

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN TESIS	i
PERNYATAAN.....	ii
PRAKATA.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SIMBOL.....	x
INTISARI.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Metodologi Penelitian.....	4
1.7 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
BAB III LANDASAN TEORI.....	14
3.1 UAV dan Quadrotor.....	14
3.2 Model Quadrotor.....	17
3.3 State Space	23
3.4 Linier Quadratic Regulator (LQR).....	26
3.5 Jaringan Syaraf Tiruan.....	30
3.5.1 Algoritma back-propagation	33
3.6 Navigasi Global Positioning System	36
3.7 Inertial Measurement Unit (IMU).....	36
3.8 Digital Motion Processing (DMP)	37
3.9 Respon Transien Sistem Kendali	38
BAB IV ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM	40
4.1 Tahapan Penelitian.....	40
4.2 Analisis Sistem.....	43
4.3 Rancangan Sistem Kendali pada <i>Quadrotor</i>	47
4.3.1 Rancangan Kendali Quadrotor dengan LQR	49
4.3.2 Rancangan Kendali <i>Full state feedback</i> dengan LQR JST	61
4.4 Arsitektur Sistem	65
4.5 Rancangan Perangkat Keras	67
4.6 Rancangan Algoritma	69
4.6.1 Fungsi <i>setup</i>	72
4.6.2 Fungsi penalaan komponen <i>fullstate feedback</i>	72
4.6.3 Fungsi kendali <i>fullstate feedback</i> LQR JST untuk melayang.....	73
4.6.4 Fungsi kendali <i>fullstate feedback</i> LQR JST untuk penahan ketinggian	74

4.6.5	Fungsi kendali <i>fullstate feedback</i> LQR JST untuk penahan posisi..	75
4.7	Rencana Pengujian Sistem	76
4.7.1	Pengujian Kendali saat Melayang.....	76
4.7.2	Pengujian Kendali <i>quadrotor</i> dalam Mempertahankan Ketinggian	77
4.7.3	Pengujian Kendali <i>quadrotor</i> dalam Mempertahankan Posisi	78
BAB V	IMPLEMENTASI.....	80
5.1	Implementasi Perangkat Keras	80
5.2	Validasi model sistem dapat dikendalikan (<i>controlability</i>)	82
5.3	Hasil Penentuan Parameter Kendali LQR Saat Rotasi	83
5.4	Implementasi Kendali <i>Fullstate Feedback</i> LQR JST	84
BAB VI	HASIL DAN PEMBAHASAN	91
6.1	Penentuan Parameter Simulasi dan Model <i>Quadrotor</i>	91
6.1.1	Komponen inersia sistem.....	92
6.1.2	Perhitungan konversi pulsa PWM	93
6.2	Pengujian Kendali Gerak Anti Rotasi.....	97
6.2.1	Pengujian kendali pada sudut <i>roll</i>	98
6.2.2	Pengujian kendali pada sudut <i>pitch</i>	103
6.2.3	Pengujian kendali pada sudut <i>yaw</i>	107
6.3	Pengujian Kendali Gerak Anti Translasi	113
6.3.1	Pengujian kendali pada sumbu <i>x</i>	113
6.3.2	Pengujian kendali pada sumbu <i>y</i>	118
6.3.3	Pengujian kendali pada sumbu <i>z</i>	124
BAB VII	KESIMPULAN DAN SARAN.....	130
7.1	Kesimpulan	130
7.2	Saran	131
DAFTAR PUSTAKA	132
LAMPIRAN	136

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Konfigurasi X (Gupte dan Conrad, 2012)	14
Gambar 3.2 Konfigurasi + (Gupte dan Conrad, 2012)	14
Gambar 3.3 Masukkan kendali <i>quadrotor</i> (García Carrillo et al., 2013).....	15
Gambar 3.4 Blok diagram sistem kendali full state feedback (Ogata, 2010)	26
Gambar 3.5 Arsitektur dasar neuron pada JST(Silva et al., 2017).....	30
Gambar 3.6 Jaringan syaraf lapisan tunggal (Silva et al., 2017).....	31
Gambar 3.7 Jaringan syaraf lapisan banyak (Silva et al., 2017).	31
Gambar 3.8 Fungsi aktivasi (a) biner (b) bipolar (c) sigmoid (Zhang, 2014).....	32
Gambar 3.9 Proses <i>feedforward</i> serta proses backward (Silva et al., 2017).....	34
Gambar 3.10 Gambaran sistem 6-DOF (Starlino, 2009)	37
Gambar 3.11 Arsitektur komunikasi sensor dengan DMP (Nasiri et al., 2010) ...	37
Gambar 3.12 Respon transien sistem kendali (Ogata, 2010)	39
Gambar 4.1 Konfigurasi gerak <i>quadrotor</i> X (García Carrillo et al., 2013)	44
Gambar 4.2 Sistem kendali umum	48
Gambar 4.3 Rancangan sistem kendali <i>quadrotor</i>	51
Gambar 4.4 Bagan alir algoritma metode kendali LQR	60
Gambar 4.5 Sistem kendali <i>full state feedback</i> LQR-JST.....	61
Gambar 4.6 Arsitektur jaringan syaraf tiruan	62
Gambar 4.7 Arsitektur sistem <i>quadrotor</i>	67
Gambar 4.8 Skema rancangan elektronik	69
Gambar 4.9 Diagram alir program utama	71
Gambar 4.10 Bagan alir fungsi <i>setup</i>	72
Gambar 4.11 Diagram alir fungsi penalaan komponen <i>fullstate feedback</i>	73
Gambar 4.12 Diagram alir kendali melayang	74
Gambar 4.13 Diagram kendali penahan ketinggian	74
Gambar 4.14 Diagram alir kendali penahan posisi	75
Gambar 5.1 Mekanik <i>quadrotor</i> tampak atas	81
Gambar 5.2 Mekanik <i>quadrotor</i> tampak samping	81
Gambar 5.3 Susunan komponen pada papan elektronis.....	82
Gambar 5.4 Kode program mencari <i>controlability</i>	83
Gambar 5.5 Kode program penentuan parameter kendali	83
Gambar 5.6 Kode program inisialisasi <i>node</i> Jaringan	85
Gambar 5.7 Kode program buka data bobot	85
Gambar 5.8 Kode program menyimpan data bobot	86
Gambar 5.9 Kode program inisialisasi <i>node</i> masukkan.....	87
Gambar 5.10 Kode program menghitung <i>node</i> tersembunyi	87
Gambar 5.11 Kode program fungsi aktivasi	87
Gambar 5.12 Kode program pencarian bobot	88
Gambar 5.13 Kode program keluaran JST untuk kendali	88
Gambar 5.14 Kode program kendali <i>fullstate feedback</i>	89
Gambar 5.15 Kode program konversi nilai putaran motor	89
Gambar 5.16 Kode program sinyal keluaran masing- masing motor	90
Gambar 6.1 Respon simulasi pada sudut <i>roll</i>	99
Gambar 6.2 Grafik uji sudut <i>roll</i>	99

Gambar 6.3 Grafik perubahan nilai $K\phi$ terhadap waktu.....	100
Gambar 6.4 Respon simulasi pada sudut <i>pitch</i>	104
Gambar 6.5 Grafik uji sudut <i>pitch</i>	104
Gambar 6.6 Grafik perubahan nilai $K\theta$ terhadap waktu	105
Gambar 6.7 Respon simulasi pada sudut <i>yaw</i>	108
Gambar 6.8 Grafik uji sudut <i>yaw</i>	110
Gambar 6.9 Grafik perubahan nilai $K\psi$ terhadap waktu	111
Gambar 6.10 Respon pada sumbu x	114
Gambar 6.11 Grafik uji sumbu x	114
Gambar 6.12 Grafik perbandingan gerak sumbu x tanpa gangguan.....	115
Gambar 6.13 Grafik perubahan konstanta nilai Kx	116
Gambar 6.14 Respon pada sumbu y	119
Gambar 6.15 Grafik uji sumbu y	120
Gambar 6.16 Grafik perbandingan gerak sumbu y tanpa gangguan.....	121
Gambar 6.17 Grafik perubahan konstanta nilai Ky	122
Gambar 6.18 Respon pada sumbu z	125
Gambar 6.19 Grafik uji Sumbu z	126
Gambar 6.20 Grafik perbandingan gerak Sumbu z tanpa gangguan	127
Gambar 6.21 Grafik perubahan konstanta nilai Kz	127

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Korelasi penelitian	11
Tabel 3.1 Tabel persamaan momen inersia (Hibbeler, 2016)	22
Tabel 4.1 Tahapan penelitian	41
Tabel 4.2 Rencana pengujian sistem	79
Tabel 6.1 Dimensi komponen	92
Tabel 6.2 Massa dan bentuk jenis komponen	92
Tabel 6.3 Momen inersia komponen	93
Tabel 6.4 Hubungan PWM, kecepatan rotasi, gaya angkat dan torsi rotor	94
Tabel 6.5 Nilai konstanta b dan k	97
Tabel 6.6 Konversi nilai $Q\phi$ dan $Q\omega\phi$ ke nilai gain $K\phi$ dan $K\omega\phi$	98
Tabel 6.7 Hasil uji respon sudut <i>roll</i>	100
Tabel 6.8 Konversi nilai $Q\theta$ dan $Q\omega\theta$ ke nilai gain $K\theta$ dan $K\omega\theta$	103
Tabel 6.9 Hasil uji respon sudut <i>pitch</i>	106
Tabel 6.10 Konversi nilai $Q\psi$ dan $Q\omega\psi$ ke nilai <i>gain</i> $K\psi$ dan $K\omega\psi$	108
Tabel 6.11 Hasil uji respon sudut <i>yaw</i>	110
Tabel 6.12 Konversi nilai Qx dan Qvx ke nilai <i>gain</i> Kx dan Kvx	113
Tabel 6.13 Respon sumbu x	115
Tabel 6.14 Konversi nilai Qy dan Qvy ke nilai <i>gain</i> Ky dan Kvy	119
Tabel 6.15 Respon sumbu y	120
Tabel 6.16 Konversi nilai Qz dan Qvz ke nilai <i>gain</i> Kz dan Kvz	124
Tabel 6.17 Hasil uji respon sumbu z	126

DAFTAR SIMBOL

M_i	: Motor ke- i , di mana $i = 1,2,3,4$.
F_i	: Gaya angkat motor ke- i , di mana $i = 1,2,3,4$.
b	: Konstanta gaya dorong dari baling- baling.
ω_i	: Kecepatan putar baling- baling ke- i , di mana $i = 1,2,3,4$.
\dot{v}	: Turunan pertama dari kecepatan v .
\mathbf{F}	: Gaya dorong.
F_T	: Gaya dorong total.
0R_B	: Koordinat frame bumi.
g	: Kecepatan gravitasi bumi.
τ_x	: Torsi sumbu x .
τ_y	: Torsi sumbu y .
τ_z	: Torsi sumbu z .
k	: Konstanta <i>drag</i> .
l	: Jari-jari <i>quadrotor</i> .
ϕ	: Sudut <i>roll</i> .
θ	: Sudut <i>pitch</i> .
ψ	: Sudut <i>yaw</i> .
ω_ϕ	: Kecepatan sudut <i>roll</i> .
ω_θ	: Kecepatan sudut <i>pitch</i> .
ω_ψ	: Kecepatan sudut <i>yaw</i> .
x	: Sumbu x .
y	: Sumbu y .
z	: Sumbu z .
v_x	: Kecepatan linier sumbu x .
v_y	: Kecepatan linier sumbu y .
v_z	: Kecepatan linier sumbu z .
$\mathbf{R}(\phi, \theta, \psi)$: Matriks rotasi <i>roll</i> , <i>pitch</i> , dan <i>yaw</i> .
τ_ϕ	: Torsi <i>roll</i> .
τ_θ	: Torsi <i>pitch</i> .
τ_ψ	: Torsi <i>yaw</i> .
τ_i	: Torsi motor ke- i , dimana $i = 1,2,3,4$.
u_1	: F_T
u_2	: τ_ϕ
u_3	: τ_θ
u_4	: τ_ψ
\mathbf{A}_τ	: Matriks yang berisi konstanta gaya angkat rotor.
\mathbf{A}_τ^{-1}	: Invers matriks \mathbf{A}_τ .
m	: Massa.
\mathbf{a}	: Percepatan.
\ddot{x}	: Percepatan sumbu x .
\ddot{y}	: Percepatan sumbu y .

\ddot{z}	: Percepatan sumbu z .
α	: Vektor percepatan sudut.
r	: Jari- jari <i>quadroto</i> .
\mathbf{I}	: Matriks momen inersia pada titik pusat massa.
I_{xx}	: Momen inersia mengelilingi sumbu x bodi.
I_{yy}	: Momen inersia mengelilingi sumbu y bodi.
I_{zz}	: Momen inersia mengelilingi sumbu z bodi.
$\ddot{\phi}$: Percepatan sudut <i>roll</i> .
$\ddot{\theta}$: Percepatan sudut <i>pitch</i> .
$\ddot{\psi}$: Percepatan sudut <i>yaw</i> .
F_x	: Gaya sepanjang sumbu x .
F_y	: Gaya sepanjang angkat sumbu y .
F_z	: Gaya sepanjang angkat sumbu z .
I_{Gxx}	: Momen inersia mengelilingi sumbu x pada setiap komponen.
I_{Gyy}	: Momen inersia mengelilingi sumbu y pada setiap komponen.
I_{Gzz}	: Momen inersia mengelilingi sumbu z pada setiap komponen.
\mathbf{x}	: Variabel <i>state</i> $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, di mana n jumlah <i>state</i> .
$\dot{\mathbf{x}}$: Turunan pertama variabel <i>state</i> terhadap waktu.
\mathbf{x}^{ref}	: Referensi <i>state</i> atau nilai <i>state</i> yang diinginkan.
\mathbf{y}	: Luaran dari sistem $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ di mana m jumlah luaran.
\mathbf{u}	: Masukan dari proses $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$ di mana r jumlah dari masukan.
\mathbf{A}	: Matriks keadaan (<i>state</i>) pada <i>state space</i> , dengan ukuran $n \times n$ di mana n adalah jumlah dari variabel <i>state</i> .
\mathbf{B}	: Matriks masukan pada persamaan <i>state space</i> , dengan ukuran $n \times m$ di mana n adalah jumlah dari variabel <i>state</i> dan m adalah jumlah dari masukan proses.
\mathbf{C}	: Matriks luaran pada persamaan <i>state space</i> , dengan ukuran $o \times n$ di mana o adalah jumlah dari luaran sistem dan n adalah jumlah dari variabel <i>state</i> .
\mathbf{D}	: Matriks transmisi langsung dari masukan ke luaran pada persamaan <i>state space</i> , dengan ukuran $o \times m$, di mana o adalah jumlah dari luaran sistem dan m adalah jumlah dari masukan proses.
\mathbf{K}	: Matriks fullstate feedback gain dengan ukuran $n \times m$, di mana n adalah jumlah dari masukan proses dan m adalah jumlah dari variabel <i>state</i> .
\mathbf{Q}	: Matriks bobot <i>state</i> sebagai luaran proses yang berupa matriks semidefinit positif dengan ukuran $n \times n$, di mana n adalah jumlah dari variabel <i>state</i> .
\mathbf{R}	: Matriks bobot masukan proses yang berupa matriks definit positif dengan ukuran $r \times r$, di mana r adalah jumlah dari masukan proses.
J	: <i>Cost function</i> (indeks kinerja) LQR.

\mathbf{P}	: Matriks persamaan Riccati yang digunakan untuk menentukan <i>fullstate feedback gain</i> \mathbf{K} .
t_0	: Waktu awal.
t_∞	: Waktu akhir.
x'_i	: Nilai <i>node input layer</i> ke- i yang telah teraktivasi, di mana $i = 1, 2, \dots, 12$.
x''_j	: Nilai <i>node hidden layer</i> ke- j yang telah teraktivasi, di mana $j = 1, 2, \dots, 48$.
x'''_h	: Nilai <i>node output layer</i> ke- h yang telah teraktivasi, di mana $h = 1$ dan merupakan keluaran jaringan syaraf tiruan.
u'_i	: Nilai <i>node input layer</i> ke- i yang belum teraktivasi, di mana $i = 1, 2, \dots, 12$.
u''_j	: Nilai <i>node hidden layer</i> ke- j yang belum teraktivasi, di mana $j = 1, 2, \dots, 48$.
u'''_h	: Nilai <i>node output layer</i> ke- h yang belum teraktivasi, di mana $h = 1$.
\mathbf{w}	: Nilai bobot jaringan antara <i>node input</i> ke- i ke <i>node hidden</i> ke- j .
\mathbf{w}_{h1}	: Nilai bobot jaringan antara <i>node hidden</i> ke- h ke <i>node output</i> ke-1.
J_{jst}	: <i>Cost function</i> (indeks kinerja) JST.
$\mathbf{y}^{(n)}$: Matriks keluaran sistem <i>state</i> ke- n , di mana $n = 1, 2, \dots, 12$.
$\mathbf{X}_{ref}^{(n)}$: Referensi <i>state</i> atau nilai <i>state</i> ke- n yang diinginkan, di mana $n = 1, 2, \dots, 12$.
η	: Nilai <i>learning rate</i> jaringan syaraf tiruan.
PWM	: Nilai sinyal masukkan ESC.
m_{PWM}	: Nilai koefisien orde tertinggi yang menghubungkan antara kecepatan rotasi dengan perubahan PWM.
m_{Fi}	: Nilai koefisien orde tertinggi yang menghubungkan antara gaya angkat dengan perubahan PWM.
τ_{Mi}	: Torsi motor ke- i , di mana $i = 1, 2, 3, 4$.
m_τ	: Nilai koefisien orde tertinggi yang menghubungkan antara torsi dengan perubahan PWM.