UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PENGEMBANGAN ALGORITMA *INERTIAL NAVIGATION SYSTEM* UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN

Oleh:

Romi Wiryadinata

UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA
2015

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PENGEMBANGAN ALGORITMA *INERTIAL NAVIGATION SYSTEM* UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN

Disertasi untuk memperoleh
derajat Doktor dalam Ilmu Teknik Elektro pada
Universitas Gadjah Mada

Dipertahankan di hadapan
Dewan Penguji Program Pascasarjana
Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Pada tanggal: 16 Juni 2015

Oleh
Romi Wiryadinata

Lahir
Di Serang-Banten

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

HALAMAN PERSETUJUAN

Tim Promotor menyetujui laporan disertasi:

Nama : **Romi Wiryadinata**
NIM : **08/274896/STK/00199**
Judul : **Pengembangan Algoritma *Inertial Navigation System* untuk Uji Peluncuran Roket Kendali Lapan**

yang telah diperbaiki sesuai saran dari Tim Penguji Ujian Tertutup

Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D.
Promotor,
Tanggal 21 Mei 2015

Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU.
Ko-promotor I,
Tanggal 19 Mei 2015

Prof. Ir. Sunarno, M.Eng., Ph.D.
Ko-promotor II,
Tanggal 21 Mei 2015

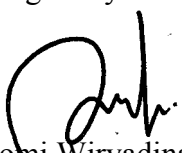
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PERNYATAAN PROMOVENDUS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Disertasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka

Yogyakarta, 19 Juni 2015

Yang menyatakan



Romi Wiryadinata

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

KATA PENGANTAR

Puji Syukur alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT., karena hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya tulisan berbentuk disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik. Disertasi berjudul "**Pengembangan Algoritma INS untuk Uji Peluncuran Roket Kendali LAPAN**" dibuat sebagai syarat untuk dapat mencapai gelar Doktor pada Program Studi Ilmu-ilmu Teknik Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Terwujudnya tulisan ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. sebagai Promotor yang telah banyak memberikan bimbingan dan kontribusi sampai naskah disertasi ini selesai menggantikan Prof. Dr. Ir. Th. Sri Widodo, DEA., (Alm).
2. Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. sebagai Ko-promotor I yang banyak memberikan ide dan kontribusi pada tahap pengembangan *hardware*, *software*, dan maupun teknik-teknik penelitian selama magang di LAPAN.
3. Prof. Ir. Sunarno. M.Eng., Ph.D. sebagai Ko-promotor II, Kajur Jurusan Teknik Fisika, dan Ka.Lab SSTK yang telah memberikan banyak bimbingan, saran, dan ilmu praktis selama magang di lab Sensor dan Sistem Telekontrol.
4. Kedua orang tuaku H. Abdul Mukti, S.E. dan Hj. Marhumah (Alm), yang telah mendidik dan banyak memberikan arti hidup beragama, disiplin, selalu menanamkan kejujuran, dan haus ilmu pengetahuan.
5. Adik-adik ku tersayang, Istri dan anak ku tercinta, Ibu Hj. Nur'aini, Keluarga besar H. Yusuf (Rio Panjak) dan keluarga besar H. Markusen yang selalu memberikan do'a dan motivasi hingga saat ini.
6. Lab. Kendali dan Telemetri, PUSTEKROKET-LAPAN; SINKEN *Research Group,* T. Elektro, FT-UNTIRTA; Lab. SSTK, T. Fisika, FT-UGM, Lab. PIT, Lab. KSC, Lab. Telekomunikasi, FTI-UII; Keluarga besar program pascasarjana JTETI dan FT-UGM.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

7. Semua pihak yang telah ikut membantu memberikan masukan dan dukungan pada penulisan disertasi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Harapan penulis, semoga tulisan ini dapat memberikan sumbangan pemikiran bagi perkembangan ilmu pengentahuan dan dapat bermanfaat bagi masyarakat dan negara khususnya bidang peroketan nasional.

Akhir kata, penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan bidang ilmu yang penulis dalami.

Yogyakarta, 19 Juni 2015

Penulis

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

Halaman Judul i
Halaman setelah halaman judul ii
Halaman Persetujuan iii
Pernyataan Promovendus iv
Kata Pengantar v
Daftar Isi vii
Daftar Tabel ix
Daftar Gambar x
Daftar Istilah xiii
Daftar Variabel xv
Intisari xviii
Abstract xix
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan dan Batasan Masalah 7
1.3 Keaslian Penelitian 7
1.4 Tujuan Penelitian 8
1.5 Manfaat Penelitian 8
1.6 Sistematika Penulisan 9
BAB II DASAR TEORI **10**
2.1 Tinjauan Pustaka 10
2.2 Dasar Teori 14
2.2.1 IMU (*Inertial Measurement Unit*) 14
2.2.2 Mekanika terbang wahana udara 18
2.2.2.1 Tata acuan koordinat (*reference/coordinat frame*) 19
2.2.2.2 Matriks transformasi koordinat 21
2.2.3 INS (*Inertial Navigation System*) 23
2.2.3.1 Sistem *gimbaled* 25
2.2.3.2 Sistem *strapdown* 27

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.2.3.3 Persamaan navigasi 29
2.2.4 Sistem roket 36
2.3 Hipotesis 37
BAB III METODE PENELITIAN 38
3.1 Populasi dan Sampel 38
3.2 Variabel Penelitian 39
3.3 Alat dan Instrumen Penelitian 40
3.4 Prosedur Pengambilan Data 41
3.4.1 Pra pengembangan algoritma 41
3.4.2 Algoritma *strapdown inertial navigation system* 45
3.4.2.1 Perhitungan sumbu rotasi algoritma INS 45
3.4.2.2 Metode μ_e-*Euler* (*threshold-Euler*) 46
3.4.2.3 Perhitungan sumbu translasi algoritma INS 48
3.4.3 Simulasi dan pengujian algoritma SINS metode μ_e-*Euler* 50
3.5 Prosedur Analisis Data 51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 52
4.1 Pengujian Sensor 52
4.2 Simulasi Algoritma INS 58
4.3 Pengujian Algoritma INS dengan Kendaraan 74
4.4 Pengujian Algoritma INS dengan Data Peluncuran RWX200 LAPAN 88
4.5 Ringkasan Hasil Pengujian 94
4.6 Catatan Khusus 97
BAB V KESIMPULAN 98
5.1 Kesimpulan 98
5.2 Saran 99
Lampiran A Program Membaca dan Menggabungkan IMU-GPS A-1
Lampiran B Program Membaca Data Melalui *Serial Port* B-1
Lampiran C Program Algoritma INS C-1
Lampiran D GPS (*Global Positioning System*) D-1
Lampiran E Sistem Roket E-1
Lampiran F Blok *Simulink* Metode *Euler* dan *Quaternion* F-1
Lampiran G Perancangan *Hardware* dan Dokumentasi Percobaan G-1

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Nomor dan Judul Tabel	**Halaman**
Tabel 1.1 Perkembangan penelitian yang sudah ada	5
Tabel 2.1 Simbol dan notasi sistem TAK (Tata Acuan Koordinat)	21
Tabel 2.2 Kelebihan dan kekurangan antara IMU/INS dengan GPS	25
Tabel 4.1 Hasil koreksi kesalahan *rate-gyroscope* dengan pendulum	54
Tabel 4.2 Hasil pengujian *accelerometer* pada lintasan datar dan lurus	58
Tabel 4.3 Nilai perubahan sebelum dan sesudah modifikasi metode *Euler*	67
Tabel 4.4 Nilai perbandingan ketiga metode menggunakan variasi data *input*	71
Tabel 4.5 *Error* TAK navigasi antara metode *Quaternion* dan μ_e-*Euler*	95
Tabel 4.6 Perbandingan waktu komputasi dan *Error* posisi terhadap GPS	95

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Nomor dan judul gambar		Halaman
Gambar 2.1	Pergerakan IMU dengan 6 derajat kebebasan	15
Gambar 2.2	Rotasi benda	16
Gambar 2.3	Pemrosesan data *rate-gyroscope*	17
Gambar 2.4	Dasar sistem navigasi	18
Gambar 2.5	Pembagian tata acuan koordinat (*coordinate frame*)	19
Gambar 2.6	TAK geosentris	20
Gambar 2.7	TAK geodetik	20
Gambar 2.8	TAK benda	21
Gambar 2.9	Diagram blok rangkaian dasar INS	23
Gambar 2.10	Sistem *gimbaled*	25
Gambar 2.11	Diagram blok pengkondisi sinyal pada sistem *gimbal*	26
Gambar 2.12	Sistem *strapdown*	28
Gambar 2.13	Diagram blok pengkondisi sinyal pada sistem *strapdown*	28
Gambar 2.14	Transformasi rotasi metode *Quaternion*	32
Gambar 2.15	Profil terbang RWX200	36
Gambar 2.16	Konfigurasi dan geometri RWX200	37
Gambar 3.1	Blok hubungan antar variabel	39
Gambar 3.2	Diagram blok *low-cost* IMU	41
Gambar 3.3	Ilustrasi proses *sampling* IMU-GPS	42
Gambar 3.4	Diagram alir *pre-processing* pengembangan algoritma INS	43
Gambar 3.5	Diagram alir konversi data GPS	44
Gambar 3.6	Diagram alir metode μ_e-*Euler*	47
Gambar 3.7	Diagram blok modifikasi algoritma INS	50
Gambar 4.1	Pengujian *rate-gyroscope* dengan pendulum	53
Gambar 4.2	Keluaran *rate-gyroscope* dari pendulum, sebelum dan sesudah di integral	53
Gambar 4.3	Hasil pengujian *rate-gyroscope* pada TAK benda setelah diberikan formula kalibrasi dan koreksi	55

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Nomor dan judul gambar **Halaman**

Gambar 4.4	Pengujian *accelerometer* pada lintasan datar dan lurus	56
Gambar 4.5	Pengujian *accelerometer* TAK benda pada lintasan lurus satu langkah	56
Gambar 4.6	Pengujian *accelerometer* TAK benda pada lintasan lurus dua langkah	57
Gambar 4.7	*Input* simulasi TAK benda	59
Gambar 4.8	Simulasi TAK benda untuk data rotasi (*rate-gyroscope*)	59
Gambar 4.9	Simulasi TAK benda untuk data translasi (*accelerometer*)	60
Gambar 4.10	*Input* dan *output* percobaan metode *Euler* dan *Quaternion* menggunakan *toolbox* pada *simulink* Matlab	61
Gambar 4.11	Simulasi TAK navigasi metode *Euler* dan *Quaternion*	62
Gambar 4.12	Kecepatan TAK navigasi metode *Euler* dan *Quaternion*	63
Gambar 4.13	Posisi/jarak TAK navigasi metode *Euler* dan *Quaternion*	63
Gambar 4.14	Sudut rotasi TAK navigasi metode *Euler* dan *Quaternion*	64
Gambar 4.15	Perbandingan TAK benda dan TAK navigasi metode *Euler*	65
Gambar 4.16	TAK navigasi metode *Euler* dan modifikasi metode *Euler*	66
Gambar 4.17	TAK navigasi sudut rotasi metode *Euler* modifikasi dan metode μ_e-*Euler* (*threshold-Euler*)	68
Gambar 4.18	TAK navigasi dengan variasi *input* (pengukuran 13 s)	68
Gambar 4.19	TAK navigasi sumbu translasi (pengukuran 13 s)	69
Gambar 4.20	TAK navigasi sumbu rotasi (pengukuran 13 s)	69
Gambar 4.21	TAK navigasi dengan variasi *input* (pengukuran 28 s)	70
Gambar 4.22	TAK navigasi sumbu translasi (pengukuran 28 s)	71
Gambar 4.23	TAK navigasi sumbu rotasi (pengukuran 28 s)	72
Gambar 4.24	Perbandingan antara metode *Euler*, *Quaternion* dan μ_e-*Euler* pada sumbu rotasi (pengukuran 28 s)	72
Gambar 4.25	Posisi penempatan IMU pada kendaraan	74
Gambar 4.26	Pengujian IMU untuk satu langkah pada lintasan lurus	75
Gambar 4.27	Pengujian IMU untuk dua langkah pada lintasan lurus	76
Gambar 4.28	Data IMU pada pengujian lintasan memutar	77
Gambar 4.29	Translasi TAK benda pada pengujian lintasan memutar	77

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Nomor dan judul gambar **Halaman**

Gambar 4.30 Rotasi TAK benda pada pengujian lintasan memutar 78
Gambar 4.31 Kecepatan dan jarak TAK navigasi pada pengujian lintasan memutar 79
Gambar 4.32 Posisi koordinat LLA (*Latitude*, *Longitude*, dan *Altitude*) INS-GPS pada pengujian lintasan memutar 80
Gambar 4.33 Posisi 3D INS-GPS pada pengujian lintasan memutar 81
Gambar 4.34 *Attitude* pada pengujian lintasan memutar 81
Gambar 4.35 *Roll* pada pengujian lintasan memutar 82
Gambar 4.36 TAK navigasi metode *Euler*, *Quaternion*, dan μ_e-*Euler* pada pengujian lintasan memutar 82
Gambar 4.37 Data IMU pada pengujian di tol Merak-Tangerang 83
Gambar 4.38 Translasi TAK benda pada pengujian di tol Merak-Tangerang 84
Gambar 4.39 Rotasi TAK benda pada pengujian di tol Merak-Tangerang 84
Gambar 4.40 Kecepatan dan jarak TAK navigasi pada pengujian di tol Merak-Tangerang 85
Gambar 4.41 Posisi koordinat LLA (*Latitude*, *Longitude*, dan *Altitude*) INS-GPS pada pengujian di tol Merak-Tangerang 86
Gambar 4.42 Posisi 3D INS-GPS pada pengujian di tol Merak-Tangerang 86
Gambar 4.43 *Attitude* pada pengujian di tol Merak-Tangerang 87
Gambar 4.44 TAK navigasi metode *Euler*, *Quaternion*, dan μ_e-*Euler* pada pengujian di jalan tol Merak-Tangerang 88
Gambar 4.45 Data IMU hasil peluncuran RWX200 LAPAN 89
Gambar 4.46 Translasi TAK benda hasil peluncuran RWX200 89
Gambar 4.47 Rotasi TAK benda hasil peluncuran RWX200 90
Gambar 4.48 Translasi TAK navigasi hasil peluncuran RWX200 91
Gambar 4.49 Posisi koordinat LLA INS-GPS hasil peluncuran RWX200 91
Gambar 4.50 Posisi 3D INS-GPS hasil peluncuran RWX200 92
Gambar 4.51 *Attitude* TAK navigasi hasil peluncuran RWX200 93
Gambar 4.52 TAK navigasi metode *Euler*, *Quaternion*, dan μ_e-*Euler* pada hasil peluncuran RWX200 LAPAN 93

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISTILAH

ADC	:	*Analog to Digital Converter*
AHRS	:	*Attitude Heading Reference System*
ATD	:	*Advanced Technology Demonstration*
AUV	:	*Autonomous Underwater Vehicle*
COG	:	*Center of Gravity*
DCM	:	*Direct Cosine Matrix*
DOF	:	*Degree of Freedom*
DGPS	:	*Diferential Global Positioning System*
ECI	:	*Earth Centered Inertial*
ECEF	:	*Earth Centered Earth Fixed*
ENU	:	*East North Up*
EMRFI	:	*Electromagnetic and Radio Frequency Interference*
GPGGA	:	Format keluaran ASCII standar data GPS (GPS *fix Data*)
GNC	:	*Guidance, Navigation, and Control*
GPS	:	*Global Positioning System*
HSTSS	:	*Hardened Subminiature Telemetry and Sensor System*
IMM	:	*Interacting Multiple Models*
IMU	:	*Inertial Measurement Unit*
INU/INS	:	*Inertial Navigation Unit/Inertial Navigation System*
KF	:	Kalman *Filter*
LAPAN	:	Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
LEO	:	*Low Earth Orbiter*
LGV	:	*Local Geodetic Vertical*
LLA	:	*Latittude, Longitude, Altitude*
LPF	:	*Low Pass Filter*
MEMS	:	*Micro Electro Mechanical System*
MLRS	:	*Multiple Launch Rocket System*
NED	:	*North East Down*
NMEA	:	*National Marine Electronics Assosiation*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PC	:	*Personal Computer*
PCB	:	*Printed Circuit Board*
PID	:	*Proportional-Integral-Derivative*
RAM	:	*Random Access Memory*
RCX	:	Roket cair eksperimen LAPAN
RHAN	:	Roket pertahanan Indonesia
RKX	:	Roket kendali eksperimen LAPAN
RPA	:	*Remotely Piloted Aircraft*
RPS	:	Roket peluncur satelit LAPAN
RUM	:	Roket Uji Muatan
RWX	:	Roket wahana eksperimen LAPAN
RX	:	Roket balistik eksperimen LAPAN
SINS	:	*Strapdown Inertial Navigation System*
SLV	:	*Satellite Launching Vehicle*
SMD	:	*Surface Mount Devices*
SW-IMM	:	*Swing Markov Interacting Multiple Models*
TAK	:	Tata Acuan Koordinat
TOT	:	*Transfer of Technology*
TTL	:	*Transistor-Transistor Logic*
UAV	:	*Unmanned Aerial Vehicle*
WA	:	*Wander Azimuth*
WGS-84	:	*World Geodetic System Committee 1984*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR VARIABEL

a	:	Percepatan (m/s^2)
a_x, a_y, a_z	:	Percepatan sumbu x, y, dan z pada TAK benda (m/s^2)
C_a^i	:	Matrik transformasi dari TAK a menuju TAK i
C_i^e	:	Matrik transformasi dari ECI ke ECEF
C_e^g	:	Matrik transformasi dari ECEF ke LGV
C_e^n	:	Matrik transformasi dari ECEF ke WA
C_g^n	:	Matrik transformasi dari LGV ke WA
C_g^b	:	Matrik transformasi dari LGV ke benda
C_n^b	:	Matrik transformasi dari WA ke benda
e	:	*eccentricity* dari elipsoid bumi
F	:	Gaya
f	:	*Flattening* atau kelengkungan permukaan bumi
g	:	Gravitasi
g^i	:	Percepatan yang dipengaruhi medan gravitasi dan magnitudenya merupakan fungsi posisi
g_x, g_y, g_z	:	Kecepatan sudut sumbu x, y, dan z (^{o}/s)
I	:	*Inertia moment*
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	:	*Inertia moment* pada arah sumbu x, y, dan z
I_{xz}	:	*Inertia moment* pada sumbu x terhadap sumbu z
I_{zx}	:	*Inertia moment* pada sumbu z terhadap sumbu x
m	:	Massa
s	:	jarak (m)
s_x, s_y, s_z	:	Jarak sumbu x, y, dan z pada TAK benda (m)
p, q, r	:	Kecepatan sudut sumbu x, y, dan z pada TAK benda (^{o}/s)
$\bar{q}$	:	Normalisasi *Quaternion*
q_0, q_1, q_2, q_3	:	Parameter *Quaternion*
v	:	kecepatan (m/s)
v_x^b, v_y^b, v_z^b	:	Kecepatan sumbu x, y, dan z pada TAK benda

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

v_x^n, v_y^n, v_z^n	:	Kecepatan sumbu *x*, *y*, dan *z* pada TAK navigasi
$\dot{x}$	:	Posisi
$\dot{x}^i$	:	Posisi vektor x
x^i, y^i, z^i	:	TAK geosentris ECI searah sumbu *x*, *y*, dan *z*
x^e, y^e, z^e	:	TAK geosentris ECEF searah sumbu *x*, *y*, dan *z*
x^n, y^n, z^n	:	TAK geografis WA searah sumbu *x*, *y*, dan *z*
x^g, y^g, z^g	:	TAK geografis LGV sumbu *x*, *y*, dan *z*
x^b, y^b ,z^b	:	TAK benda sumbu *x*, *y*, dan *z*
x^w, y^w, z^w	:	TAK angin sumbu *x*, *y*, dan *z*
α	:	*Wander angle* (sudut inklinasi)
β	:	*Rotation magnitude* pada metode *Quaternion*
β_x, β_y, β_z	:	*Rotation magnitude* sumbu *x*, *y*, dan *z* pada metode *Quaternion*
Ω	:	Kecepatan rotasi bumi
Ω_{ia}^a	:	*Skew symetric matrix*
R dan *r*	:	*Semi-major axis* (6378137 m) dan s*emi-minor axis* (6356752,3142 m)
R_e	:	Diameter bumi
R_0	:	Radius bumi mengacu pada koordinat elipsoid WGS-84
R_N	:	Radius *latitude* (dari pusat bumi ke arah kutub)
R_E	:	Radius *longitude* (dari pusat bumi ke arah katulistiwa)
$\overline{\omega}$	:	Vektor rotasi
ω_x, ω_y, ω_z	:	Kecepatan sudut sumbu *x*, *y*, dan *z* pada TAK benda (^{o}/s)
ω_{ia}^i	:	Kecepatan sudut TAK *a* yang berotasi relatif terhadap TAK *i*
λ	:	*Latitude*
μ	:	*Longitude*
μ_e	:	*Threshold*
h	:	*Altitude*
ϕ	:	*Roll*
θ	:	*Pitch*
ψ	:	*Yaw*
ψ_g	:	*Geographic heading*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ψ_P	:	*Platform heading*
U, V, W	:	Kecepatan sumbu *x*, *y*, dan *z* pada TAK navigasi (m/s)
$\dot{U}, \dot{V}, \dot{W}$	:	Percepatan sumbu *x*, *y*, dan *z* pada TAK benda (m/s^2)
V_N, V_E, V_D	:	Posisi (*north, east, down*) *earth frame* pada TAK navigasi
$\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$	:	Posisi sumbu *x*, *y*, dan *z* pada TAK navigasi (sama dengan V_N, V_E, V_D)
X, Y, Z	:	Jarak sumbu *x*, *y*, dan *z* pada TAK navigasi (m)
Roll	:	Mengguling atau berotasi pada poros sumbu *x*
Pitch	:	Mengangguk atau berotasi pada poros sumbu *y*
Yaw	:	Menggeleng atau berotasi pada poros sumbu *z*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Roket merupakan alutista untuk mendukung sistem pertahanan negara. Tidak pernah ada transfer ilmu untuk setiap pembelian roket atau rudal dari negara manapun. LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) mengembangkan beberapa jenis roket salah satunya adalah jenis RWX. Roket jenis ini memiliki bentuk yang ramping, memiliki lintasan terbang yang mudah diamati, dan menggunakan MEMS-IMU (*Micro Electro Mechanical System-Inertial Measurenment Unit*). Muatan roket LAPAN saat ini belum menggunakan algoritma INS (*Inertial Navigation System*), hanya menggunakan IMU dan GPS (*Global Positioning System*) sebagai sistem navigasinya. Algoritma SINS (*Strapdown Inertial Navigation System*) pada penelitian ini diadopsi dari algoritma yang biasa digunakan untuk robotika, *aeromodeling,* dan kendaraan. Pengembangan algoritma INS pada roket tetap menggunakan metode *Euler*, karena roket LAPAN membutuhkan data TAK (Tata Acuan Koordinat) benda dan TAK navigasi yang dikirimkan ke *groundstation* untuk dilakukan pengamatan terhadap *attitude* dan posisi lintasan terbang.

Data *input* penelitian ini menggunakan data percepatan dari *accelerometer* dan kecepatan sudut dari *rate-gyroscope*, untuk data simulasi algoritma dibuat berbentuk gelombang sinus sesuai dengan karakteristik keluaran IMU. Pengembangan algoritma INS pada penelitian ini menggunakan persamaan dasar metode *Euler* yang dimodifikasi dengan menambahkan *threshold* (μ_e) sehingga bentuk keluaran sama seperti metode *Quaternion* (diberi nama metode μ_e-*Euler*). Modifikasi ini dilakukan untuk mengatasi masalah *singularity* (*pitch* 90^o) tetapi tetap menggunakan metode *Euler*. Sudut rotasi hasil percobaan dibandingkan antara metode *Euler*, *Quaternion*, dan μ_e-*Euler*. Sumbu translasi dibandingkan antara posisi koordinat keluaran algortima INS dengan koordinat dari GPS.

Hasil simulasi membuktikan bahwa modifikasi algoritma INS dengan menggunakan metode μ_e-*Euler* tidak terpengaruh *singularity* walaupun menggunakan persamaan dasar dari metode *Euler*. Keluaran algoritma INS pada TAK navigasi metode μ_e-*Euler* pada semua pengujian memiliki pola yang sama dengan metode *Quaternion*. Sehingga pengembangan algoritma *Strapdown* INS dapat digunakan sebagai algoritma navigasi pada muatan roket LAPAN.

Kata kunci: *Strapdown*, Inertial Navigation System, *Euler*, Navigasi Roket.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN ALGORITMA INERTIAL NAVIGATION SYSTEM UNTUK UJI PELUNCURAN ROKET KENDALI LAPAN
ROMI WIRYADINATA, Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T., Ph.D. ; Dr.Eng. Wahyu Widada, B.Eng., M.Sc., APU. ; Prof. Ir. S
Universitas Gadjah Mada, 2015 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Rocket is a primary tool of weapon systems to support the country's defense system. There are no transfer of knowledge for every purchase of a rocket or a missile from any country. LAPAN (National Institute of Aeronautics and Space) develops some rockets, one of them is RWX. The rocket has a slim body, has an observable flight trajectory, and use MEMS-IMU (Micro Electric Mechanical System-Inertial Measurement Unit). Nowadays, LAPAN's rocket consignment does not use the algorithm of INS (Inertial Navigation System), only IMU and GPS (Global Positioning System) as a navigation system. In this study, SINS algorithm (Strapdown Inertial Navigation System) was adopted by the algorithm for robotics, aero modeling, and vehicles. Development of INS algorithms on rocket uses an Euler's method. It has to be practiced because the LAPAN's rocket requires TAK (reference or frame) of objects and navigation that is sent to the ground station to observe its attitude and its flight path position.

Input data of this study used acceleration data from the accelerometer and angular velocity of rate-gyroscope. In algorithm simulation, data was created in the form of a sine wave in accordance with the output characteristics of the IMU. INS algorithm development in this research used the fundamental equation of Euler method modified by adding *threshold* (μ_e) that had the same output as Quaternion method (μ_e-Euler). This modification was done to overcome the problem of singularity (pitch 90°) but still using the Euler method. The angle of rotation of the experimental results from the Euler method, Quaternion, and μ_e-*Euler* were compared. Translational axis was compared to INS algorithm output positions coordinates with the coordinates of GPS.

The results of the simulation show that modification of INS algorithm using μ_e-Euler does not affect to singularity despite using basic equations of Euler method. INS algorithm output on navigation TAK μ_e-Euler on all testing methods has the same pattern as the quaternion method. Thus, the development of Strapdown INS algorithm can be used as a navigation algorithm on LAPAN rocket consignment.

Key word: Strapdown, Inertial Navigation System, Euler, Rocket Navigation