

**PRINSIP DAN PERKEMBANGAN
SELF TUNING ADAPTIVE CONTROL**

Lerry Alen Christian Sitorus

Email : larryalenchristian@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Prof. drg. Suria Sumantri, MPH 65

Bandung 40164, Indonesia

ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas teknik kontrol adaptif secara umum. Pembahasan dimulai dengan penjabaran berbagai masalah yang sering dihadapi dan seringkali tidak mampu ditangani oleh sistem kontrol klasik, sehingga memunculkan gagasan untuk menciptakan sebuah teknik kontrol baru yang lebih handal. Pembahasan mengenai latar belakang munculnya kontrol adaptif tersebut diikuti dengan penjelasan secara umum mengenai pengertian, konsep dasar, dan struktur dari kontrol adaptif. Pembahasan juga meliputi penjelasan tentang aplikasi, pengembangan, dan algoritma-algoritma yang berhubungan dengan kontrol adaptif.

Berdasarkan struktur yang umum digunakan, teknik kontrol adaptif terdiri atas dua struktur utama, yaitu *model reference adaptive control* dan *self tuning adaptive control*. Dalam tugas akhir ini, pembahasan difokuskan pada teknik *self tuning adaptive control*. Pembahasan mengenai *self tuning adaptive control* meliputi identifikasi sistem dan desain pengontrol yang digunakan dalam membangun sebuah *self tuning adaptive control system*.

Algoritma identifikasi sistem yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah algoritma *recursive least squares*. Dalam pembahasannya, algoritma *recursive least squares* dijabarkan untuk mengestimasi sebuah *plant* diskrit. Sedangkan algoritma desain pengontrol yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah algoritma *pole placement*.

Pada bagian simulasi, disimulasikan sistem kontrol adaptif dengan metode *self tuning adaptive control* dan sistem kontrol tidak adaptif dalam mengontrol *plant*

berupa pesawat terbang. Selain itu, digunakan juga sebuah *multi-model adaptive control system* untuk mengontrol pesawat terbang tersebut. Pesawat terbang yang digunakan dalam simulasi ini, dibangun berdasarkan sebuah sistem fisik pesawat terbang komersil.

Lebih dalam, *plant* pesawat terbang yang digunakan dalam simulasi akan dimodelkan dalam beberapa kondisi operasi. Model-model pesawat terbang dalam beberapa kondisi operasi ini akan menghasilkan dinamika *plant* yang berbeda-beda dan harus dikontrol. Hasil dari simulasi ini digunakan untuk menganalisa performansi masing-masing sistem kontrol dalam mengontrol *plant* yang berkarakteristik kompleks dan dinamik. Selain itu, analisa juga akan dilakukan pada respon transien masing-masing sistem kontrol dalam mengontrol *plant* tersebut.

Dalam simulasi *self tuning adaptive control system* ini, sistem terdiri atas sebuah *estimator*, *adaptive controller*, dan *controller design*. Sedangkan dalam simulasi *multi model adaptive control system*, sistem terdiri atas sebuah *estimator*, *adaptive controller*, *controller design*, *supervisor*, dan beberapa *fixed controller*. *Estimator* dibangun berdasarkan algoritma *recursive least squares*, sedangkan *controller design* dibangun berdasarkan algoritma *pole placement*.

Berdasarkan hasil simulasi, *self tuning adaptive control system* terbukti mampu memberikan performansi yang diinginkan dalam mengontrol *plant* pesawat terbang yang berkarakteristik kompleks. Selain itu, dapat dibuktikan juga bahwa performansi dari respon transien *self tuning adaptive control system* yang lambat dapat ditingkatkan dengan menggunakan *multi model adaptive control system*.

Kata kunci: *Model reference adaptive control*, *self tuning adaptive control estimator*, *adaptive controller*, *controller design*, *supervisor*, dan *fixed controller*.

PRINCIPLE AND DEVELOPMENT OF SELF TUNING ADAPTIVE CONTROL

Lerry Alen Christian Sitorus

Email : larryalenchristian@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Prof. drg. Suria Sumantri, MPH 65

Bandung 40164, Indonesia

ABSTRACT

This final project study about adaptive control method. The study starting with explanation of problems that classic control system always face and unable to solve, which rise idea to create a new technique that more reliable. Explanations about background of adaptive control consists of general explanation about meaning, principle, and structure of adaptive control are discussed. This explanation also include explanation about application, development, and algorithms that related with adaptive control.

Based on its structure, adaptive control technique consist of two main structures, there are model reference adaptive control and self tuning adaptive control. In this final project, explanation of adaptive control structure is focus on self tuning adaptive control technique. Explanation about self tuning adaptive control consist of system identification and control design algorithms that is used in the development of a self tuning adaptive control system.

This final project study about recursive least squares algorithms as one of system identification algorithms. Explanation about recursive least squares algorithms gives information how recursive least squares estimate a discrete plant. Whereas control design algorithms that is explained in this final project is pole placement algorithms.

In simulation chapter, simulations of adaptive control system with self tuning adaptive control method and nonadaptive control system that used to control

aircraft plants are designed. Multi-model adaptive control system also used to control aircraft plants. Aircraft plants that used in this simulation are build based on physical system of commercial aircraft with several assumptions.

Furthermore, aircraft plants that used in this simulation are build in various operation conditions. Aircraft models in various operation condition will perform dynamics or changes of plant's conditions. Results from this simulation are used to analyze each control system's performance in term of control plants that have complex and dynamics characteristics. Analysis also on transien response of each control system in term of control that's plants.

In simulation of self tuning adaptive control system, system consist of an estimator, an adaptive controller, and a controller design. Whereas in simulation of multi model adaptive control system, system consist of an estimator, an adaptive controller, a controller design, some fixed controllers, and a supervisor. Estimator that used in in this simulation is build based on recursive least squares algorithms. Whereas controller design that used in in this simulation is build based on pole placement algorithms.

Based on simulation results, self tuning adaptive control system proved can gives desired performance for control aircraft plant that has complex characteristics. Beside that, it can be proved also that performance of transien respon of adaptive controller systems that are slow to be improved by use multi model adaptive control system.

Key Word: Model reference adaptive control, self tuning adaptive control estimator, adaptive controller, controller design, supervisor, and fixed controller.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.1.1 Variasi Pada Karakteristik <i>Plant</i>	2
1.1.1.1 Aktuator Nonlinier	3
1.1.1.2 Kontrol Penerbangan	6
1.1.2 Variasi Pada Karakteristik Gangguan	9
1.2 Identifikasi Masalah	13
1.3 Rumusan Masalah	14
1.4 Tujuan	14
1.5 Batasan Masalah	15
1.6 Sistematika Penulisan	16
BAB II DASAR TEORI	18
2.1 Kontrol Adaptif	18
2.2 Identifikasi Sistem	26

2.2.1 Prinsip Identifikasi Sistem	26
2.2.2 Algoritma-algoritma Estimasi Parameter	32
2.2.2.1 Algoritma Gradien	33
2.2.2.2 Algoritma <i>Recursive Least Squares</i>	39
2.3 Disain Kontrol	44
2.3.1 Disain Kontrol <i>Pole Placement</i>	45
2.3.1.1 Model Proses	45
2.3.1.2 <i>Model Following</i>	49
2.3.1.3 Kondisi Kausalitas	51
2.3.1.4 <i>Minimum Degree Pole Placement</i>	52
2.3.1.5 Hubungan Algoritma <i>Pole Placement</i> dengan <i>Model Following</i> .	54
2.3 Kontrol Adaptif dengan <i>Multiple Model</i> dan <i>Switching</i>	56
BAB III PEMODELAN SISTEM	63
3.1 Pemodelan Pesawat Terbang	63
3.2 Model Pesawat Terbang	65
3.2.1 Fungsi Transfer Model Pesawat Terbang (Domain Waktu Kontinyu) .	68
3.2.2 Analisa Karakteristik Model Pesawat Terbang	70
3.2.3 Fungsi Transfer Model Pesawat Terbang (Domain Waktu Diskrit).....	73
3.3 Pemodelan Dinamika Pada Pesawat Terbang	78
3.4 Analisa Model Dinamika Pada Pesawat Terbang	85
BAB IV SIMULASI DAN ANALISA	91
4.1 Percobaan I	91
4.1.1 Analisa Hasil Estimasi Parameter	92

4.1.2 Analisa Keluaran Sistem Kontrol	104
4.1.3 Analisa Sinyal Kontrol.....	112
4.1.4 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol	115
4.2 Percobaan II.....	120
4.2.1 Analisa Keluaran sistem Kontrol.....	122
4.2.2 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol	127
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	134
5.1 Kesimpulan.....	134
5.2 Saran	135
DAFTAR PUSTAKA	136

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Parameter-parameter Pesawat Terbang dalam Kondisi Terbang yang Berbeda	8
Tabel 2.1	Perbandingan Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Umpan Balik	20
Tabel 3.1	Fungsi Transfer Model Pesawat Terbang dalam Domain Waktu Kontinyu.....	83
Tabel 3.2	Fungsi Transfer Model Pesawat Terbang dalam Domain Waktu Diskrit.....	84
Tabel 4.1	Hasil Estimasi Variabel Pembilang.....	93
Tabel 4.2	Hasil Estimasi Variabel Penyebut	94
Tabel 4.3	Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tetap	116
Tabel 4.4	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dengan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i>	128
Tabel D.1	Fungsi Transfer Pengontrol Tidak Adaptif dalam Percobaan I	D-8
Tabel D.2	Fungsi Transfer Pengontrol Adaptif dalam Percobaan I	D-8
Tabel D.3	Fungsi Transfer Pengontrol Tidak Adaptif dalam Percobaan II	D-9
Tabel D.4	Fungsi Transfer Pengontrol Adaptif dalam Percobaan II	D-9

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Blok Sebuah Kontrol Lup Katup Nonlinier	4
Gambar 1.2	Respon Step dari Kontrol PI pada Sistem Katup Sederhana.....	5
Gambar 1.3	Skematik Pesawat Terbang	6
Gambar 1.4	Diagram Blok Sistem dengan Gangguan	10
Gambar 1.5	Perbandingan Keluaran pada Kondisi Operasi Berbeda	10
Gambar 2.1	Sistem Kontrol Berdasarkan Model Referensi.....	18
Gambar 2.2	Struktur Kontrol Adaptif Berdasarkan Skema Adaptasi	19
Gambar 2.3	Sistem Kontrol Adaptif Lup Terbuka.....	21
Gambar 2.4	Sistem Kontrol Adaptif Tidak Langsung	21
Gambar 2.5	Sistem Kontrol Adaptif Langsung.....	22
Gambar 2.6	Suspensi Aktif	24
Gambar 2.7	Pesawat GTM T2	25
Gambar 2.8	Pesawat Tempur F-16.....	25
Gambar 2.9	Metodologi Identifikasi Sistem	27
Gambar 2.10	Metodologi Identifikasi Klasik.....	28
Gambar 2.11	Prinsip Estimasi Parameter Model	29
Gambar 2.12	Prinsip Metode Gradien	35
Gambar 2.13	Interpretasi Geometri Algoritma Adaptasi Gradien	37
Gambar 2.14	Perubahan Algoritma Adaptasi dari Tipe Gradien.....	40
Gambar 2.15	Sebuah Pengontrol Linier dengan Dua Derajat Kebebasan	47
Gambar 2.16	Representasi <i>Model-Following</i> Berdasarkan Keluaran Umpan Balik	55
Gambar 2.17	Diagram Blok <i>Classical Multimodel Adaptive Control</i>	58
Gambar 2.18	Diagram Blok <i>Robust Multimodel Adaptive Control</i>	59
Gambar 2.19	Diagram Blok <i>Multimodel Adaptive Control with Switching</i>	60
Gambar 2.20	Diagram Blok <i>Multimodel Adaptive Control with Switching and Tuning</i>	61

Gambar 3.1	Osilasi Waktu Singkat.....	64
Gambar 3.2	Osilasi <i>Phogoid</i>	64
Gambar 3.3	Sumbu Koordinat dan Gaya yang Bekerja pada Pesawat Terbang	65
Gambar 3.4	Respon Lup Terbuka Model Pesawat Terbang	70
Gambar 3.5	Respon Lup Tertutup Model Pesawat Terbang.....	70
Gambar 3.6	Diagram Bode Sistem Lup Terbuka Model Pesawat Terbang	71
Gambar 3.7	<i>Root-Locus</i> Sistem Lup Tertutup Model Pesawat Terbang	72
Gambar 3.8	Perbandingan Respon Lup Terbuka Model Diskrit dan Model Kontinyu Pesawat Terbang	74
Gambar 3.9	Perbandingan Respon Lup Tertutup Model Diskrit dan Model Kontrol Pesawat Terbang.....	74
Gambar 3.10	Perbandingan Respon Lup Terbuka Tiga Model Diskrit dengan Model Kontinyu Pesawat Terbang.....	76
Gambar 3.11	Perbandingan Respon Lup Tertutup Tiga Model Diskrit dengan Model Kontinyu Pesawat Terbang.....	76
Gambar 3.12	Perbandingan Respon Lup Terbuka Empat Model Pesawat Terbang dalam Domain Waktu Kontinyu	87
Gambar 3.13	Perbandingan Respon Lup Tertutup Empat Model Pesawat Terbang dalam Domain Waktu Kontinyu	87
Gambar 3.14	Perbandingan Respon Lup Terbuka Empat Model Pesawat Terbang dalam Domain Waktu Diskrit	89
Gambar 3.15	Perbandingan Respon Lup Tertutup Empat Model Pesawat Terbang dalam Domain Waktu Diskrit	90
Gambar 4.1	Diagram Blok Dinamika Percobaan I	91
Gambar 4.2	Hasil Estimasi Parameter b_0	95
Gambar 4.3	Hasil Estimasi Parameter b_0 ($0 \leq t \leq 0.2$)	95
Gambar 4.4	Hasil Estimasi Parameter b_0 ($49.8 \leq t \leq 50.8$)	95
Gambar 4.5	Hasil Estimasi Parameter b_0 ($74.8 \leq t \leq 75.8$)	96
Gambar 4.6	Hasil Estimasi Parameter b_0 ($99.8 \leq t \leq 100.8$)	96
Gambar 4.7	Hasil Estimasi Parameter b_0 ($124.8 \leq t \leq 125.8$)	96

Gambar 4.8	Hasil Estimasi Parameter a_1	97
Gambar 4.9	Hasil Estimasi Parameter a_1 ($0 \leq t \leq 0.2$)	97
Gambar 4.10	Hasil Estimasi Parameter a_1 ($49.8 \leq t \leq 50.8$)	97
Gambar 4.11	Hasil Estimasi Parameter a_1 ($74.8 \leq t \leq 75.8$)	98
Gambar 4.12	Hasil Estimasi Parameter a_1 ($99.8 \leq t \leq 100.8$)	98
Gambar 4.13	Hasil Estimasi Parameter a_1 ($124.8 \leq t \leq 125.8$)	98
Gambar 4.14	Hasil Estimasi Parameter a_2	99
Gambar 4.15	Hasil Estimasi Parameter a_2 ($0 \leq t \leq 0.2$)	99
Gambar 4.16	Hasil Estimasi Parameter a_2 ($49.8 \leq t \leq 50.8$)	99
Gambar 4.17	Hasil Estimasi Parameter a_2 ($74.8 \leq t \leq 75.8$)	100
Gambar 4.18	Hasil Estimasi Parameter a_2 ($99.8 \leq t \leq 100.8$)	100
Gambar 4.19	Hasil Estimasi Parameter a_2 ($124.8 \leq t \leq 125.8$)	100
Gambar 4.20	Hasil Estimasi Parameter b_1	101
Gambar 4.21	Hasil Estimasi Parameter b_2	101
Gambar 4.22	Hasil Estimasi Parameter a_3	101
Gambar 4.23	Respon Lup Terbuka <i>Plant</i> Pesawat Terbang	104
Gambar 4.24	Respon Sistem Kontrol Tidak Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang	105
Gambar 4.25	Respon Sistem Kontrol Tidak Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($0 \leq t \leq 125$)	106
Gambar 4.26	Respon Sistem Kontrol Tidak Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($125 \leq t \leq 150$)	107
Gambar 4.27	Respon Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang	108
Gambar 4.28	Respon Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($0 \leq t \leq 5$)	109
Gambar 4.29	Respon Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($48 \leq t \leq 56$)	110
Gambar 4.30	Respon Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($74 \leq t \leq 80$)	110
Gambar 4.31	Respon Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($99 \leq t \leq 103$)	111

Gambar 4.32 Respon Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang ($124 \leq t \leq 127$).....	112
Gambar 4.33 Sinyal Kontrol Pengontrol Adaptif	112
Gambar 4.34 Sinyal Kontrol Pengontrol Adaptif Pada Kondisi Operasi A.....	113
Gambar 4.35 Sinyal Kontrol Pengontrol Adaptif Pada Kondisi Operasi F	113
Gambar 4.36 Sinyal Kontrol Pengontrol Adaptif Pada Kondisi Operasi H.....	114
Gambar 4.37 Sinyal Kontrol Pengontrol Adaptif Pada Kondisi Operasi I.....	114
Gambar 4.38 Sinyal Kontrol Pengontrol Adaptif Pada Kondisi Operasi J.....	115
Gambar 4.39 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tidak Adaptif.....	116
Gambar 4.40 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tidak Adaptif ($0 \leq t \leq 5$).....	117
Gambar 4.41 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tidak Adaptif ($49 \leq t \leq 54$)	118
Gambar 4.42 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tidak Adaptif ($74 \leq t \leq 78$)	119
Gambar 4.43 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tidak Adaptif ($99 \leq t \leq 102$)	119
Gambar 4.44 Perbandingan Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif dengan Sistem Kontrol Tidak Adaptif ($124 \leq t \leq 127$)	120
Gambar 4.45 Diagram Blok Dinamika Percobaan II	121
Gambar 4.46 Respon Lup Terbuka <i>Plant</i> Pesawat Terbang dalam Tujuh Kondisi Operasi	122
Gambar 4.47 Respon Keluaran Sistem Kontrol Tidak Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang dalam Tujuh Kondisi Operasi.....	123
Gambar 4.48 Respon Keluaran Sistem Kontrol Tidak Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang dalam Tujuh Kondisi Operasi ($0 \leq t \leq 240$)	124
Gambar 4.49 Respon Keluaran Sistem Kontrol Tidak Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang dalam Tujuh Kondisi Operasi ($240 \leq t \leq 350$)	124

Gambar 4.50	Respon Keluaran Sistem Kontrol Adaptif Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang dalam Tujuh Kondisi Operasi	125
Gambar 4.51	Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> Pada <i>Plant</i> Pesawat Terbang dalam Tujuh Kondisi Operasi	126
Gambar 4.52	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i>	127
Gambar 4.53	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($0 \leq t \leq 5$) ...	129
Gambar 4.54	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($79 \leq t \leq 82$)	130
Gambar 4.55	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($119 \leq t \leq 122$)	130
Gambar 4.56	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($160 \leq t \leq 178$)	131
Gambar 4.57	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($199 \leq t \leq 202$)	132
Gambar 4.58	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($239 \leq t \leq 242$)	133
Gambar 4.59	Perbandingan Respon Keluaran Sistem <i>Multi Model Adaptive Control</i> dan Sistem <i>Self Tuning Adaptive Control</i> ($279 \leq t \leq 284$)	133
Gambar C.1	Diagram Skematik <i>Self Tuning Adaptive Control System</i> dalam Percobaan I	C-1
Gambar C.2	Diagram Skematik Sistem Kontrol Tetap dalam Percobaan I	C-1
Gambar C.3	Diagram Skematik <i>Switch</i> dalam Percobaan I.....	C-1
Gambar C.4	Diagram Skematik <i>Plants</i> dalam Percobaan I	C-2

Gambar C.5	Diagram Skematik <i>Multi Model Adaptive Control System</i> dalam Percobaan II	C-2
Gambar C.6	Diagram Skematik <i>Self Tuning Adaptive Control System</i> dalam Percobaan II.	C-3
Gambar C.7	Diagram Skematik <i>Switch</i> dalam Percobaan II.	C-3
Gambar C.8	Diagram Skematik <i>Controller</i> dalam Percobaan II	C-3
Gambar C.9	Diagram Skematik <i>Plants</i> dalam Percobaan II.....	C-4
Gambar C.10	Diagram Skematik Model <i>Plants</i> dalam Percobaan II	C-4
Gambar C.11	Diagram Skematik <i>Supervisor</i> dalam Percobaan II.....	C-5
Gambar D.1	Diagram Bode Sistem Lup Terbuka Model Pesawat Terbang	D-1
Gambar D.2	<i>Root-Locus</i> Sistem Lup Tertutup Model Pesawat Terbang.....	D-2
Gambar D.3	<i>Root-Locus</i> Sistem Lup Tertutup Model Pesawat Terbang Diinginkan	D-3

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

MATRIKS LEMMA..... A-1

LAMPIRAN B

VARIABEL MODEL PESAWAT TERBANG B-1

LAMPIRAN C

MODEL SIMULINK..... C-1

LAMPIRAN D

DISAIN KONTROL..... D-1