

ANALISIS PENGGUNAAN DATA KAMERA VIDEO UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS KOREKSI GEOMETRI PADA CITRA IMAGER PUSHBROOM (ANALYSIS OF VIDEO CAMERA DATA USAGE TO IMPROVE GEOMETRY CORRECTION QUALITY ON PUSHBROOM IMAGER IMAGE)

Patria Rachman Hakim¹⁾, A. Hadi Syafrudin, Wahyudi Hasbi, Abdul Rahman
Peneliti Pusat Teknologi Satelit, Lapan
¹⁾e-mail: patriarachmanhakim@yahoo.com

ABSTRACT

Images produced by pushbroom imager generally contain significant geometric distortion that caused by satellite's attitude instability. To be able to produce good corrected images under various observation conditions, a high frequency satellite attitude data is needed. This research analyses the use of video camera to produce a high frequency of attitude data that will be used in systematic geometric correction. The satellite attitude data can be extracted from video data by using epipolar geometry relationship. Several video tracker software are available to extract attitude data from video data, where frequency of the resulted attitude data will be similar to the frame rates of video camera used, usually 20-30 Hz. This attitude data is then combined with attitude data from star sensor, and then will be used in image systematic geometric correction algorithm. Simulation results show that for unstable movement, the video attitude data could increase the quality of corrected images significantly; while for stable movement, only attitude data from star sensor should be used. Furthermore, it is recommended to use video camera with high resolution and wide field of view (FoV) to produce a high quality of estimated attitude data.

Keywords: *Systematic geometric correction, Pushbroom imager, Video camera, Epipolar*

ABSTRAK

Citra yang dihasilkan *imager pushbroom* pada umumnya memiliki distorsi geometri yang cukup signifikan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan *attitude* satelit pembawanya. Untuk dapat menghasilkan citra terkoreksi yang baik untuk berbagai kondisi pengamatan maka dibutuhkan data *attitude* satelit dengan frekuensi yang cukup tinggi. Penelitian ini menganalisis penggunaan kamera video untuk menghasilkan data *attitude* dengan frekuensi tinggi yang akan digunakan dalam koreksi geometri sistematis. Pada dasarnya, data *attitude* satelit dapat dihasilkan dari data video dengan menggunakan konsep geometri epipolar. Beberapa perangkat lunak pelacak video telah tersedia untuk mengekstrak data *attitude* dari data video, dimana frekuensi data *attitude* yang dihasilkan akan sama dengan *frame rate* kamera video yang digunakan, yang umumnya bernilai 20-30 Hz. Data *attitude* ini kemudian diintegrasikan dengan data *attitude* yang berasal dari *star sensor* dan selanjutnya digunakan dalam algoritma koreksi geometri sistematis citra. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada pergerakan yang tidak stabil, data *attitude* video dapat meningkatkan kualitas citra terkoreksi secara signifikan; sedangkan untuk pergerakan stabil sebaiknya hanya menggunakan data *attitude* dari *star sensor*. Selain itu, untuk dapat menghasilkan data estimasi *attitude* yang baik maka disarankan menggunakan kamera video dengan resolusi tinggi dan lebar *field of view* (FoV) yang luas.

Kata kunci: *Koreksi geometri sistematis, Imager pushbroom, Kamera video, Epipolar*

1 PENDAHULUAN

Kualitas citra yang dihasilkan *imager pushbroom* sangat ditentukan oleh kestabilan pergerakan wahana pembawanya, yang dapat berupa satelit maupun pesawat udara. Jika pergerakan wahana tersebut selama proses pengamatan berlangsung cukup stabil, maka citra yang dihasilkan *imager pushbroom* akan memiliki kualitas geometri yang cukup baik. Distorsi geometri yang terjadi pada citra yang dihasilkan umumnya dapat dikoreksi dengan menggunakan algoritma koreksi yang sederhana dan hanya membutuhkan data *attitude* wahana dengan frekuensi rendah. Tetapi sebaliknya jika pergerakan wahana tidak stabil pada saat pengamatan, maka citra yang dihasilkan memiliki distorsi geometri yang hanya dapat dikoreksi jika frekuensi data *attitude* wahana yang tersedia cukup tinggi. Jadi secara garis besar terdapat dua cara untuk dapat menghasilkan citra dengan kualitas geometri yang baik, yaitu dengan memastikan kestabilan pergerakan wahana selama proses pengamatan berlangsung atau dengan menyediakan data *attitude* wahana dengan frekuensi yang cukup tinggi untuk keperluan koreksi geometri citra.

Karakteristik sensor *attitude* satelit Lapan-A3 identik dengan satelit Lapan-A2. Pada satelit mikro Lapan-A2, data *attitude* utama dihasilkan oleh *star sensor* dengan frekuensi sebesar 4 Hz (Center for Satellite Technology, Lapan, 2012). Data *attitude* satelit juga dapat dihasilkan oleh sensor *gyro* dengan nilai frekuensi yang sama dengan frekuensi *star sensor*. Data *attitude* dengan frekuensi 4 Hz ini sebenarnya sudah cukup memadai untuk keperluan koreksi geometri citra *imager* Lapan-A3, tetapi dengan syarat pergerakan satelit Lapan-A3 harus dalam mode *open-loop* (Hakim, P.R., et.al., 2014). Sementara itu, untuk dapat mengoreksi citra yang dihasilkan pada saat satelit bergerak dalam mode *closed-loop* atau jika

pergerakan satelit mengalami gangguan yang cukup signifikan, maka dibutuhkan data *attitude* dengan frekuensi yang lebih besar dari 4 Hz. Beberapa metode dapat digunakan untuk menghasilkan data *attitude* satelit dengan frekuensi tinggi, yang dapat dilakukan secara *software* maupun *hardware*, atau gabungan diantara keduanya. Metode interpolasi cukup efektif dan efisien untuk dapat meningkatkan frekuensi suatu data, tetapi metode ini hanya valid digunakan jika pergerakan satelit relatif cukup stabil (Hakim, P.R., et.al., 2012). Sementara itu, koreksi geometri sistematis dengan metode korelasi intensitas piksel dapat digunakan jika data *attitude* dengan frekuensi tinggi tidak tersedia, tetapi hasilnya memuaskan jika distorsi hanya terjadi pada sumbu *roll* saja (Hakim, P.R., et.al., 2013). Salah satu solusi lainnya adalah dengan cara menggunakan sensor sekunder untuk dapat menghasilkan data *attitude* dengan frekuensi yang lebih tinggi.

Salah satu jenis sensor yang dapat digunakan untuk mendeteksi *attitude* atau perubahan *attitude* (kecepatan sudut) suatu wahana adalah kamera video. Sensor tersebut dapat diletakkan berdekatan dengan *imager pushbroom*, dan berfungsi untuk merekam wilayah yang diamati *imager* selama proses pengamatan berlangsung. Sebuah kamera video umumnya memiliki *frame rate* sebesar 20-30 Hz, yang artinya kamera video ini akan menghasilkan citra untuk setiap 50 ms. Perubahan data *attitude* dapat ditentukan dengan membandingkan dua buah citra yang berdekatan yang dihasilkan kamera video tersebut (Faugeras, O.D., dan S. Maybank, 1990; Hartley, R.I., 1993; Bartoli, A., dan S.I. Olsen; Zhengyou Zhang, 1999; Hai Tao). Perbedaan *attitude* satelit antara pengambilan *frame* ke-*n* dan *frame* *n*+1 dapat ditentukan berdasarkan teori geometri epipolar. Dengan melakukan integrasi terhadap data perbedaan *attitude* antar *frame* tersebut, maka

dapat dihasilkan data *attitude* dengan frekuensi 20-30 Hz. Akan tetapi metode ini sangat rentan terhadap terjadinya *drift error*, sehingga tidak cocok untuk dijadikan sensor tunggal, dan membutuhkan *star sensor* sebagai sensor utama untuk menghindari terjadinya *drift error* tersebut. Konsep integrasi data *attitude* ini identik dengan konsep korelasi intensitas piksel, tetapi konsep ini dapat menghasilkan data perubahan *attitude* dalam tiga sumbu pergerakan satelit, lebih baik dibandingkan metode korelasi intensitas piksel yang hanya dapat mengestimasi data perubahan *attitude* satelit dalam sumbu *roll* saja.

Beberapa jenis *software* telah tersedia untuk dapat mengekstrak data *attitude* suatu wahana dari data sebuah kamera video, atau lebih tepatnya dari serangkaian citra yang diambil dari pose dengan perbedaan *attitude* yang relatif kecil. Salah satu *software* yang dapat diperoleh secara bebas yaitu *Voodoo Camera Tracker* (www.viscoda.com, 10 Mei 2014), sebuah perangkat lunak yang dapat menghasilkan parameter ekstrinsik kamera berdasarkan serangkaian data citra kamera. Parameter ekstrinsik kamera yang dimaksud adalah data perubahan *attitude* dalam sumbu *pitch*, *yaw* dan *roll*, serta data perubahan posisi kamera dalam ruang tiga dimensi. Sebenarnya parameter intrinsik kamera juga dapat ditentukan, tetapi umumnya parameter intrinsik kamera seperti jarak fokus lensa (*focal length*) dan dimensi piksel telah dapat diketahui sebelumnya, dengan asumsi bahwa kamera telah terkalibrasi.

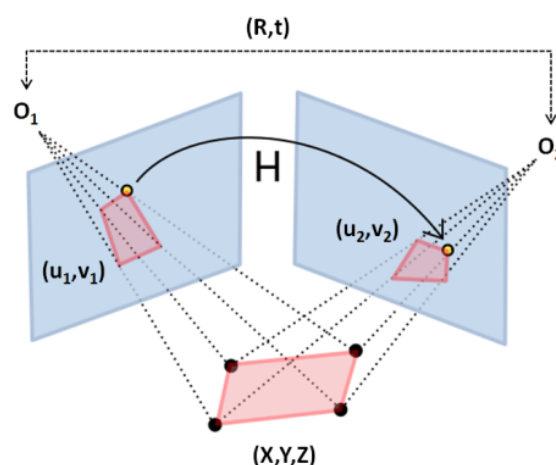
Penelitian ini membahas mengenai potensi penggunaan kamera video pada satelit Lapan-A3 untuk menghasilkan data *attitude* satelit dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi *star sensor*. Selain itu akan dibahas tentang kualitas data *attitude* yang dihasilkan tersebut dalam kaitannya dengan koreksi geometri sistematis citra *imager pushbroom*. Diharapkan data *attitude*

satelit yang dihasilkan memiliki frekuensi yang cukup tinggi dan akurasi yang memadai sehingga dapat diintegrasikan dengan data *star sensor* untuk meningkatkan kualitas citra hasil koreksi. Penelitian ini dilakukan dalam dua tahap yaitu analisis kualitas data *attitude* yang dihasilkan *software Voodoo Camera Tracker* dan simulasi koreksi geometri citra. Data kamera video yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data *dummy* yang dihasilkan simulator kamera. Hal tersebut bertujuan untuk mempermudah proses pengujian dan analisis yang dibutuhkan.

2 KAMERA VIDEO SEBAGAI SENSOR ATTITUDE

2.1 Konsep Geometri Epipolar

Gambar 2-1 berikut ini menunjukkan konsep geometri epipolar. Sebuah obyek yang terdiri dari beberapa buah titik (X_i, Y_i, Z_i) , diamati dengan sudut pandang yang berbeda. Perbedaan sudut pandang tersebut dinyatakan dalam matriks rotasi \mathbf{R} dan matriks translasi \mathbf{t} . Setiap titik pada obyek tersebut kemudian diproyeksikan pada bidang citra (u_1, v_1) dan (u_2, v_2) berdasarkan model kamera *pin-hole*.



Gambar 2-1: Konsep geometri epipolar (dikembangkan dari sumber imagine.enpc.fr)

Dengan asumsi kamera yang digunakan telah terkalibrasi, setiap pasang titik proyeksi citra (u_1, v_1) dan (u_2, v_2) memiliki hubungan yang dapat

dinyatakan dengan menggunakan matriks esensial **E** sebagai berikut (Faugeras, O.D., dan S. Maybank, 1990):

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{E} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2-1)$$

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2-2)$$

Matriks esensial **E** merupakan matriks 3x3 yang dapat ditentukan berdasarkan beberapa pasang titik proyeksi, minimal 8 pasang titik (Hartley, R.I., 1993). Langkah pertama untuk menghasilkan matriks esensial adalah membentuk sistem persamaan linear homogen dari seluruh pasangan titik proyeksi (u_{1N}, v_{1N}) dan (u_{2N}, v_{2N}), dimana N merupakan banyaknya pasangan titik proyeksi. Berikut ini adalah bentuk persamaan linear homogen yang dihasilkan:

$$\mathbf{Ae} = \mathbf{0} \quad (2-3)$$

dimana:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_{21}u_{11} & u_{22}u_{12} & \dots & u_{2N}u_{1N} \\ u_{21}v_{11} & u_{22}v_{12} & \dots & u_{2N}v_{1N} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2N} \\ v_{21}u_{11} & v_{22}u_{12} & \dots & v_{2N}u_{1N} \\ v_{21}v_{11} & v_{22}v_{12} & \dots & v_{2N}v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2N} \\ u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1N} \\ v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1N} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T$$

Vektor $\mathbf{e}=[e_{11},e_{12},e_{13},e_{21},e_{22},e_{23},e_{31}, e_{32}, e_{33}]^T$ merupakan komponen yang membentuk matriks esensial **E**, seperti pada persamaan (2-2). Vektor **e** tersebut dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan homogen tersebut di atas dengan menentukan vektor eigen untuk matriks **A** sebagai berikut:

$$\mathbf{P} = \text{eigen}(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \quad (2-4)$$

Vektor **e** merupakan vektor kolom pada matriks **P** yang berkaitan dengan nilai eigen terkecil. Pada beberapa perangkat lunak seperti Matlab, nilai eigen terkecil umumnya bersesuaian dengan vektor kolom paling kiri matriks **P**. Dengan mengetahui nilai vektor **e** maka matriks esensial **E** dapat ditentukan.

2.2 Ekstraksi Data Attitude

Matriks rotasi dan translasi (**R,t**) yang menyatakan perbedaan sudut pandang antara kedua posisi kamera pada Gambar 2-1 secara umum memiliki bentuk sebagai berikut (Fu, K.S., et al., 1987):

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_1C_3 & -C_1S_3 & S_1 \\ C_2S_3+C_3S_1S_2 & C_2C_3-S_1S_2S_3 & -C_1S_2 \\ S_2S_3-C_2C_3S_1 & C_3S_2+C_2S_1S_3 & C_1C_2 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$\mathbf{t} = -\mathbf{R}[t_x \quad t_y \quad t_z]^T \quad (2-6)$$

Vektor (t_x, t_y, t_z) merupakan posisi relatif kamera terhadap posisi referensi, sedangkan (S_i, C_i) merupakan fungsi sinus dan cosinus untuk masing-masing sudut kamera *pitch*, *roll* dan *yaw*.

Matriks (**R,t**) dapat ditentukan dari matriks esensial jika dan hanya jika kamera yang digunakan tersebut telah terkalibrasi. Jika kamera yang digunakan tersebut belum terkalibrasi, maka penentuan *attitude* kamera ini merupakan permasalahan *self-calibration*, topik yang tidak dibahas pada penelitian ini. Sebuah kamera dikatakan terkalibrasi jika seluruh parameter intrinsik kamera tersebut diketahui nilainya, yaitu jarak fokus lensa (f), dimensi detektor (d_x, d_y), ortogonalitas sumbu detektor (β) dan posisi titik pusat pada bidang citra (u_o, v_o). Parameter intrinsik kamera ini umumnya dinyatakan dalam matriks intrinsik kamera **K** sebagai berikut (Hao, Tai):

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} fd_x & \beta & u_o \\ 0 & fd_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

Dengan asumsi bahwa kamera telah terkalibrasi, maka matriks rotasi dan translasi (**R,t**) dapat ditentukan dari

matriks esensial \mathbf{E} (Faugeras, O.D., dan S. Maybank, 1990). Pada penelitian ini, penentuan matriks esensial dan perhitungan untuk ekstraksi data *attitude* dari matriks esensial dilakukan oleh *software* pelacak video.

2.3 Software Voodoo Camera Tracker

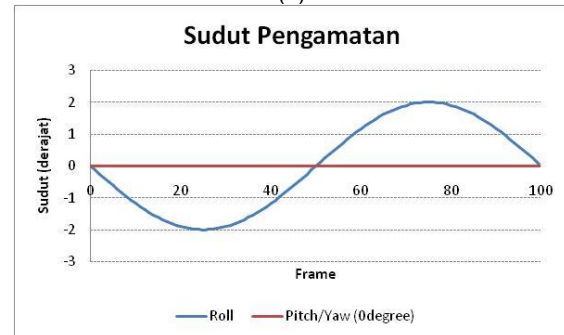
Salah satu *software* pelacak video yang dapat diperoleh secara bebas adalah *Voodoo Camera Tracker* (VCT). Secara umum, VCT akan menerima *input* berupa sejumlah citra dari data video, sedangkan data keluaran yang dihasilkan yaitu berupa parameter kamera, baik intrinsik maupun ekstrinsik. Parameter ekstrinsik kamera yang dihasilkan adalah matriks rotasi dan matriks translasi. Sementara itu kamera video dapat diasumsikan telah terkalibrasi maupun tidak, jadi VCT dapat melakukan kalibrasi intrinsik kamera secara otomatis juga.

Berikut ini diberikan hasil simulasi *software* VCT dalam menghasilkan *attitude* kamera dari data video. *Input* data video yang digunakan merupakan hasil simulator kamera, dengan tujuan agar karakteristik pergerakan kamera selama pengamatan dapat diatur, sehingga kualitas data *attitude* yang dihasilkan VCT dapat dianalisis dengan baik. Gambar 2-2(a) menunjukkan wilayah yang diamati kamera video yang terbagi dalam 100 citra (*frame*), sedangkan Gambar 2-2(b) menunjukkan data *attitude* kamera selama pengamatan berlangsung, dimana pergerakan kamera diasumsikan hanya terjadi pada sumbu *roll*, sedangkan sumbu *pitch* dan *yaw* diasumsikan statis.

Estimasi data *attitude* yang dihasilkan *software* VCT masih berupa matriks rotasi \mathbf{R} , sehingga harus dilakukan transformasi untuk menjadi sudut Euler yaitu *pitch*, *yaw* dan *roll*. Perbandingan data *attitude* hasil estimasi VCT dengan data *attitude* sebenarnya dapat dilihat pada Gambar 2-3.

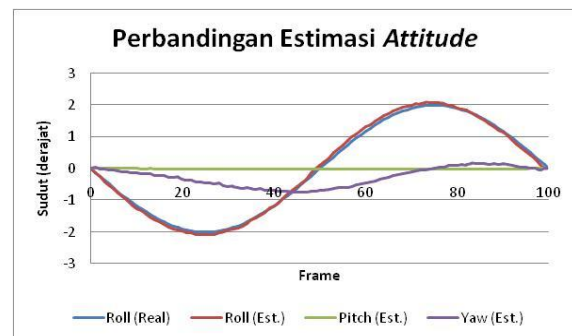


(a)



(b)

Gambar 2-2: Data *input* untuk *software* VCT; (a) Wilayah yang diamati, (b) Karakteristik *attitude* kamera selama pengamatan (citra *input* simulator dari www.geoimage.com.au)



Gambar 2-3: Perbandingan data *attitude* hasil estimasi VCT dengan data sebenarnya

Dari hasil simulasi yang dilakukan, tampak bahwa kualitas estimasi data *attitude* yang dihasilkan sudah cukup baik dengan beberapa catatan. Estimasi pada sumbu *roll* dan *pitch* sudah cukup baik, dengan RMS untuk sumbu *roll* sebesar $0,007^\circ$ dan sumbu *pitch* sebesar $0,0002^\circ$, tetapi tampak bahwa estimasi pada sumbu *yaw* tidak terlalu baik, dengan RMS $0,163^\circ$. Secara keseluruhan, VCT telah dapat mengestimasi pola utama dari data *attitude* kamera tersebut, terutama pada sumbu *roll*. Mengingat bahwa data hasil estimasi ini berfungsi sebagai penunjang data *attitude* utama, yaitu data *star sensor*,

maka kualitas data estimasi tersebut masih dapat diterima. Selanjutnya diperlukan analisis mengenai kualitas data *attitude* gabungan antara data VCT dan data *star sensor*, dalam kaitannya dengan koreksi geometri citra.

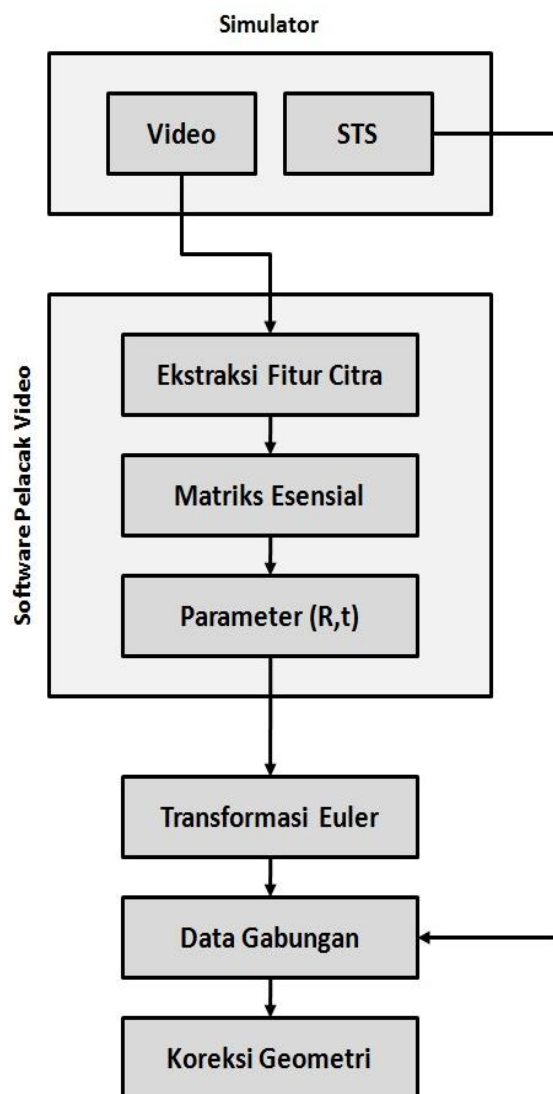
3 ANALISIS KUALITAS ESTIMASI DATA ATTITUDE

Berdasarkan beberapa uraian yang telah disampaikan sebelumnya, secara umum algoritma yang digunakan pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3-1. Sebenarnya data *attitude* yang telah diperoleh dari kamera video pada umumnya memiliki akurasi yang tidak terlalu baik dibandingkan data *attitude star sensor*. Umumnya, data *attitude* yang dihasilkan *star sensor* memiliki akurasi sebesar $0,001^\circ$ untuk sumbu *roll* dan *pitch* dan untuk sumbu *yaw* sebesar $0,014^\circ$ (*Center for Satellite Technology, LAPAN, 2012*). Walaupun demikian, data kamera video dapat digabungkan dengan data *star sensor* dengan tujuan untuk meningkatkan akurasi dan frekuensi sampling data tersebut. Berikut ini dilakukan pengujian dan analisis kualitas data gabungan antara data video dengan data *star sensor*, dilanjutkan dengan penggunaan data gabungan tersebut dalam sistem koreksi geometri sistematis untuk citra *imager pushbroom*.

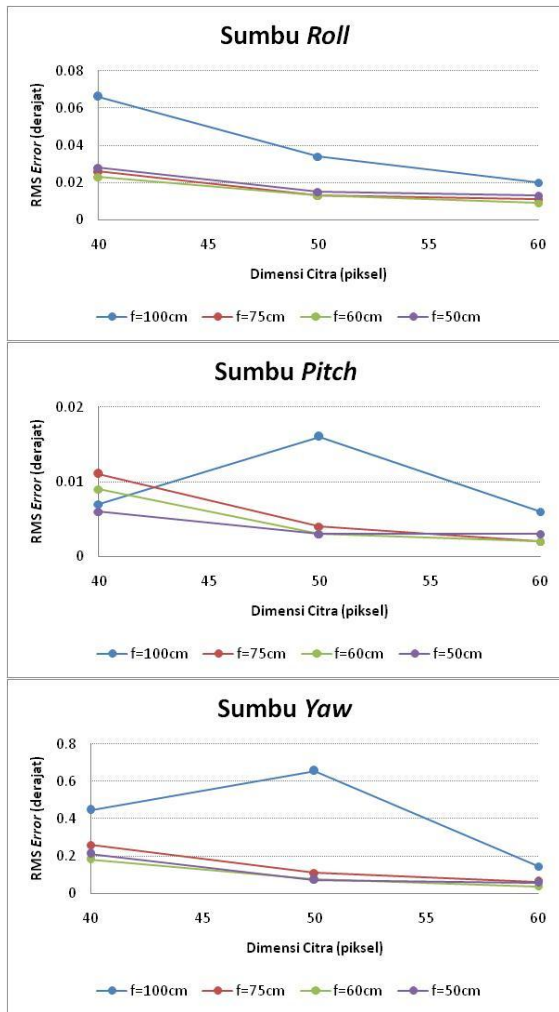
3.1 Faktor Penentu Kualitas Data VCT

Sebelum melakukan pengujian dan analisis penggunaan data *attitude* gabungan pada sistem koreksi geometri sistematis citra, perlu dipelajari faktor apa saja yang dapat menentukan kualitas data estimasi *attitude* yang dihasilkan *software VCT*. Beberapa hal yang akan diteliti adalah lebar sapuan kamera (*field of view, FoV*) dan resolusi citra serta *focal length* dan spektral kamera video yang digunakan. Faktor pertama yaitu luas wilayah citra yang digunakan dalam proses estimasi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, untuk menentukan matriks

esensial maka dibutuhkan beberapa titik fitur pada kedua citra tersebut untuk dibandingkan. Dengan menggunakan luas cakupan wilayah yang lebih besar, dan dengan asumsi resolusi citra sama besar, maka dapat diperkirakan bahwa pemilihan fitur akan lebih semakin fleksibel sehingga kualitas estimasi dapat meningkat. Hasil simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3-2 berikut ini. Tampak bahwa dengan menggunakan citra dengan FoV yang lebih luas maka hasil estimasi data *attitude* yang dihasilkan akan semakin baik. Anomali terjadi pada percobaan dengan $f=100\text{cm}$ dan dimensi piksel 40, dimana hasil estimasi pada sumbu *pitch* dan *yaw* justru lebih baik.



Gambar 3-1: Algoritma penggunaan data kamera video pada modul koreksi geometri sistematis



Gambar 3-2: Pengaruh FoV citra terhadap kualitas estimasi data attitude

Sementara itu, hasil simulasi dengan menggunakan citra dengan cakupan FoV yang sama tetapi dengan resolusi citra yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 3-1 berikut. Tampak bahwa dengan menggunakan citra resolusi tinggi maka estimasi data attitude yang dihasilkan akan semakin baik. Hasil ini sesuai dengan perkiraan bahwa dengan

menggunakan citra resolusi tinggi, pemilihan titik fitur pada kedua citra dapat dilakukan dengan lebih akurat.

Faktor selanjutnya yaitu focal length kamera yang akan menentukan besar Ground Sampling Distance (GSD) sebuah citra. Karena focal length kamera yang tinggi identik dengan resolusi citra yang lebih tinggi maka dapat diperkirakan hasil estimasi akan semakin baik jika menggunakan nilai focal length kamera yang lebih besar. Hasil simulasi menggunakan software VCT dapat dilihat pada Tabel 3-2. Tampak bahwa nilai focal length mempengaruhi kualitas data estimasi dalam bentuk non-linear, dimana hasil terbaik diperoleh pada nilai focal length 0,6 meter. Hal tersebut bertolak belakang terhadap hipotesis awal di atas. Dari hasil percobaan pada Gambar 3-2 di atas juga dapat dilihat bahwa nilai RMS error terkecil umumnya dihasilkan pada percobaan dengan menggunakan nilai f=60cm.

Faktor keempat adalah karakteristik warna (spektral) pada citra yang digunakan dalam proses estimasi. Pada penelitian ini akan dilihat apakah penentuan titik fitur pada citra dalam menentukan matriks esensial dipengaruhi oleh warna citra, atau hanya dipengaruhi oleh bentuk geometri citra saja. Hasil simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3-3. Tampak bahwa citra RGB dan citra grayscale, baik layer merah, hijau dan biru, dapat menghasilkan data estimasi yang relatif sama.

Tabel 3-1: PENGARUH RESOLUSI CITRA TERHADAP KUALITAS ESTIMASI DATA ATTITUDE

Parameter Kamera			Error RMS (derajat)		
Pixel	f(cm)	FoV	Roll	Pitch	Yaw
50	75	0.67	0.013	0.004	0.109
40	60	0.67	0.023	0.009	0.182
60	75	0.80	0.011	0.002	0.061
50	60	0.83	0.013	0.003	0.074
40	50	0.80	0.028	0.006	0.212
60	60	1.00	0.009	0.002	0.038
50	50	1.00	0.015	0.003	0.072

Tabel 3-2: PENGARUH FOCAL LENGTH KAMERA TERHADAP KUALITAS ESTIMASI DATA ATTITUDE

Parameter		Error RMS (derajat)		
Pixel	f(cm)	Roll	Pitch	Yaw
60	100	0.020	0.006	0.143
60	75	0.011	0.002	0.061
60	60	0.009	0.002	0.038
60	50	0.013	0.003	0.056
50	100	0.034	0.016	0.655
50	75	0.013	0.004	0.109
50	60	0.013	0.003	0.074
50	50	0.015	0.003	0.072
40	100	0.066	0.007	0.445
40	60	0.023	0.009	0.182
40	50	0.028	0.006	0.212

Tabel 3-3: PENGARUH SPEKTRAL KAMERA TERHADAP KUALITAS ESTIMASI DATA ATTITUDE

Spektral Citra	Error RMS (derajat)		
	Roll	Pitch	Yaw
Citra RGB	0.020	0.006	0.143
Citra Layer Red	0.019	0.006	0.160
Citra Layer Green	0.020	0.006	0.182
Citra Layer Blue	0.020	0.006	0.329

3.2 Analisis Kualitas Data Attitude VCT

Fokus penelitian ini adalah untuk menghasilkan data attitude dengan frekuensi yang lebih tinggi dari data star sensor. Pada pengamatan yang relatif stabil, data attitude dengan frekuensi tinggi dapat diperoleh dengan melakukan interpolasi data attitude dari star sensor. Kualitas data attitude baru yang dihasilkan cukup baik, dan mungkin saja lebih baik jika dibandingkan dengan data attitude gabungan antara data star sensor dengan data kamera video. Berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan citra pada Gambar 2-2, Tabel 3-4 menunjukkan perbandingan data hasil interpolasi data attitude dari star sensor (direct interpolation) dengan

data hasil gabungan data star sensor dengan data estimasi attitude VCT. Secara garis besar, data gabungan tersebut dihasilkan dengan menyisipkan data perubahan attitude yang diperoleh dari data VCT di antara dua data attitude yang dihasilkan star sensor.

Dari beberapa pengamatan tersebut, tampak bahwa hasil interpolasi dari data star sensor sudah sangat baik. Hal tersebut wajar terjadi karena pengamatan dilakukan pada saat kamera berada pada keadaan yang stabil. Sementara itu, data attitude gabungan antara data star sensor dengan data estimasi VCT lebih buruk dibandingkan hasil interpolasi data star sensor. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada pergerakan stabil, data attitude yang

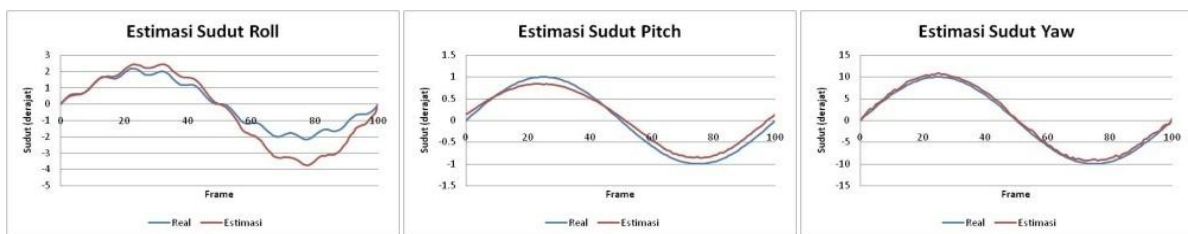
digunakan dalam koreksi geometri citra sebaiknya merupakan data *attitude* dari *star sensor*. Akan tetapi untuk pergerakan wahana yang tidak stabil, hasil interpolasi data *star sensor* tidak selalu dapat diandalkan.

Hasil estimasi *software* VCT untuk pengamatan dengan pergerakan wahana yang tidak terlalu stabil, terutama pada sumbu *roll*, dapat dilihat pada Gambar 3-3. Tampak bahwa untuk sumbu *roll*, terjadi penyimpangan estimasi *attitude* yang cukup signifikan, dengan nilai RMS sebesar 0,815°, walaupun karakteristik *error* tersebut bersifat proporsional. Sementara itu,

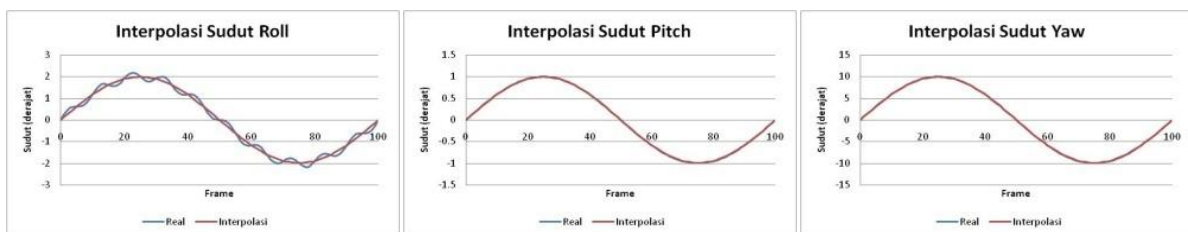
hasil interpolasi linear untuk data *attitude* dari *star sensor* dapat dilihat pada Gambar 3-4, dengan asumsi *star sensor* tersebut memiliki periode sampling sebesar 5 *frame*. Tampak jelas bahwa hasil interpolasi untuk sumbu *roll* tidak terlalu baik, dengan nilai RMS sebesar 0,141°. Hal tersebut disebabkan karena frekuensi pergerakan wahana relatif lebih besar dari frekuensi data *star sensor*. Untuk sumbu *pitch* dan *yaw*, tampak bahwa hasil interpolasi sudah cukup baik. Secara umum, hasil interpolasi data *attitude* akan semakin baik jika frekuensi data *attitude* *star sensor* yang digunakan semakin tinggi.

Tabel 3-4: PERBANDINGAN KUALITAS DATA *ATTITUDE* PADA PERGERAKAN STABIL

Simulasi	Error RMS (derajat)					
	Data Star Sensor			Data Gabungan		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
Pengujian 1	0.013	0	0	0.021	0.0001	0.0006
Pengujian 2	0.006	0.0006	0.006	0.015	0.007	0.14
Pengujian 3	0.0008	0.00008	0.0008	0.022	0.0009	0.608



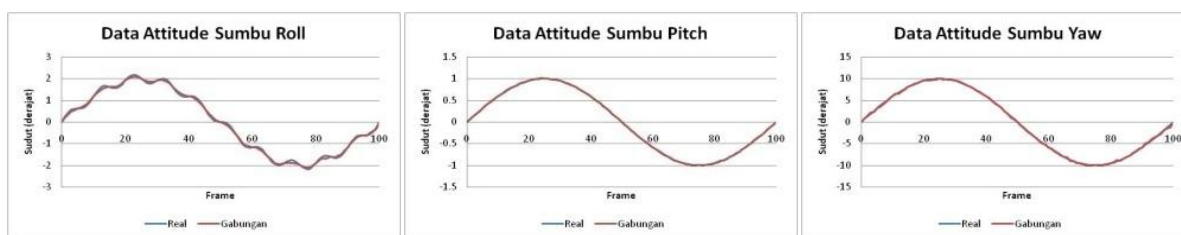
Gambar 3-3: Hasil estimasi data *attitude* oleh *software* VCT



Gambar 3-4: Hasil interpolasi linear data *star sensor*

Secara individual, data *attitude* yang dihasilkan *software* VCT jauh lebih buruk dibandingkan dengan data interpolasi *star sensor*. Salah satu penyebabnya yaitu faktor *drift error* yang terakumulasi, seperti yang dapat dilihat untuk hasil estimasi sudut *roll*. Walaupun demikian, dari kedua data *attitude* tersebut, yaitu data *attitude* dari *star sensor* sebelum proses interpolasi dan juga data *attitude* hasil estimasi *software* VCT, dapat direkonstruksi data *attitude* gabungan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3-5 berikut. Secara visual, tampak bahwa data *attitude* gabungan tersebut memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan data *attitude* hasil interpolasi data *star sensor*. Tabel 3-5 berikut menunjukkan perbandingan akurasi data *attitude* gabungan tersebut dengan data *attitude* hasil interpolasi data *star sensor* untuk beberapa pergerakan wahana yang tidak stabil.

Pada simulasi ini digunakan beberapa jenis pergerakan yang berbeda, yang diwakili oleh pengujian 1, 2 dan 3, dan untuk setiap pengujian tersebut divariasikan beberapa nilai parameter intrinsik kamera yang digunakan. Seluruh pergerakan yang digunakan dibentuk dari beberapa sinyal sinusoidal dengan nilai frekuensi dan amplitudo yang beragam. Dari beberapa hasil simulasi, tampak bahwa data gabungan antara data *star sensor* dan data VCT memiliki akurasi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan data *attitude* hasil interpolasi data *star sensor*, terutama untuk data *attitude* pada sumbu *roll*. Besarnya tingkat perbaikan yang dihasilkan bervariasi bergantung pada karakteristik pergerakan wahana dan nilai parameter intrinsik kamera yang digunakan. Secara umum, semakin *random* pergerakan wahana tersebut, maka semakin besar tingkat perbaikan yang dihasilkan.



Gambar 3-5: Hasil penggabungan data *star sensor* dengan data VCT

Tabel 3-5: PERBANDINGAN KUALITAS DATA *ATTITUDE* PADA PERGERAKAN TIDAK STABIL

Simulasi	Error RMS (derajat)					
	Data Star Sensor			Data Gabungan		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
Pengujian 1a	0.141	0.006	0.063	0.061	0.006	0.149
Pengujian 1b	0.141	0.006	0.063	0.064	0.003	0.072
Pengujian 1c	0.141	0.006	0.063	0.063	0.004	0.041
Pengujian 2a	0.141	0	0	0.037	0.00004	0.002
Pengujian 2b	0.141	0	0	0.028	0.00001	0.001
Pengujian 2c	0.141	0	0	0.018	0.00001	0.0008
Pengujian 3	0.071	0.007	0.071	0.020	0.006	0.143

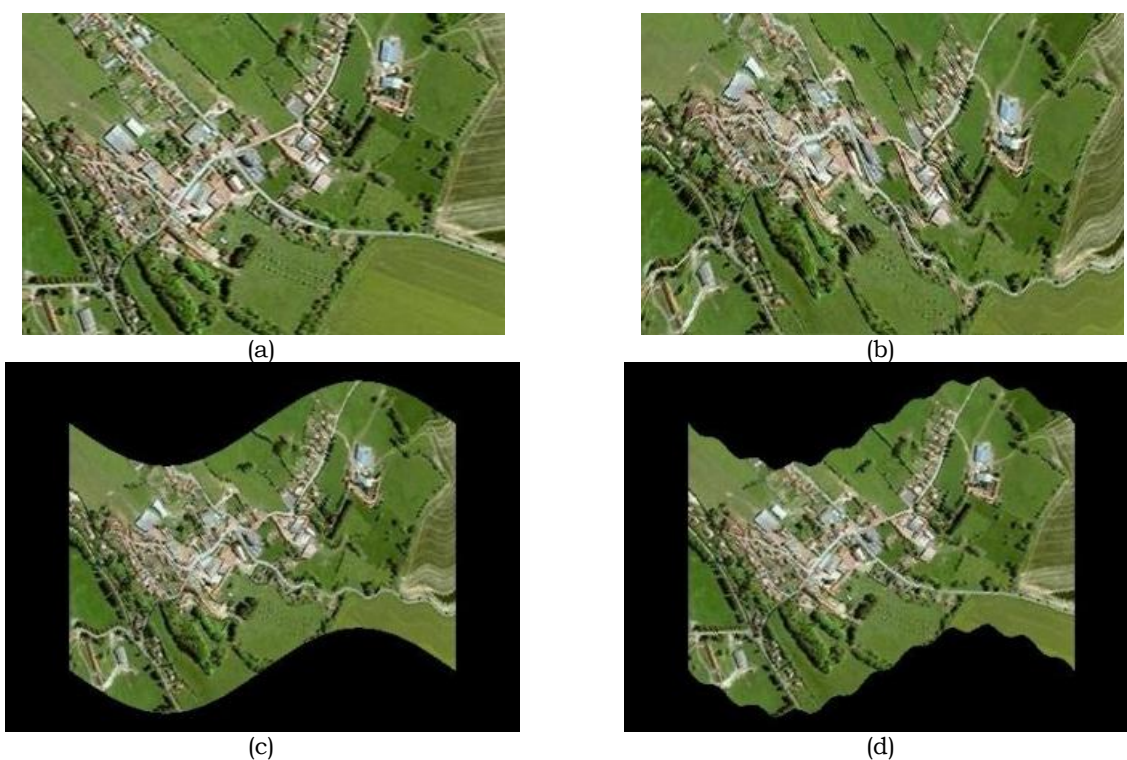
3.3 Simulasi Koreksi Geometri Sistematis

Untuk dapat melihat pengaruh perbedaan kualitas kedua data *attitude* tersebut, data *attitude* gabungan dan data *attitude* dari *star sensor* digunakan untuk keperluan koreksi geometri sistematis citra, khususnya citra *imager pushbroom*. Modul koreksi yang digunakan adalah modul koreksi geometri sistematis citra yang telah dikembangkan di Pusat Teknologi Satelit sebagai bagian dari sistem pengolah data citra satelit Lapan-A3.

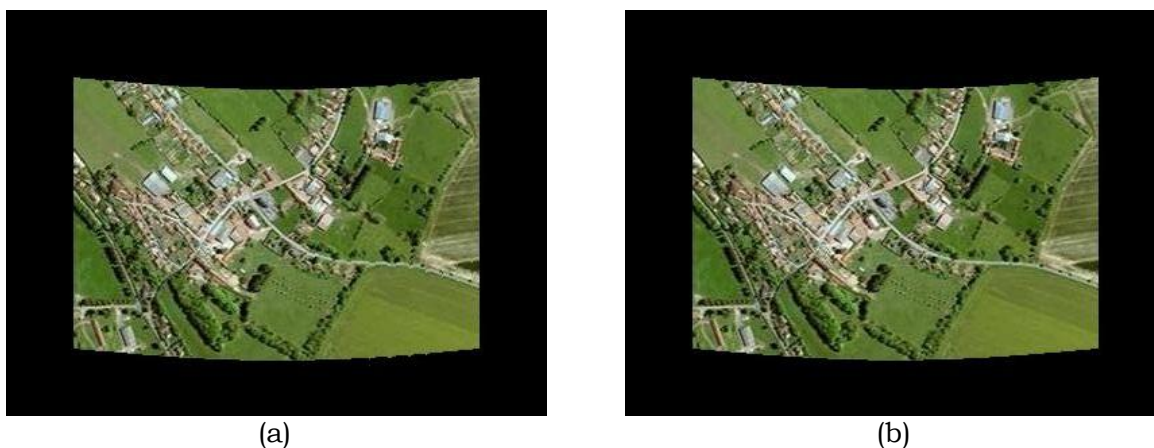
Perbandingan hasil koreksi geometri sistematis dengan menggunakan kedua data *attitude* di atas dapat dilihat pada Gambar 3-6 dimana Gambar 3-6(a) merupakan citra ideal untuk wilayah yang diamati sedangkan Gambar 3-6(b) menunjukkan citra observasi yang dihasilkan ketika pergerakan wahana tidak stabil (arah kecepatan wahana dari kiri ke kanan). Tampak bahwa citra observasi mengalami distorsi geometri yang sangat besar akibat ketidakstabilan wahana tersebut. Semakin tidak stabil pergerakan sebuah wahana, maka *jitter*

yang terjadi pada citra tersebut akan semakin terlihat dengan jelas. Gambar 3-6(c) dan 3-6(d) merupakan citra hasil koreksi geometri sistematis dengan menggunakan data *attitude* berdasarkan salah satu pengujian pada Tabel 3-6.

Untuk memudahkan analisis visual, pada simulasi ini digunakan pengujian yang memiliki perbedaan akurasi data *attitude* terbesar, dengan tujuan agar perbedaan citra yang dihasilkan setelah koreksi dapat dilihat secara jelas. Dari Gambar 3-6 tampak bahwa dengan menggunakan data gabungan antara data *star sensor* dan data kamera video, maka citra hasil koreksi geometri sistematis akan jauh lebih baik. Hal tersebut disebabkan karena data *attitude star sensor* tidak dapat mendeteksi atau mengestimasi secara baik pergerakan wahana yang berada di antara dua titik sampling data *attitude*. Sementara itu, data *attitude* gabungan dapat mengestimasi pergerakan tersebut karena frekuensi data *attitude* yang dimiliki lebih besar. Walaupun demikian, tetap terdapat *error* pada citra hasil koreksi yang dihasilkan.



Gambar 3-6: Perbandingan citra hasil koreksi sistematis untuk pergerakan tidak stabil; (a) Citra ideal, (b) Citra observasi, (c) Data *attitude star sensor*, (d) Data *attitude* gabungan (citra input simulator dari www.geoimage.com.au)



Gambar 3-7: Perbandingan citra hasil koreksi sistematis untuk pergerakan stabil, (a) Data Gabungan, (b) Data *star sensor* (citra input simulator dari www.geoimage.com.au)

Sebaliknya untuk tipe pergerakan stabil seperti pada Tabel 3-4, tidak terdapat perbedaan yang signifikan untuk data *attitude* yang dihasilkan, sehingga citra hasil koreksi geometri sistematis yang dihasilkan juga tidak berbeda jauh. Hasil simulasi koreksi geometri yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3-7. Jika diperhatikan dengan lebih teliti, citra hasil koreksi dengan menggunakan data *attitude* dari *star sensor* justru tampak lebih baik.

Dari kedua simulasi koreksi geometri sistematis yang dilakukan tersebut, tampak perbedaan yang cukup jelas. Pada pergerakan yang tidak stabil, data kamera video sangat membantu dalam proses koreksi geometri sistematis. Sementara itu pada pergerakan yang stabil, data kamera video sama sekali tidak membantu, bahkan dapat dikatakan memperburuk proses koreksi geometri.

4 PEMBAHASAN

Kamera video dibutuhkan dalam koreksi geometri sistematis citra *imager pushbroom* karena dapat menghasilkan data *attitude* dengan frekuensi yang cukup tinggi yaitu sekitar 20-25 Hz. Data *attitude* dengan frekuensi tinggi tersebut sangat membantu untuk mengoreksi citra yang dihasilkan pada pengamatan ketika pergerakan wahana tidak stabil. Hal tersebut ditunjukkan oleh hasil simulasi di atas, baik dilihat dari sisi kualitas data *attitude* itu sendiri

maupun dari kualitas citra hasil koreksi geometri sistematis citra. Sementara itu untuk pergerakan yang stabil, data *attitude* yang dihasilkan tidak lebih baik dari data *star sensor*. Bahkan untuk beberapa pengujian tampak bahwa data interpolasi *star sensor* jauh lebih baik dibandingkan dengan hasil leburan data video dengan *star sensor*. Kedua hal tersebut menunjukkan bahwa data *attitude* yang dihasilkan oleh kamera video sebaiknya hanya digunakan dalam proses koreksi geometri jika pengamatan dilakukan pada keadaan tidak stabil saja. Selain itu dari seluruh hasil simulasi yang dilakukan tampak bahwa peningkatan akurasi data *attitude* tersebut hanya terjadi pada sumbu *roll* saja. Perbaikan pada sumbu *pitch* tidak terlalu signifikan dan hasil estimasi pada sumbu *yaw* dapat dikatakan cukup buruk untuk seluruh simulasi yang dilakukan. Dengan demikian sebaiknya data *attitude* kamera video yang digunakan dalam koreksi geometri sistematis hanyalah data *attitude* pada sumbu *roll* saja, sedangkan kedua sumbu lain sebaiknya tetap menggunakan data *star sensor*.

Untuk menentukan spesifikasi kamera video yang akan digunakan, dari beberapa hasil simulasi yang telah dilakukan tampak bahwa akurasi data estimasi yang dihasilkan akan semakin tinggi jika data citra yang digunakan memiliki resolusi tinggi dan FoV yang

lebih luas, sedangkan warna citra tidak mempengaruhi kualitas data *attitude* yang dihasilkan. Walaupun citra resolusi tinggi identik dengan kamera dengan panjang *focal length* yang lebih besar, tetapi *focal length* itu sendiri tidak menentukan kualitas data *attitude* yang dihasilkan secara linear. Hal tersebut dapat disebabkan karena dengan menggunakan kamera video standar dengan dimensi piksel tertentu, umumnya 640x480, maka kamera dengan *focal length* besar akan menghasilkan citra resolusi tinggi dengan FoV yang lebih sempit. Sebaliknya, kamera dengan *focal length* yang lebih rendah akan menghasilkan citra resolusi rendah dengan FoV yang lebih luas. Pengaruh kedua faktor tersebut yaitu resolusi dan FoV citra, akan saling meniadakan sehingga menyebabkan pengaruh perbedaan *focal length* tidak bersifat linear dalam menentukan kualitas data *attitude* yang dihasilkan.

Satu hal penting lainnya yang harus diperhatikan dalam penggabungan data kamera video dengan data *star sensor* adalah karakteristik data *attitude* yang dihasilkan kamera video tersebut yang bersifat relatif (perubahan sudut). Perlu dikembangkan metode yang lebih baik lagi dalam proses penggabungan kedua data tersebut sehingga dapat dihasilkan data *attitude* dengan kualitas yang lebih baik lagi. Penerapan algoritma filter Kalman non-linear dapat dijadikan salah satu solusi terbaik untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Selain itu perlu dikaji efisiensi dan efektifitas penggunaan kamera video dalam perspektif sistem satelit secara keseluruhan, baik meliputi penambahan daya, dimensi satelit, sistem transmisi dan peningkatan biaya yang harus dikeluarkan untuk sensor kamera video tersebut.

5 KESIMPULAN

Dari beberapa kegiatan simulasi dan analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa data kamera video

dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan data *attitude* satelit dengan frekuensi yang setara dengan *frame rate* kamera video tersebut. Data *attitude* dengan frekuensi tinggi ini dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas data *attitude star sensor*, terutama data yang diperoleh dalam pengamatan yang relatif tidak stabil, khususnya untuk data *attitude* pada sumbu *roll*. Dengan menggunakan data *attitude* gabungan yang lebih baik, maka kualitas citra hasil koreksi geometri sistematis juga akan semakin meningkat. Sebaliknya untuk mengoreksi citra yang dihasilkan pada saat pergerakan satelit yang stabil, disarankan hanya menggunakan data *attitude* dari *star sensor* saja, karena akan memberikan hasil yang lebih akurat. Untuk dapat menghasilkan estimasi data *attitude* yang baik, disarankan untuk menggunakan kamera video dengan resolusi tinggi tetapi dengan tetap menjaga lebar pandangan (FoV) yang cukup luas. Dengan demikian, nilai *focal length* kamera yang besar tidak menjamin akan memberikan hasil estimasi yang lebih baik karena akan menurunkan lebar pandangan kamera. Secara keseluruhan, penggunaan kamera video pada satelit eksperimen sangat disarankan untuk memastikan bahwa citra yang dihasilkan oleh *imager pushbroom* dapat dikoreksi dengan baik dalam berbagai kondisi pengamatan.

DAFTAR RUJUKAN

- Bartoli, A., dan S.I. Olsen, *3D Computer Vision, Lecture 16: Camera Motion from Two Views Relationship*, CNRS-LASMEA, Clermont-Ferrand.
- Center for Satellite Technology, LAPAN, 2012. *Lapan-A2 Technical Documentation*.
- Faugeras, O.D., dan S. Maybank, 1990. *Motion from Point Matches: Multiplicity of Solutions*, International Journal of Computer Vision, Hal. 225-246.

- Fu, K.S., R.C. Gonzalez, dan C.S.G. Lee, 1987. *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, New York: McGraw-Hill.
- Hakim, P.R., A. Rahman, Suhermanto, dan E. Rachim, 2012, *Pengolahan Data Ancillary untuk Meningkatkan Akurasi Koreksi Geometri Sistematis*, Publikasi Ilmiah Pengembangan Satelit Mikro LAPAN: Sistem, Subsistem dan Misi Operasi, Hal. 77-94, IPB Press, Bogor.
- Hakim, P.R., E. Rachim, A. Rahman, dan W. Hasbi, 2013, *Model Koreksi Citra Imager Pushbroom Akibat Distorsi Geometri Stokastik dengan Metode Korelasi Intensitas Pikel Citra*, Publikasi Ilmiah Pengembangan Teknologi Satelit di Indonesia: Sistem, Subsistem dan Misi Operasi, Hal. 105-116, IPB Press, Bogor.
- Hakim, P.R., W. Hasbi, dan A.H. Syafrudin, 2014. *ADCS Requirements of Lapan-A3 Satellite Based on Image Geometry Analysis*, belum diterbitkan, Pusat Teknologi Satelit, Bogor.
- Hartley, R.I., 1993. *An Investigation of the Essential Matrix*, G.E. CRD, Schenectady, New York.
- imagine.enpc.fr/~moulonp/openMVG/coreFeatures.html, diakses pada 1 April 2014.
- Tao, Hai, *Camera Calibration, CMPE 264: Image Analysis and Computer Vision*, University of California at Santa Cruz.
- Zhang, Zhengyou, 1999. *Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations*, Microsoft Research, Redmond.
- www.geoimage.com.au/services/remote-sensing-expertise, diakses pada 20 Juli 2013.
- www.viscoda.com/index.php/en/products/non-commercial/voodoo-camera-tracker, diakses pada 10 Februari 2014.