

## SISTEM PENAPISAN DERAU PADA SENSOR INERSIA WAHANA TANPA AWAK QUADROTOR

**Meilia Safitri**

Program Vokasi, Program Studi Teknik Elektromedik  
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Email: meilia.safitri@vokasi.umy.ac.id

**Nur Hudha Wijaya**

Program Vokasi, Program Studi Teknik Elektromedik  
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Email: nurhudhawijaya@umy.ac.id

### ABSTRAK

Dalam penelitian ini dirancang algoritme penapisan yang bertujuan untuk mengurangi derau yang ada pada hasil pengukuran sensor inersia quadrotor. Kalman *filter* digunakan untuk menapis derau yang tercampur pada data hasil pengukuran sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Selain itu, algoritme *zero velocity compensator* dirancang untuk menghilangkan pergeseran ketika quadrotor berada dalam keadaan statis. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan algoritme *zero velocity compensator* yang dirancang telah mampu mengurangi pergeseran (*drift*) pada saat quadrotor dalam keadaan diam, selain itu Kalman *filter* yang digunakan pada sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* telah dapat mengurangi derau yang tercampur pada *raw data*, sehingga hasil integrasi perpindahan lebih baik dibandingkan dengan hasil integrasi tanpa penapisan.

**Kata kunci:** kalman *filter*, *zero velocity compensator*, IMU.

### ABSTRACT

*In this study a filtering algorithm that aims to reduce existing noise on the measurement of the inertial sensors in quadrotor is designed. Kalman filter is used to filter the noise mixed in the measurement data of accelerometer and gyroscope sensor. Meanwhile, to eliminate the drift that occurs when the quadrotor in static condition, the zero velocity compensator algorithm is employed. Based on the conducted experiment, the designed zero velocity compensator has been successfully eliminate the drift when quadrotor in static condition. Moreover the proposed Kalman filter that is used in accelerometer and gyroscope sensor has been able to reduce the noise mixed in raw data, with the result that the estimation of Kalman filter is better than the estimation without filtering.*

**Keywords:** kalman *filter*, *zero velocity compensator*, IMU.

## 1. PENDAHULUAN

Wahana udara tanpa awak, *unmanned aerial vehicle* (UAV), merupakan wahana terbang tanpa ada yang mengendalikan penerbangan wahana tersebut. Sebuah UAV dapat berupa pesawat terbang yang dikendalikan dari jarak jauh atau pesawat yang terbang secara *autonomous* atau pesawat dengan sistem otomatis yang lebih dinamis dan kompleks. Salah satu jenis UAV yang banyak menarik perhatian peneliti dalam dekade terakhir ini adalah quadrotor. Quadrotor merupakan jenis UAV yang memanfaatkan empat buah rotor *non-coaxial* untuk bermanuver. Kemampuan-kemampuan quadrotor seperti *hovering*, *pirouette*, dan *sideslip* membuat jenis wahana udara tanpa awak ini semakin lihai dalam bermanuver selain itu, kemampuan quadrotor untuk melakukan *vertical take off and landing* (VTOL) membuat wahana ini tidak membutuhkan area yang besar untuk melakukan pendaratan dan lepas landas[1]. Saat ini pengembangan quadrotor menjadi semakin luas. Walaupun pengembangan quadrotor yang terbesar masih pada bidang militer akan tetapi pengembangan quadrotor dibidang kesehatan, perpetaan, pertanian juga semakin banyak.

Salah satu unsur penting pada quadrotor adalah kemampuan navigasi yang baik. Dalam merancang sebuah sistem navigasi pada quadrotor terdapat beberapa hal yang harus dihadapi [2] yaitu, beban (*payload*) yang terbatas, *odometry* tidak langsung, dan dinamika yang cepat. Keterbatasan beban yang dapat dibawa oleh sebuah quadrotor membuat pemilihan sensor yang dapat digunakan juga terbatas. Selain harus memiliki bentuk yang kecil dan ringan, pemilihan sensor juga harus memperhatikan konsumsi daya sensor. Disamping itu, dalam perancangan

sistem navigasi juga harus mempertimbangkan aspek kompleksitas dalam proses komputasi. Proses komputasi yang berat membuat unit pemroses harus melakukan perhitungan yang sangat banyak dalam waktu singkat sehingga membuat konsumsi daya meningkat. Dengan semua batas-batasan dan tantangan yang ada, perancangan sistem navigasi pada quadrotor semakin sulit sekaligus menantang untuk dilakukan. Apalagi dalam keadaan lingkungan yang tidak terjangkau oleh sinyal GPS semakin menambah tingkat kesulitan dalam merancang sebuah sistem navigasi dalam quadrotor. Dalam perancangan sistem navigasi quadrotor pada daerah yang tidak terjangkau oleh GPS, hanya dapat bergantung pada *inertial measurement unit* (IMU) dan sensor *exteroceptive* seperti *laser range finder* [3] [4] [5] dan kamera [6] [7] [8] [9].

Penggunaan *laser range-finder* dalam sistem navigasi quadrotor mempunyai kemampuan yang baik bila digunakan dalam lingkungan yang mempunyai struktur fisik atau yang unik, namun bila digunakan dalam lingkungan yang homogen misalnya didalam koridor suatu gedung hasil yang didapat tidak begitu akurat. Di lain pihak, penggunaan sensor kamera baik kamera biasa, *stereo camera*, maupun kamera RGB-D sangat baik bila digunakan untuk memperoleh informasi 3D, namun sensor ini mempunyai kelemahan pandangan secara angular dan membutuhkan komputasi yang intensif serta harga dari sensor ini cukup mahal.

Pada penelitian ini dikembangkan algoritma Kalman *filter* pada sistem navigasi yang berbasis sensor IMU. Sensor IMU memiliki keunggulan yaitu harganya yang murah, ringan, dan memiliki komputasi yang ringan. Disamping itu penggunaan algoritma Kalman *filter* dalam penapisan *noise* sensor IMU membuat sistem navigasi yang dikembangkan memiliki komputasi yang ringan namun, tetap memiliki kemampuan yang baik dalam mengestimasi posisi UAV.

## 2. MODEL SISTEM PARROT ARDRONE 2.0



Gambar 1. Sistem Pergerakan Parrot ARDrone 2.0

Penelitian ini menggunakan quadrotor jenis Parrot ARDrone 2.0 yang memiliki 6 derajat kebebasan (*six degree of freedom*) dengan sistem pergerakan yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Posisi quadrotor pada sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z ditulis sebagai,

$$p = [x \quad y \quad z]^T. \quad (1)$$

Pergerakan *roll*, *pitch*, dan *yaw* yang dibentuk oleh sudut Euler dinotasikan dengan,

$$\alpha = [\varphi \quad \theta \quad \psi]^T. \quad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) diperoleh dengan mengintegrasikan data hasil pengukuran sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope*.

Hasil integrasi data pengukuran sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* selalu berada dalam kerangka quadrotor, namun posisi dan arah quadrotor berada pada kerangka global. Agar hasil integrasi data pengukuran sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* berada dalam kerangka global, diperlukan suatu transformasi koordinat untuk mengubah perpindahan linear dan perpindahan angular dalam kerangka quadrotor menjadi perpindahan linear dan angular pada kerangka global.

Transformasi dari kerangka quadrotor menjadi kerangka global dilakukan dengan menggunakan matriks rotasi. Menurut [10] urutan rotasi matriks dimulai dari rotasi kerangka quadrotor terhadap sumbu-z kerangka global, kemudian dilanjutkan dengan rotasi terhadap sumbu-y dan yang terakhir adalah rotasi terhadap sumbu-x. Matriks rotasi terhadap sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z diberikan oleh persamaan (3), (4), dan (5),

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Berdasarkan urutan rotasi, matriks transformasi kerangka quadrotor menjadi kerangka global didapatkan melalui persamaan (6),

$${}^W R_B = R_z(\psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\varphi) \quad (6)$$

sehingga diperoleh persamaan (7) yang merepresentasikan matriks transformasi dari kerangka quadrotor menjadi kerangka global,

$${}^W R_B = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi c_\psi - c_\theta s_\psi & c_\theta s_\psi c_\psi + s_\theta s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi s_\psi - c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi s_\psi - s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & s_\theta c_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

dengan,  $c_\varphi = \cos \varphi$ ,  $s_\varphi = \sin \varphi$ ,  $c_\theta = \cos \theta$ ,  $s_\theta = \sin \theta$ ,  $c_\psi = \cos \psi$ , dan  $s_\psi = \sin \psi$ .

Hubungan antara sudut Euler ( $\varphi, \theta, \psi$ ) dengan posisi pada kerangka quadrotor diberikan oleh persamaan (8),

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = {}^W R_B \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (8)$$

dengan  $x_w, y_w$  dan  $z_w$  merupakan posisi pada kerangka global serta  $x_b, y_b$  dan  $z_b$  merupakan posisi pada kerangka quadrotor.

### 3. PERANCANGAN SISTEM PENAPISAN

#### 3.1 Gravity Compensator

Percepatan linear yang dialami oleh quadrotor akan diukur oleh sensor *accelerometer*, akan tetapi sensor *accelerometer* tidak hanya mengukur percepatan linear quadrotor namun juga percepatan gravitasi. Keberadaan percepatan gravitasi yang terukur oleh sensor *accelerometer* ini akan mengganggu hasil pengukuran karena quadrotor seolah-olah mengalami percepatan sebesar percepatan gravitasi ke arah sumbu-z. Kompensator gravitasi bertujuan untuk menghilangkan pengaruh percepatan gravitasi pada pembacaan sensor *accelerometer*. Persamaan kompensator gravitasi diperoleh berdasarkan transformasi koordinat, persamaan ini diberikan oleh persamaan (9),

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = {}^W R_B \begin{bmatrix} g_{bx} \\ g_{by} \\ g_{bz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

sehingga persamaan kompensator gravitasi dapat dituliskan sebagai persamaan (10),

$$\begin{bmatrix} g_{bx} \\ g_{by} \\ g_{bz} \end{bmatrix} = ({}^W T_B)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (10)$$

dengan  $g$  adalah percepatan gravitasi bumi ( $9,812865328 \text{ m/s}^2$ ), sedangkan  $g_{bx}, g_{by}$ , dan  $g_{bz}$  merupakan kompensator gravitasi untuk data sumbu  $x, y$ , dan  $z$ .

### 3.2 Kalman Filter

Kalman *filter* merupakan algoritme yang banyak dipakai dalam hal penapisan *noise* serta untuk memperkirakan *state* dari sistem [11]. Proses rekursif ini pertama kali diperkenalkan oleh Rudofl. E Kalman dalam *paper*nya di tahun 1960. Dalam Kalman *filter* sistem diasumsikan sebagai sistem yang linear dan semua variabel yang diamati direpresentasikan dalam distribusi Gaussian

Dalam teori kendali modern, *state* pada quadrotor yang diberikan oleh persamaan (7) dapat direpresentasikan sebagai persamaan linear yang diberikan oleh persamaan (11),

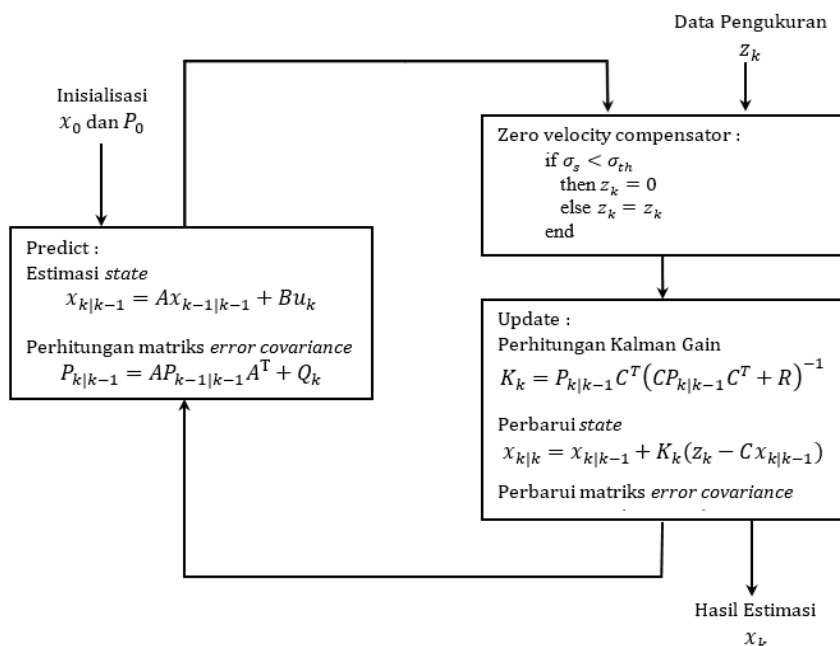
$$\zeta_{k+1} = A\zeta_k + Bu_k + w_k, \quad (11)$$

sedangkan hubungan antara *state* proses dan hasil pengukuran dinyatakan dalam persamaan (12),

$$z_k = Cx_k + v_k. \quad (12)$$

Dalam penelitian ini, algoritma penapisan yang dirancang dilengkapi dengan algoritme *zero velocity compensator* (ZVC). *Zero velocity compensator* adalah suatu metode yang digunakan untuk menghilangkan dampak yang ditimbulkan oleh *noise* pada sensor yang membuat pergeseran posisi dan arah sensor ketika sensor dalam keadaan diam. Menurut [12], agar sensor dapat secara otomatis mengetahui dalam keadaan diam dapat dilakukan dengan membandingkan simpangan baku data dari sensor ( $\sigma_s$ ) dengan nilai tertentu ( $\sigma_{th}$ ). Jika deviasi standar data kurang dari nilai tersebut, maka sensor dianggap dalam keadaan diam, dan sebaliknya. Saat sensor berada dalam keadaan diam, maka percepatan angular, perpindahan angular, percepatan linear, kecepatan linear, dan perpindahan linear sensor dianggap 0.

*Zero velocity compensator* juga dapat digunakan untuk mengatasi perubahan *offset* pada sensor. Ada kalanya, nilai *offset* data sensor pada saat diam setelah digerakkan berbeda dengan nilai *offset* data sensor pada saat diam sebelum digerakkan (terjadi histerisis) sehingga, pada saat sensor diam selain hasil estimasi Kalman *filter* yang akan dibuat menjadi 0, nilai *offset* sensor juga diperbarui. Pengimplementasi *zero velocity compensator* pada Kalman *filter* diberikan oleh Gambar 2.

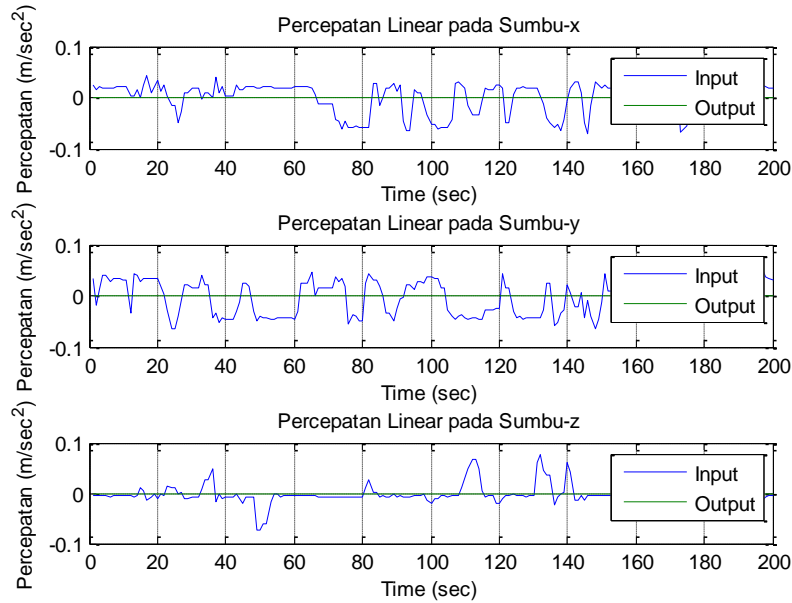


Gambar 2. Pengimplementasian Zero Velocity Compensator Pada Kalman Filter

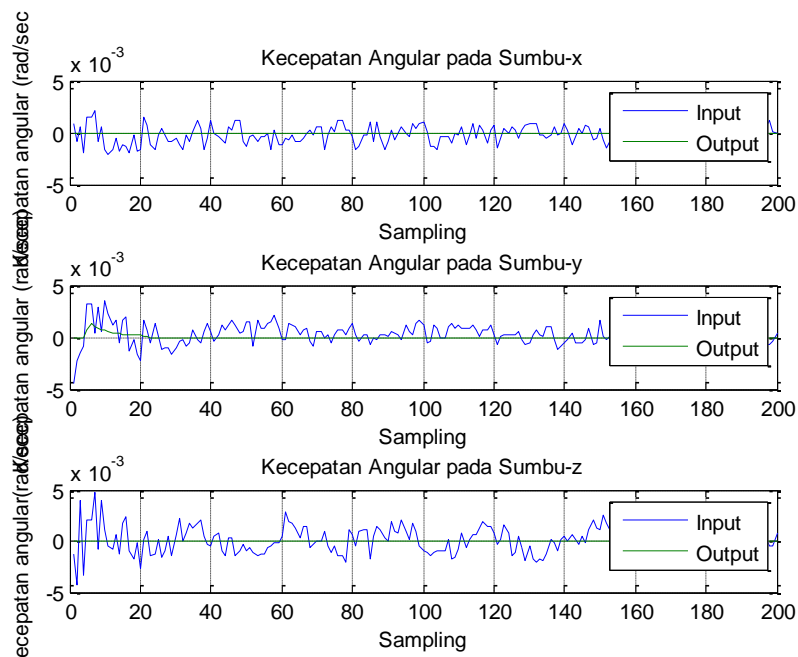
## 4. HASIL DAN ANALISIS

### 4.1 Penapisan Pada Keadaan Statis

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah mengetahui apakah *zero velocity compensator* yang dirancang telah mampu menghilangkan *drift* yang terjadi ketika quadrotor dalam keadaan diam. Hasil penapisan derau ketika quadrotor dalam keadaan statis ditunjukkan oleh Gambar 3 dan Gambar 4.



**Gambar 3. Percepatan Quadrotor Saat Keadaan Statis**

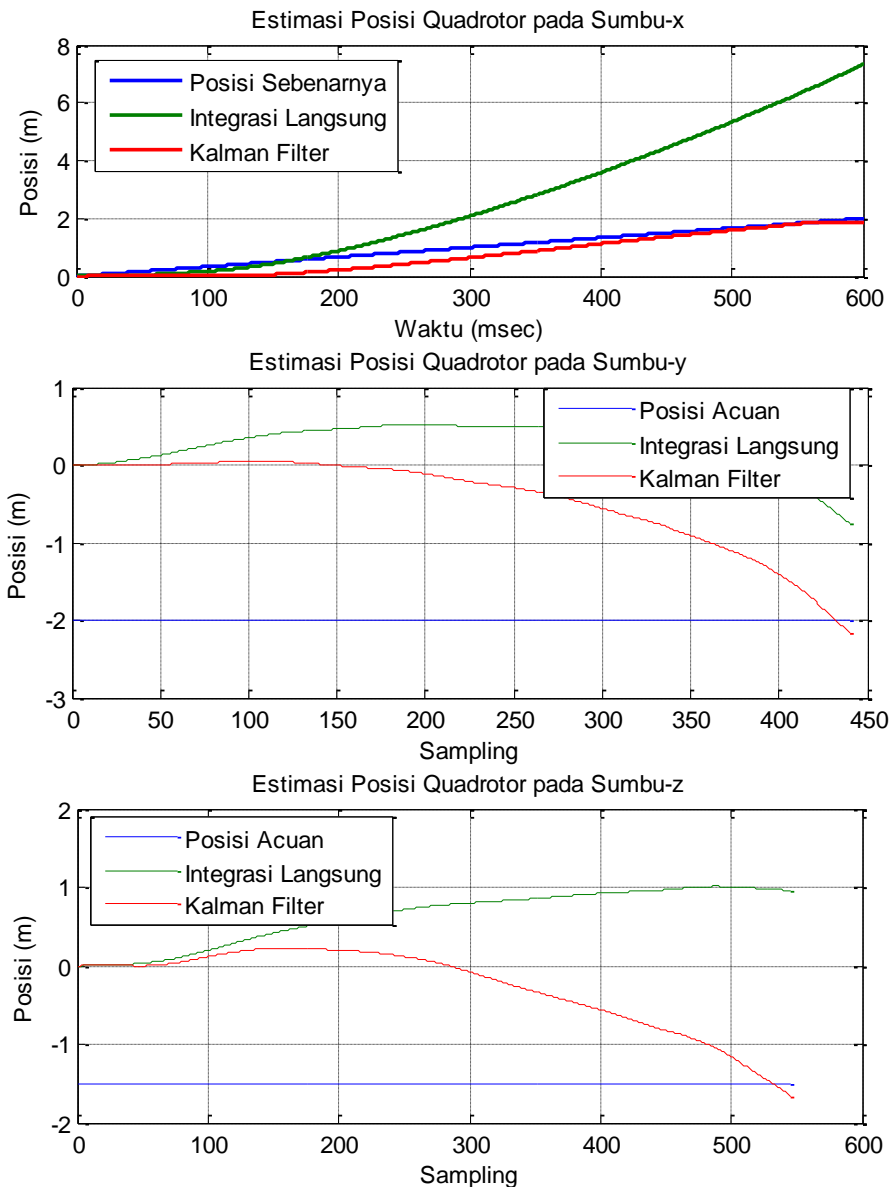


**Gambar 4. Hasil Penapisan Kecepatan Angular Quadrotor**

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4, terlihat bahwa *zero velocity compensator* yang dirancang telah berhasil membuat hasil pengukuran percepatan linear dan kecepatan angular sensor (garis warna biru) menjadi nol (garis warna hijau).

#### 4.2 *Perpindahan Linear Dan Angular*

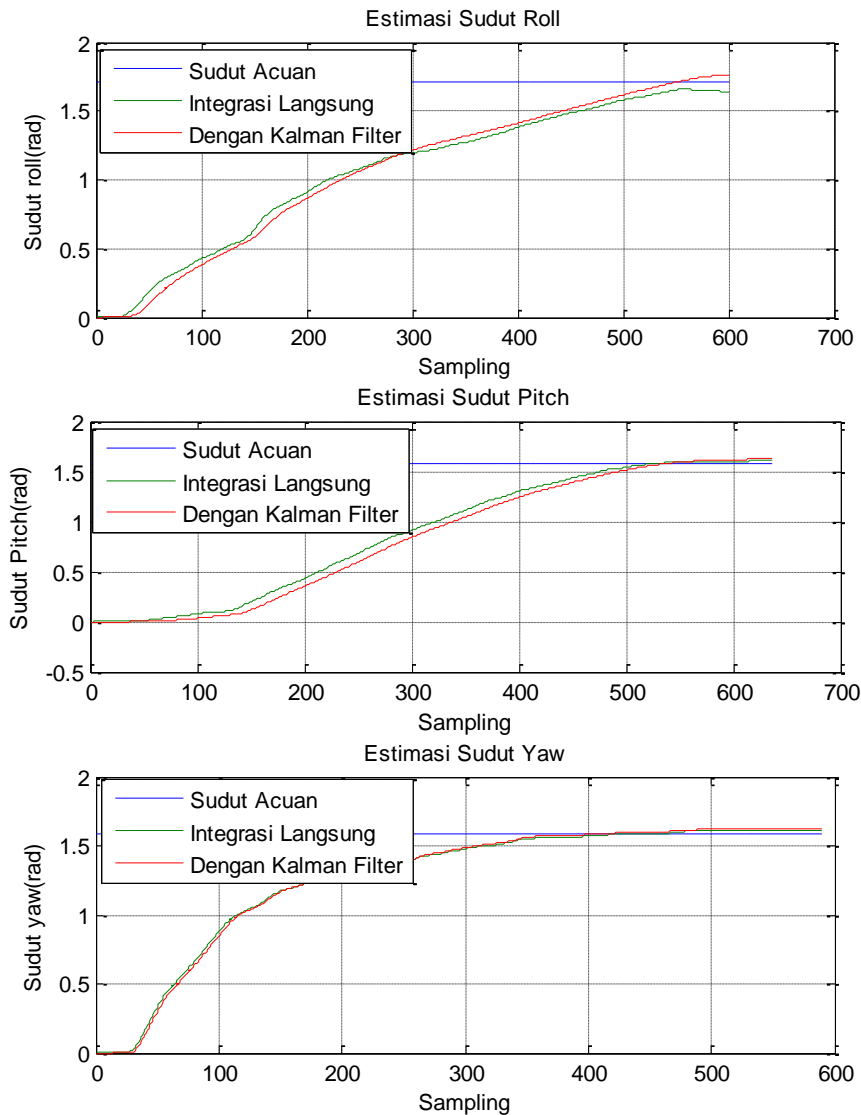
Untuk mengetahui apakah algoritme penapisan yang dirancang pada sensor *accelerometer* dapat berjalan dengan baik, quadrotor sejauh 2 meter terhadap sumbu-x, kemudian sejauh 2 meter terhadap sumbu-y, dan sejauh 1,5 meter terhadap sumbu-z. Gambar 5 merupakan hasil estimasi Kalman *filter* ketika quadrotor digerakkan secara linear terhadap masing-masing sumbu.



**Gambar 5. Hasil Estimasi Posisi Quadrotor**

Berdasarkan eksperimen yang dijalankan seperti yang terlihat pada Gambar 5, garis berwarna biru merupakan posisi acuan, posisi biru merupakan hasil integrasi secara langsung dan garis berwarna merah adalah hasil estimasi Kalman *filter*, ketika quadrotor digerakkan sejauh 2 m pada sumbu-x diperoleh hasil estimasi sebesar 7,329 m dengan menggunakan integrasi secara langsung dan 1,96 m dengan menggunakan Kalman *filter*, sedangkan pada sumbu-y, ketika quadrotor digerakkan sejauh -2 m hasil estimasi dengan itegrasi langsung sebesar -0,3 m dan -2,17 m dengan menggunakan Kalman *filter*. Ketika quadrotor digerakkan sejauh -1,5 m pada sumbu-z diperoleh hasil sebesar 1,01m dengan menggunakan itegrasi langsung dan hasil yang diperoleh dengan menggunakan Kalman *filter* adalah sebesar -1,7 m. Dengan melihat hasil-hasil tersebut terlihat bahwa Kalman *filter* yang dirancang telah berhasil mengurangi derau yang tercampur pada data pengukuran sensor *accelerometer*.

Selanjutnya untuk mengetahui apakah algoritme penapisan ini berhasil mengurangi derau pada sensor *gyroscope*, kerangka quadrotor diputar sebesar  $90^\circ$  terhadap sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Berikut merupakan hasil estimasi Kalman *filter* ketika dilakukan pergerakan angular terhadap kerangka quadrotor.



**Gambar 6. Hasil Estimasi Sudut Quadrotor**

Hasil akhir estimasi sudut yang diperoleh seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6, dengan garis berwarna biru merupakan sudut acuan, garis berwarna hijau merupakan hasil integrasi secara langsung dan garis berwarna merah menunjukkan hasil estimasi dengan Kalman *filter*, adalah sebesar  $87^\circ$  dengan integrasi langsung dan  $92,8^\circ$  dengan estimasi menggunakan Kalman *filter* pada sudut *roll*, sedangkan pada sudut *pitch* diperoleh estimasi sudut sebesar  $92^\circ$  dengan itegrasi langsung dan  $92,8^\circ$ . Pada sudut *yaw* diperoleh sudut sebesar  $92,6^\circ$  dengan estimasi tanpa penapisan dan  $93^\circ$  dengan menggunakan Kalman *filter*.

## 5. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini dirancang algoritme penapisan yang bertujuan untuk mengurangi derau yang ada pada hasil pengukuran sensor inersia quadrotor. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan algoritma *zero velocity compensator* yang dirancang telah mampu mengurangi pergeseran (*drift*) pada saat quadrotor dalam keadaan diam, selain itu Kalman *filter* yang digunakan pada sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* telah dapat mengurangi derau yang tercampur pada *raw data*, sehingga hasil integrasi perpindahan lebih baik dibandingkan dengan hasil integrasi tanpa penapisan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. H. Shim, H. J. Kim, and S. Sastry. 2000. "Control System Design for Rotorcraft-based Unmanned Aerial Vehicles using Time-domain System Identification," *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Control Appl.*, no. 2, pp. 808–813.

- [2] M. Achtelik, A. Bachrach, R. He, S. Prentice, and N. Roy. 2009. "Autonomous Navigation and Exploration of a Quadrotor Helicopter in GPS-denied Indoor Environments," *Int. Aer. Robot. Compet.*
- [3] A. Bachrach, S. Prentice, and N. Roy. 2009. "RANGE - Robust Autonomous Navigation in GPS-denied Environments," *J. F. Robot.*
- [4] C. Christmann, A. Wu, H. Hashimoto, C. Ong, R. Kalghatgi, and E. N. Johnson, "Self-Contained Ranging Sensor Aided Autonomous Guidance, Navigation, and Control for Indoor Flight," *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, pp. 1–21.
- [5] A. Bry, A. Bachrach, and N. Roy, "State estimation for aggressive flight in GPS-denied environments using onboard sensing," *2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, no. Icara 2012, pp. 1–8, May 2012.
- [6] D. Li, Q. Li, N. Cheng, Q. Wu, J. Song, and L. Tang. 2013. "Combined RGBD-inertial based state estimation for MAV in GPS-denied indoor environments," *2013 9th Asian Control Conf.*, pp. 1–8, Jun.
- [7] M. Achtelik, A. Bachrach, R. He, S. Prentice, and N. Roy. 2009. "Stereo vision and laser odometry for autonomous helicopters in GPS-denied indoor environments," *Int. Soc. Opt. Eng.*, pp. 733219-733219–10, May.
- [8] L. R. García Carrillo, A. E. Dzúl López, R. Lozano, and C. Pégard. 2011. "Combining Stereo Vision and Inertial Navigation System for a Quad-Rotor UAV," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 65, no. 1–4, pp. 373–387, Aug.
- [9] R. Voigt, J. Nikolic, C. Hurzeler, S. Weiss, L. Kneip, and R. Siegwart, "Robust embedded egomotion estimation," *2011 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 2694–2699, Sep. 2011.
- [10] R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry. 1994. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Berkeley: University of California,
- [11] J. J. Engel. 2011. "Autonomous Camera-Based Navigation of a Quadrotor," DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN.
- [12] C. Chiu. 2008. "Error Reduction Techniques for a MEMS Accelerometer-based Digital Input Device," The Chinese University of Hong Kong.