

## DAFTAR ISI

|  |     |
|--|-----|
| ISI KATA PENGANTAR .....                                   | v   |
| DAFTAR ISI.....  | vii |
| DAFTAR GAMBAR .....  | ix  |
| DAFTAR TABEL.....  | xi  |
| INTISARI.....  | xiv |
| ABSTRACT.....  | xv  |
| BAB I PENDAHULUAN.....                                     | 1   |
| 1.1. Latar Belakang .....                                  | 1   |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                                 | 3   |
| 1.3. Batasan Masalah.....                                  | 3   |
| 1.4. Tujuan Penelitian.....                                | 3   |
| 1.5. Manfaat Penelitian.....                               | 3   |
| 1.6. Metodologi Penelitian .....                           | 4   |
| 1.7. Sistematika Penulisan.....                            | 5   |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....                              | 6   |
| BAB III LANDASAN TEORI.....                                | 9   |
| 3.1. Robot Humanoid .....                                  | 9   |
| 3.2. <i>Inverse Kinematic</i> .....                        | 10  |
| 3.3. Model Pendulum Terbalik Dua Dimensi.....              | 12  |
| 3.4. <i>Linear Quadratic Regulator</i> (LQR) .....         | 13  |
| 3.5. <i>Kalman Filter</i> .....                            | 16  |
| 3.6. <i>Inertial Measurement Unit</i> (IMU).....           | 17  |
| 3.6.1. Akselerometer .....                                 | 17  |
| 3.6.2. Giroskop.....                                       | 19  |
| 3.7. Kendali Integral.....                                 | 19  |
| BAB IV ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM.....                | 22  |
| 4.1. Analisa Sistem.....                                   | 22  |
| 4.2. Rancangan Arsitektur Sistem .....                     | 23  |
| 4.3. Rancangan Elektronik .....                            | 24  |
| 4.4. Rancangan Mekanik.....                                | 25  |
| 4.5. Rancangan Sistem Kendali.....                         | 26  |
| 4.6. Rancangan Perangkat Lunak Sistem .....                | 32  |
| 4.6.1. Rancangan Fungsi <i>Setup</i> .....                 | 32  |
| 4.6.2. Rancangan Fungsi <i>Sensor Fusion</i> .....         | 33  |
| 4.6.3. Rancangan Fungsi Kendali LQR .....                  | 34  |
| 4.6.4. Rancangan Fungsi <i>Motion</i> .....                | 36  |
| 4.7. Pengujian Sistem .....                                | 36  |
| 4.7.1. Pengujian <i>sensor fusion</i> .....                | 36  |
| 4.7.2. Pengujian keseimbangan berdiri robot dua kaki ..... | 37  |
| 4.7.3. Pengujian keseimbangan berdiri 1 kaki .....         | 37  |
| BAB V IMPLEMENTASI.....                                    | 39  |
| 5.1. Implementasi Mekanik .....                            | 39  |
| 5.2. Implementasi Elektronik .....                         | 39  |



|                |   |    |
|----------------|---|----|
| 5.3.           | Pengujian <i>Sensor Fusion</i> .....                                | 40 |
| 5.4.           | Pengujian keseimbangan berdiri robot dua kaki .....                 | 42 |
| 5.5.           | Pengujian keseimbangan berdiri satu kaki pada robot humanoid .....  | 45 |
| BAB VI         | HASIL DAN PEMBAHASAN .....  | 48 |
| 6.1.           | Hasil Pengujian <i>Sensor Fusion</i> .....                          | 48 |
| 6.2.           | Hasil Pengujian keseimbangan berdiri robot dua kaki.....            | 51 |
| 6.3.           | Hasil pengujian keseimbangan berdiri satu kaki pada robot humanoid. | 57 |
| 6.3.1.         | Pengujian angkat kaki kanan.....                                    | 57 |
| 6.3.2.         | Pengujian angkat kaki kiri.....                                     | 60 |
| BAB VII        | PENUTUP .....   | 63 |
| 7.1.           | Kesimpulan.....   | 63 |
| 7.2.           | Saran.....  | 63 |
| DAFTAR PUSTAKA | .....   | 66 |
| LAMPIRAN       | .....   | 68 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3.1 Perputaran <i>roll</i> , <i>pitch</i> dan <i>yaw</i> pada sumbu x,y dan z (Kajita et al., 2014)'   | 9  |
| Gambar 3.2 <i>Link</i> dan <i>joint</i> robot humanoid (Kajita et al., 2014)  | 10 |
| Gambar 3.3 <i>Inverse kinematic</i> dari kaki robot humanoid (Kajita, 2014)   | 10 |
| Gambar 3.4 Model pendulum terbalik dua dimensi (Jazar, 2010)  | 12 |
| Gambar 3.5 Gambaran 6-DOF (Starlino, 2009)  | 17 |
| Gambar 3.6 Akselerometer saat kondisi normal (Starlino, 2009)   | 10 |
| Gambar 3.7 Akselerometer saat kondisi +X (Starlino, 2009)   | 12 |
| Gambar 3.8 Akselerometer saat kondisi -Z atau jatuh bebas (2009)  | 18 |
| Gambar 3.9 Akselerometer saat kondisi berotasi di sumbu Y (Starlino, 2009)  | 18 |
| Gambar 3.10 Ruang vektor representasi akselerometer (Starlino, 2009)  | 19 |
| Gambar 3.11 Ruang vektor representasi giroskop (Starlino, 2009)   | 19 |
| Gambar 3.12 (a) Plot kurva $e(t)$ dan $u(t)$ yang menunjukkan sinyal kendali bukan nol saat sinyal <i>actuating-error</i> bernilai nol (kendali integral);<br>(b) plot kurva $e(t)$ dan $u(t)$ yang menunjukkan sinyal kendali nol ketika sinyal <i>actuating-error</i> bernilai nol (kendali proporsional) (Ogata, 2010) | 21 |
| Gambar 4.1 Perangkat elektronik robot humanoid  | 24 |
| Gambar 4.2 Rancangan Skematik Elektronis OpenCm   | 25 |
| Gambar 4.3 Letak dan variabel <i>joints</i> pada robot  | 26 |
| Gambar 4.4 Model pendulum terbalik dua dimensi (Jazar, 2010)  | 27 |
| Gambar 4.5 Momen inersia bangun ruang balok (Braun, 2012)   | 28 |
| Gambar 4.6 Diagram blok sistem kendali LQR pada robot humanoid  | 34 |
| Gambar 4.7 Program Utama  | 34 |
| Gambar 4.8 Fungsi Setup   | 35 |
| Gambar 4.9 <i>Sensor fusion</i>   | 36 |
| Gambar 4.10 Fungsi perhitungan matriks K  | 35 |
| Gambar 4.11 Fungsi kendali LQR  | 35 |
| Gambar 4.12 Fungsi <i>motion</i>  | 36 |
| Gambar 5.1 Implementasi Mekanik Robot Humanoid  | 39 |
| Gambar 5.2 Rancangan PCB Elektronis OpenCm  | 43 |
| Gambar 5.3 Papan PCB OpenCm   | 43 |
| Gambar 5.4 Kode program <i>complementary filter</i>   | 41 |
| Gambar 5.5 Kode program <i>kalman filter</i>  | 47 |
| Gambar 5.6 Kode program penalaan LQR  | 42 |
| Gambar 5.7 Kode program perhitungan nilai masukan sudut   | 43 |
| Gambar 5.8 Persamaan kendali masukan torsi Sudut berdiri 2 kaki   | 43 |
| Gambar 5.9 Persamaan kendali keluaran Sudut berdiri 2 kaki  | 44 |
| Gambar 5.10 Kode program masukan torsi pada saat mengangkat kaki kanan  | 45 |
| Gambar 5.11 Kode program keluaran input pada saat mengangkat kaki kiri  | 46 |
| Gambar 5.12 Kode program kinematika robot   | 47 |
| Gambar 6.1 Grafik hasil penalaan nilai Q pada sistem kendali robot berdiri dua kaki untuk sudut putar <i>pitch</i>  | 51 |



|   |    |
|---|----|
| Gambar 6.2 Grafik hasil penalaan nilai Q pada sistem kendali robot untuk sudut putar <i>roll</i> .....                        | 51 |
| Gambar 6.3 Support Polygon dua kaki pada permukaan bidang datar.....  | 54 |
| Gambar 6.4 <i>Support Polygon</i> dua kaki dengan sudut pada bidang .....   | 54 |
| Gambar 6.5 Grafik hasil penalaan nilai Q pada sistem kendali robot mengangkat kaki kanan untuk sudut putar <i>pitch</i> ..... | 58 |
| Gambar 6.6 Grafik hasil penalaan nilai Q pada sistem kendali robot mengangkat kaki kanan untuk sudut putar <i>roll</i> .....  | 58 |
| Gambar 6.7 <i>Gerakan inverse kinematics</i> mengangkat kaki kanan .....  | 58 |
| Gambar 6.8 Grafik hasil penalaan nilai Q pada sistem kendali robot mengangkat kaki kiri untuk sudut putar <i>pitch</i> .....  | 61 |
| Gambar 6.9 Grafik hasil penalaan nilai Q pada sistem kendali robot mengangkat kaki kiri untuk sudut putar <i>roll</i> .....   | 61 |
| Gambar 6.10 <i>Gerakan inverse kinematics</i> mengangkat kaki kiri .....  | 61 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka .....  | 7  |
| Tabel 4.1 Rancangan pin mikrokontroller .....   | 38 |
| Tabel 4.2 Pengujian sistem .....  | 38 |
| Tabel 6.1 Rata-rata nilai dan standar deviasi hasil pengujian sudut <i>pitch</i> .....        | 48 |
| Tabel 6.2 Rata-rata nilai dan standar deviasi hasil pengujian sudut <i>roll</i> .....         | 49 |
| Tabel 6.3 Karakteristik respon pengujian robot berdiri dua kaki .....                         | 56 |
| Tabel 6.4 Hasil <i>steady-state error</i> pada sudut <i>pitch</i> berdiri dua kaki .....      | 56 |
| Tabel 6.5 Hasil <i>steady-state error</i> pada sudut <i>roll</i> berdiri dua kaki .....       | 56 |
| Tabel 6.6 Karakteristik respon pengujian robot mengangkat kaki kanan.....                     | 59 |
| Tabel 6.7 Hasil <i>steady-state error</i> pada sudut <i>pitch</i> mengangkat kaki kanan ..... | 60 |
| Tabel 6.8 Hasil <i>steady-state error</i> pada sudut <i>roll</i> mengangkat kaki kanan.....   | 60 |
| Tabel 6.9 Karakteristik respon pengujian robot mengangkat kaki kiri.....                      | 62 |
| Tabel 6.10 Hasil <i>steady-state error</i> pada sudut <i>pitch</i> mengangkat kaki kiri ..... | 62 |
| Tabel 6.11 Hasil <i>steady-state error</i> pada sudut <i>roll</i> mengangkat kaki kiri.....   | 62 |

## DAFTAR SIMBOL

|                 |  |
|-----------------|--|
| $K$             | : Matriks <i>fullstate feedback gain</i> dengan ukuran $r \times n$ di mana $r$ adalah jumlah dari masukan proses dan $n$ adalah jumlah dari variabel <i>state</i> . |
| $x$             | : Sumbu $x$ pada bumi  |
| $y$             | : Sumbu $y$ pada bumi  |
| $z$             | : Sumbu $z$ pada bumi  |
| $A$             | : Panjang tulang paha pada robot   |
| $B$             | : Panjang tulang kering pada robot   |
| $C$             | : Jarak antara pangkal $A$ dan ujung $B$   |
| $r$             | : Jarak antara pangkal paha dan pergelangan kaki pada robot  |
| $P_{id(n)}$     | : Posisi pitch pada $id$ -n di koordinat bidang  |
| $R_{id(n)}$     | : Posisi roll pada $id$ -n di koordinat bidang   |
| $q_{id(n)}$     | : Sudut pada $id$ -n koordinat bidang pada pangkal paha  |
| $\alpha$        | : Menunjukkan sudut antara $r$ dan $B$   |
| $m$             | : Massa pendulum   |
| $l$             | : Panjang lengan pendulum  |
| $\theta$        | : Sudut benda secara umum.   |
| $\tau$          | : Menunjukkan torsi secara umum.   |
| $X$             | : $n \times 1$ matriks state sistem  |
| $u$             | : Masukan proses   |
| $y$             | : Keluaran proses  |
| $A$             | : $n \times n$ matriks hubungan state dengan turunan sistem  |
| $B$             | : $m \times n$ matriks hubungan masukan dengan turunan state sistem  |
| $C$             | : $o \times n$ matriks hubungan state dengan keluaran sistem   |
| $D$             | : $o \times n$ matriks hubungan masukan dengan keluaran sistem   |
| $J$             | : Cost function  |
| $t_0$           | : Waktu awal proses sistem   |
| $t_\infty$      | : Waktu akhir proses sistem  |
| $Q$             | : Bobot state luaran proses berupa matriks semidefinit positif   |
| $R$             | : Bobot masukan proses berupa matriks definit positif  |
| $KG$            | : <i>gain</i> Kalman   |
| $E_{EST}$       | : nilai estimasi kesalahan   |
| $E_{MEA}$       | : nilai kesalahan pengukuran   |
| $E_{EST_{t-1}}$ | : nilai kesalahan estimasi sebelumnya  |
| $E_{EST_t}$     | : nilai kesalahan estimasi   |
| $MEA$           | : nilai terukur  |
| $EST_{t-1}$     | : nilai estimasi sebelumnya  |
| $K_i$           | : Matriks gain integrator dengan ukuran $n \times n$ di mana $n$ adalah jumlah dari variabel <i>state</i> .  |
| $\theta_s$      | : Matriks sudut servo pada 1-18 pada robot   |



$\ddot{\theta}$  : percepatan sudut  
 $x_{\text{ref}}$  : referensi *state* berupa matriks (4 x 1)  
st : settling time  
rt : rise time