Source code</i> kalibrasi giroskop (Arduino code):..... | 42 |
| Tabel I. 3. Penamaan parameter momen inersia pada analisa model non-ideal..... | 81 |
| Tabel I. 4. Penamaan parameter matriks konversi pada analisa model non-ideal..... | 84 |
| Tabel II. 1. Hasil pengujian kinerja statis dari perubahan nilai parameter β <i>Madgwick Filter</i> | 130 |
| Tabel II. 2. Uji sampel akurasi sudut <i>yaw</i> dengan $\beta = 34(\omega)$ bertipe <i>inhomogenous form</i> | 132 |
| Tabel II. 3. Uji sampel akurasi sudut <i>pitch</i> dengan $\beta = 34\sqrt{(\omega)}$ bertipe <i>inhomogenous form</i> | 133 |
| Tabel II. 4. Uji sampel akurasi sudut <i>roll</i> dengan $\beta = 34(\omega)$ bertipe <i>inhomogenous form</i> | 134 |
| Tabel II. 5. Uji sampel akurasi sudut <i>yaw</i> dengan $\beta = 0.01$ bertipe <i>inhomogenous form</i> | 135 |
| Tabel II. 6. Uji sampel akurasi sudut <i>pitch</i> dengan $\beta = 0.01$ bertipe <i>inhomogenous form</i> | 136 |
| Tabel II. 7. Uji sampel akurasi sudut <i>roll</i> dengan $\beta = 0.01$ bertipe <i>inhomogenous form</i> | 137 |
| Tabel II. 8. Hasil Uji sampel akurasi sudut <i>euler</i> dengan $\beta = 0.01$ <i>Madgwick Filter</i> bertipe <i>homogenous form</i> | 138 |
| Tabel II. 9. Perbandingan <i>homogenous form</i> dan <i>inhomogenous form</i> ketika hanya sudut <i>yaw</i> diputar 90 derajat..... | 139 |
| Tabel II. 10. Perbandingan <i>homogenous form</i> dan <i>inhomogenous form</i> ketika hanya sudut <i>pitch</i> diputar 45 derajat..... | 139 |
| Tabel II. 11. Perbandingan <i>homogenous form</i> dan <i>inhomogenous form</i> ketika hanya sudut <i>roll</i> diputar 60 derajat..... | 140 |
| Tabel II. 12. Hasil Uji sampel akurasi sudut <i>euler</i> bertipe <i>homogenous form</i> untuk sensor BNO-055 | 141 |
| Tabel II. 13. Percobaan sensor jarak terhadap objek hitam (daya serap cahaya yang rentan tinggi) dengan <i>library</i> <SimpleKalmanFilter.h> | 143 |
| Tabel II. 14. Percobaan sensor jarak terhadap objek berwarna terang (daya serap cahaya yang rentan tinggi) dengan <i>library</i> <SimpleKalmanFilter.h> | 145 |
| Tabel II. 15. Percobaan sensor jarak terhadap objek hitam (daya serap cahaya yang rentan tinggi) dengan <i>Kalman Filter</i> tanpa <i>library</i> | 147 |
| Tabel II. 16. Percobaan sensor jarak terhadap objek berwarna terang (daya serap cahaya yang rentan tinggi) dengan <i>Kalman Filter</i> tanpa <i>library</i> | 149 |