

MODEL KOREKSI GEOMETRI SISTEMATIK DATA *IMAGER PUSHBROOM* MENGGUNAKAN METODE PROYEKSI KOLINEAR [PUSHBROOM IMAGER DATA SYSTEMATIC GEOMETRIC CORRECTION MODEL USING COLLINEAR PROJECTION METHOD]

Patria Rachman Hakim, Abdul Rahman, Suhermanto, Elvira Rachim
Peneliti Pusat Teknologi Satelit, Lapan
e-mail: patriarachmanhakim@yahoo.com

ABSTRACT

LAPAN-A3 satellite, which is planned to be launched on 2014, will carry a 4 channels pushbroom imager. An image pre-processing is needed to assure that there will be no distortion on the output image data, particularly a systematic distortion, whether it is geometric or radiometric. Systematic geometric correction is intended to eliminate geometric distortion which are predictable such as view angle, earth curvature, earth rotation and varying camera orientation during observation. The colinear projection method is used in order to transform every pixel on the image into earth coordinate points. Systematic geometric correction needs satellite ancillary data such as position and camera orientation from GPS and star sensor. This research simulated dummy data as substitute to distorted image and ancillary data for designing and simulation purpose. The simulation result shows that the systematic geometric correction algorithm is able to correct the distortion occurred in image. A corrected image with 1000 meter accuracy can be achieved with 0,1 degree orientation data accuracy while 0,01 degree orientation data accuracy produces an even better 100 meter accuracy corrected image for nadir observation.

Key words: *Systematic geometric correction, Pushbroom imager, Colinear projection, Ancillary data*

ABSTRAK

Satelit LAPAN-A3 yang akan diluncurkan pada tahun 2014 rencananya membawa *imager pushbroom* 4 kanal. Diperlukan tahap pra-pengolahan citra untuk menjamin bahwa data yang dihasilkan terbebas dari berbagai distorsi, khususnya distorsi yang bersifat sistematis, baik untuk aspek geometrik maupun radiometrik. Koreksi geometri sistematis bertujuan untuk menghilangkan distorsi geometri yang dapat diprediksi dari awal seperti faktor panorama, kelengkungan bumi, rotasi bumi dan variasi orientasi kamera selama pengamatan berlangsung. Metode yang digunakan adalah proyeksi kolinear dimana setiap piksel pada bidang citra akan dipetakan menjadi titik-titik koordinat di permukaan bumi. Koreksi geometri sistematis ini membutuhkan data *ancillary* yang memuat data posisi dan orientasi kamera yang diperoleh dari GPS dan *star sensor*. Pada penelitian ini disimulasikan data *dummy* sebagai pengganti data citra dan data *ancillary* untuk kemudahan perancangan dan simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma koreksi geometri sistematis yang diterapkan dapat mengoreksi distorsi yang terjadi pada citra. Untuk tingkat akurasi data orientasi sebesar 0,1 derajat diperoleh citra hasil koreksi dengan akurasi 1000 meter sedangkan untuk akurasi data orientasi 0,01 derajat diperoleh citra terkoreksi dengan akurasi sebesar 100 meter untuk pengamatan di sekitar nadir.

Kata kunci: *Koreksi geometri sistematis, Imager pushbroom, Proyeksi kolinear, Data ancillary*

1 PENDAHULUAN

Salah satu muatan pada satelit LAPAN-A3 adalah sensor kamera *pushbroom line-scanner* (Syafrudin, A. H., et al., 2011). *Imager* ini terdiri dari susunan detektor CCD dalam satu garis dan akan memindai garis yang tegak lurus terhadap arah kecepatan satelit. *Imager pushbroom* dapat menghasilkan citra dengan resolusi yang lebih baik dibandingkan dengan kamera matriks dan memiliki struktur mekanik yang lebih sederhana dibandingkan dengan *imager whiskbroom*. Satelit Lapan-A3 diharapkan dapat menghasilkan citra satelit yang dapat dimanfaatkan oleh pihak lain untuk dilakukan berbagai jenis pengolahan citra seperti identifikasi penutupan lahan permukaan bumi. Untuk dapat menghasilkan kualitas citra *imager pushbroom* yang baik maka diperlukan beberapa tahap pengolahan citra.

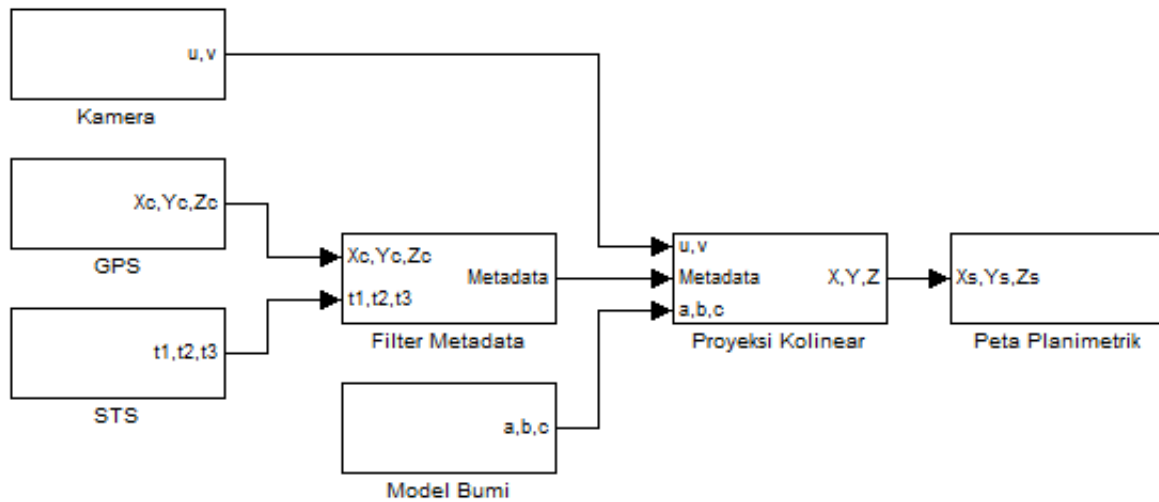
Secara garis besar pengolahan data citra satelit dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu pra-pengolahan citra dan pasca-pengolahan citra. Pra-pengolahan citra merupakan pengolahan citra untuk menghasilkan citra yang akurat baik secara geometri maupun intensitas citra yang dihasilkan sedangkan pasca-pengolahan citra merupakan pemanfaatan data citra tersebut untuk berbagai keperluan aplikasi seperti pengenalan lahan dan pemetaan permukaan bumi. Pra-pengolahan citra dapat dibagi menjadi dua yaitu koreksi geometrik untuk memperbaiki posisi dan orientasi citra dan koreksi radiometrik untuk memperbaiki intensitas citra yang dihasilkan. Pada kegiatan ini dilakukan penelitian mengenai koreksi geometrik untuk mengoreksi distorsi citra yang diakibatkan oleh distorsi geometri sistematis.

Tujuan utama koreksi geometri sistematis adalah untuk menghilangkan distorsi geometrik pada citra yang sudah dapat diperkirakan seperti pengaruh sistem optik yang digunakan, faktor kelengkungan dan rotasi bumi serta

variasi sudut pengamatan kamera. Koreksi geometri sistematis bekerja berdasarkan informasi data *ancillary* berupa data posisi dan *attitude* kamera untuk menghasilkan peta planimetrik dengan tingkat akurasi yang memadai (Cramer, M., et al., 2000 dan Hutton, J., 2005). Koreksi sistematis ini umumnya dilakukan oleh pemilik satelit agar citra satelit yang dihasilkan dapat didistribusikan kepada pihak lain dengan tingkat akurasi yang cukup baik sehingga dapat dilakukan pengolahan lanjutan yang lebih akurat.

Terdapat beberapa metode yang umum digunakan dalam koreksi geometri sistematis. Pada prinsipnya semua metode koreksi tersebut menggunakan data *ancillary* untuk mengoreksi citra tetapi dengan pendekatan yang berbeda. Metode pertama yang umum digunakan adalah metode *distortion-based* yaitu suatu metode yang memodelkan setiap distorsi geometri sistematis dalam sebuah matriks (Indradi, 2012). Metode kedua adalah metode *point-based* yaitu suatu metode yang memetakan koordinat piksel pada bidang citra menjadi koordinat titik di permukaan bumi menggunakan persamaan aljabar dan vektor tiga dimensi (Maryanto, Ahmad, 2012). Pada penelitian ini digunakan metode *point-based* karena lebih sederhana. Algoritma model koreksi geometri sistematis yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 1-1.

Prinsip kerja algoritma tersebut adalah sebagai berikut. Data *ancillary* (metadata) berupa posisi dan *attitude* kamera yang dihasilkan GPS dan *star sensor* diinterpolasi untuk menyesuaikan dengan laju data (u,v) yang dihasilkan kamera. Dengan mengetahui data citra (u,v) , posisi dan *attitude* kamera serta model permukaan bumi maka proyeksi koordinat (u,v) di permukaan bumi dapat dihitung menggunakan persamaan proyeksi kolinear. Dengan melakukan tahapan koreksi tersebut diharapkan dapat dihasilkan peta planimetrik dengan tingkat akurasi yang cukup baik.



Gambar 1-1: Algoritma koreksi geometri sistematis

Untuk menghasilkan peta dengan akurasi tinggi maka harus dilakukan koreksi geometri nonsistematis dengan menggunakan sebuah citra referensi dengan beberapa buah *Ground Control Point* (GCP).

Pada penelitian ini tidak dilakukan koreksi geometri terhadap distorsi intrinsik kamera yang disebabkan oleh karakteristik sistem kamera yang digunakan karena diasumsikan bahwa distorsi ini sudah dapat dikoreksi oleh produsen kamera. Selain itu faktor *Digital Elevation Model* (DEM) juga belum diperhitungkan dalam perancangan koreksi geometri sistematis ini.

2 MODEL KOREKSI

Pada koreksi geometri sistematis dengan menggunakan metode *point-based*, setiap titik piksel pada bidang citra diproyeksikan menjadi titik koordinat di permukaan bumi. Untuk itu diperlukan sebuah model persamaan proyeksi untuk *imager* yang digunakan. Berikut ini akan diturunkan model persamaan proyeksi *imager* yang menyatakan hubungan antara posisi suatu obyek di bidang kamera (koordinat piksel citra) dengan posisi obyek tersebut di permukaan bumi (*longitude, latitude*). Prinsip utama dari model proyeksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah persamaan proyeksi kolinear berdasarkan konsep transformasi kerangka koordinat

dan teori homografi. Selain itu, karakteristik bentuk bumi yang tidak bulat sempurna (elipsoid dengan tipe *oblate*) juga disertakan dalam model proyeksi *imager pushbroom* ini.

2.1 Persamaan Proyeksi Kolinear

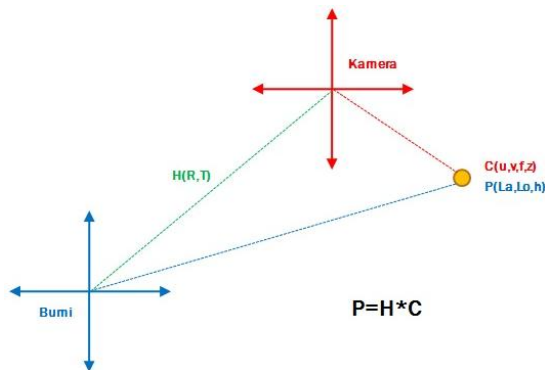
Persamaan proyeksi kolinear merupakan suatu persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara koordinat suatu obyek pada ruang tiga dimensi (X,Y,Z) terhadap koordinat proyeksi obyek tersebut pada bidang dua dimensi (u,v) yang dihasilkan oleh suatu sensor kamera. Dengan menggunakan model kamera *pinhole*, maka proyeksi posisi (x,y) dari suatu piksel (u,v) yang dinyatakan berdasarkan sistem kerangka koordinat kamera dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$x = \frac{z-f}{f} u \tag{2-1}$$

$$y = \frac{z-f}{f} v \tag{2-2}$$

Pada persamaan tersebut, f merupakan panjang fokus *imager* dan (u,v) merupakan jarak piksel dari titik pusat kamera. Koordinat (x, y, z) merupakan posisi titik proyeksi piksel (u,v) pada ruang tiga dimensi dari pusat koordinat kamera. Karena kamera *pushbroom* hanya memiliki sebuah baris maka dapat ditetapkan bahwa $u=0$ tetapi untuk penurunan rumus selanjutnya tetap digunakan bentuk umum kamera matriks.

Titik proyeksi pada persamaan (2-1) dan (2-2) dinyatakan dalam koordinat kamera yang bergerak bersama satelit. Untuk menyatakan titik proyeksi ini berdasarkan kerangka koordinat bumi maka dibutuhkan transformasi koordinat yang dapat diilustrasikan pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Hubungan kerangka koordinat bumi-kamera

Matriks transformasi homogen **H** adalah matriks yang menyatakan hubungan kerangka koordinat kamera dengan kerangka koordinat bumi. Matriks **H** terdiri dari matriks rotasi **R** yang merupakan fungsi dari *attitude* kamera dan matriks translasi **T** yang merupakan fungsi dari nilai *attitude* dan posisi kamera. Matriks rotasi **R** juga dikenal sebagai matriks kosinus arah dimana pada penelitian ini menggunakan rumus sebagai berikut (Fu, K.S., et al., 1987):

$$R = \begin{bmatrix} C_1C_3 & -C_1S_3 & S_1 \\ C_2S_3 + C_3S_1S_2 & C_2C_3 - S_1S_2S_3 & -C_1S_2 \\ S_2S_3 - C_2C_3S_1 & C_3S_2 + C_2S_1S_3 & C_1C_2 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Operator S_i dan C_i merupakan $\sin(\theta_i)$ dan $\cos(\theta_i)$ dimana (θ_i) merupakan sudut orientasi kamera dalam format sudut euler.

Dengan melakukan operasi matriks maka persamaan kolinear dapat diturunkan sebagai berikut:

$$X = z \left(\frac{R'_{11}u + R'_{12}v}{f} + R'_{13} \right) + T'_x \quad (2-4)$$

$$Y = z \left(\frac{R'_{21}u + R'_{22}v}{f} + R'_{23} \right) + T'_y \quad (2-5)$$

$$Z = z \left(\frac{R'_{31}u + R'_{32}v}{f} + R'_{33} \right) + T'_z \quad (2-6)$$

Pada persamaan kolinear ini terdapat tiga buah persamaan linear dan empat buah variabel maka dengan mengetahui data *attitude* dan posisi kamera (**R**, **T**), setiap koordinat (u, v) dapat dipetakan menjadi koordinat (X, Y, Z) sepanjang garis dengan nilai kedalaman z . Untuk dapat menentukan solusi tunggal (unik) dari persamaan kolinear ini maka dibutuhkan sebuah persamaan yang menyatakan bidang yang dipotong oleh garis tersebut. Untuk kasus sederhana dimana nilai $Z=0$ (permukaan bumi bersifat planar) maka persamaan kolinear yang dihasilkan adalah:

$$z = \frac{-T'_z f}{R'_{31}u + R'_{32}v + R'_{33}f} \quad (2-7)$$

$$X = T'_x - T'_z \left(\frac{R'_{11}u + R'_{12}v + R'_{13}f}{R'_{31}u + R'_{32}v + R'_{33}f} \right) \quad (2-8)$$

$$Y = T'_y - T'_z \left(\frac{R'_{21}u + R'_{22}v + R'_{23}f}{R'_{31}u + R'_{32}v + R'_{33}f} \right) \quad (2-9)$$

Persamaan kolinear di atas menunjukkan bahwa titik koordinat (X, Y, Z) dapat ditentukan berdasarkan posisi piksel (u, v) dengan bantuan informasi data *ancillary* berupa *attitude* dan posisi kamera $(X_c, Y_c, Z_c, t_1, t_2, t_3)$.

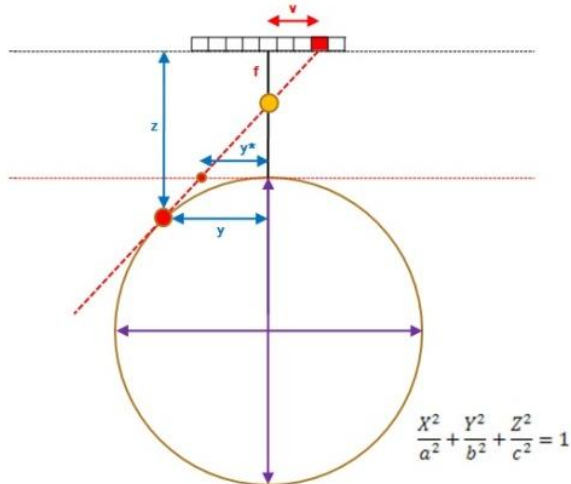
2.2 Karakteristik Kelengkungan Bumi

Pada proyeksi kolinear tersebut permukaan bumi diasumsikan bersifat datar, suatu asumsi yang dapat dibenarkan jika pengamatan kamera dilakukan pada wilayah yang sempit. Untuk suatu pengamatan pada wilayah yang cukup luas maka bentuk permukaan bumi yang sebenarnya harus diperhitungkan. Untuk menyertakan pengaruh kelengkungan bumi diasumsikan bumi memiliki permukaan elipsoid dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2-10)$$

Ilustrasi pengaruh distorsi kelengkungan bumi dapat dilihat pada Gambar 2-2 berikut ini. Berdasarkan gambar tersebut tampak bahwa dengan

adanya pengaruh kelengkungan bumi maka terdapat perbedaan posisi proyeksi piksel v , yaitu y (posisi sebenarnya) dan y' (posisi yang mengalami distorsi).



Gambar 2-2: Distorsi kelengkungan bumi

Pada persamaan elipsoid di atas, (a,b,c) menyatakan derajat elipsitas dimana nilai $a=b=c$ merupakan fungsi untuk permukaan bola. Bentuk permukaan bumi tidak berbentuk bola sempurna tetapi berbentuk elipsoid bertipe *oblate* dengan nilai diameter equator $a=b=6378\text{km}$ dan nilai diameter kutub $c=6357\text{km}$. Pada penelitian ini diasumsikan permukaan bumi berbentuk bola dengan diameter rata-rata $a= b= c= r= 6371\text{km}$ (www.en.wikipedia.org/wiki/Earth_radius).

Untuk model permukaan bola sempurna, dengan melakukan beberapa proses substitusi persamaan (2-4), (2-5) dan (2-6) ke persamaan (2-10) maka nilai kedalaman z dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Az^2 + Bz + C = 0 \tag{2-11}$$

Dimana (A,B,C) merupakan konstanta hasil penyederhanaan. Dari persamaan kuadrat di atas maka nilai kedalaman z dapat ditentukan dengan menggunakan nilai kedalaman terdekat dari dua nilai yang dihasilkan. Dengan mengetahui nilai kedalaman z tersebut maka koordinat (X, Y, Z) di permukaan bumi dapat ditentukan menggunakan persamaan (2-4), (2-5) dan (2-6).

3 ALGORITMA PENGOLAHAN DATA

3.1 Diagram Alir Koreksi

Dengan menggunakan model persamaan proyeksi kolinear tersebut, data posisi piksel pada bidang citra beserta data *ancillary* berupa data posisi dan orientasi kamera digunakan untuk menentukan posisi piksel tersebut di permukaan bumi. Jika pengamatan dilakukan pada wilayah yang cukup luas maka pengaruh kelengkungan bumi dimodelkan dengan persamaan elipsoid atau persamaan bola untuk menyederhanakan perhitungan. Berdasarkan gambaran umum dan penurunan rumus yang telah dijelaskan di atas maka diagram alir (*flowchart*) koreksi geometri sistematis yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 3-1.

Dengan mengikuti algoritma pada Gambar 3-1 maka diharapkan distorsi geometri sistematis yang disebabkan karena adanya faktor panorama, kelengkungan bumi dan variasi sudut orientasi kamera dapat dikoreksi. Sedangkan distorsi rotasi bumi tidak dimodelkan dan dikoreksi secara eksplisit tetapi persamaan proyeksi kolinear secara tidak langsung sudah dapat mengatasi permasalahan ini.

3.2 Pengolahan Data Ancillary Satelit

Model koreksi geometri sistematis ini memerlukan kualitas data *ancillary* yang baik sehingga diperlukan suatu pengolahan untuk menjamin kualitas data yang digunakan baik dalam hal akurasi maupun periode *sampling* data yang digunakan. Algoritma dari pengolahan data *ancillary* ini diluar topik penelitian tetapi berikut ini akan dijelaskan gambaran umum mengenai pengolahan data *ancillary* tersebut.

Dari persamaan proyeksi kolinear di atas tampak bahwa data posisi dan *attitude* kamera sangat berperan dalam menentukan posisi obyek di permukaan bumi dimana untuk setiap baris pengamatan (orde dalam milidetik) dibutuhkan nilai posisi dan orientasi

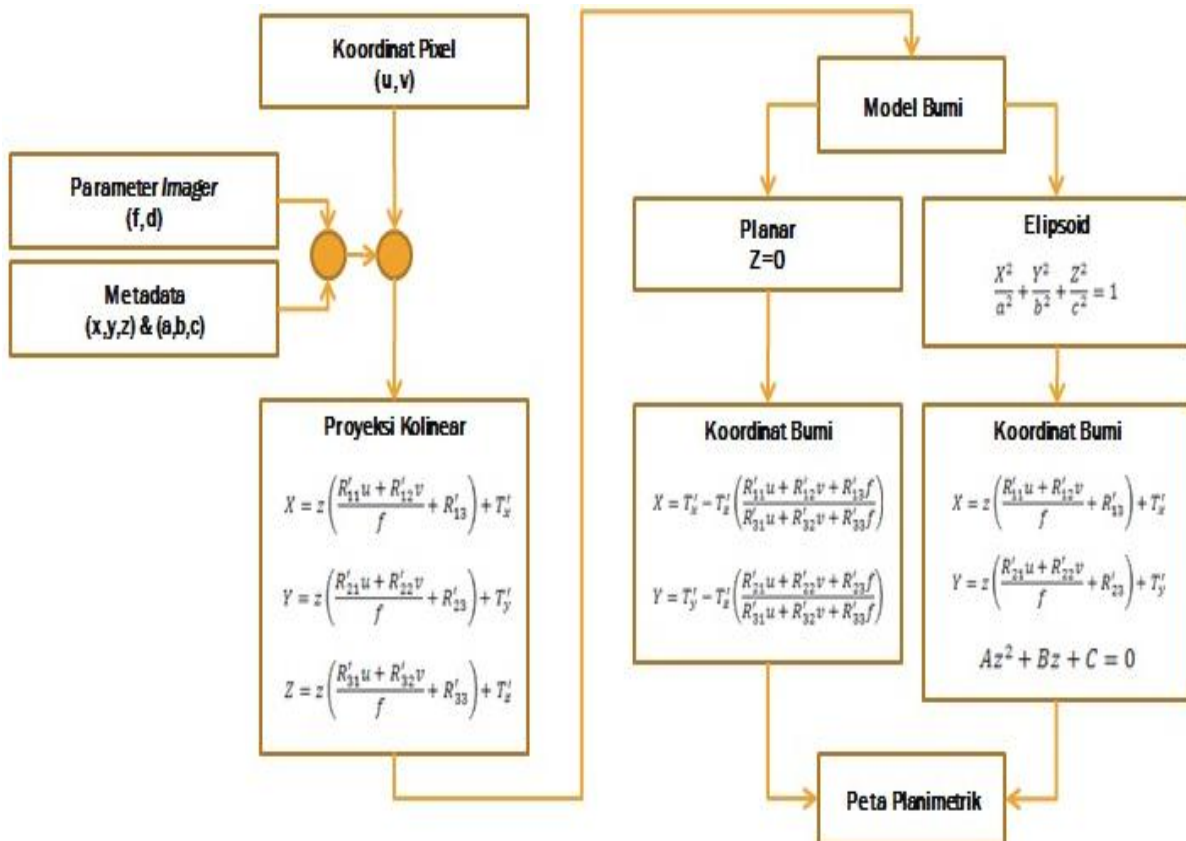
kamera. Kedua data *ancillary* tersebut dihasilkan oleh sensor satelit yaitu GPS dan STS (*star sensor*). Data posisi satelit diperoleh dengan menggunakan GPS yang dapat menghasilkan informasi *latitude* dan *longitude* satelit pada suatu saat dengan frekuensi sebesar 2 Hz. Data posisi satelit tersebut juga dapat diperoleh dengan perhitungan lintasan orbit satelit menggunakan format data *Two Line Elements* (TLE) sehingga kedua informasi posisi tersebut dapat dibandingkan.

Sedangkan data *attitude* satelit diperoleh dengan menggunakan STS (*star sensor*) yang dapat menghasilkan data orientasi kamera baik dalam bentuk sudut euler maupun dalam format quaternion dengan frekuensi sebesar 4 Hz. Berbeda dengan penentuan posisi satelit yang lebih bersifat deterministik maka penentuan orientasi kamera sangat bergantung pada tingkat akurasi dan kecepatan sampling *star sensor*. Jika perubahan orientasi kamera dapat diasumsikan

lambat maka orientasi kamera pada setiap baris pengamatan dapat ditentukan dengan akurat menggunakan metode interpolasi yang umum. Beberapa metode interpolasi dapat digunakan untuk memprediksi nilai posisi dan orientasi kamera untuk setiap baris pengamatan dengan menggunakan dua atau lebih nilai data *ancillary* yang berurutan.

3.3 Simulator Kamera Imager Pushbroom

Karena belum tersedianya data citra satelit asli dengan data *ancillary* yang memadai maka pada penelitian ini digunakan simulator untuk menghasilkan data *dummy* yang akan digunakan sebagai pengganti data citra asli satelit. Data *dummy* yang akan dihasilkan simulator ini yaitu berupa citra terdistorsi serta data posisi dan *attitude* (orientasi) kamera selama pengamatan berlangsung.



Gambar 3-1: Diagram alir sistem koreksi geometri sistematis

3.3.1 Perancangan simulator

Untuk mengetahui karakteristik geometri dari kamera *imager pushbroom* berikut ini akan dilakukan perancangan simulator kamera *imager pushbroom* dengan menggunakan perangkat lunak Matlab. Secara garis besar simulator yang dirancang dapat menghasilkan data serangkaian baris pengamatan dengan menggunakan kamera *imager pushbroom* yang diletakkan pada suatu wahana yang bergerak melalui lintasan tertentu dengan orientasi kamera yang dapat diatur. Prinsip dasar yang digunakan adalah konsep proyeksi kolinear dan teori homografi.

Secara umum metode yang digunakan dalam perancangan simulator *imager pushbroom* ini adalah sebagai berikut:

- Menggunakan beberapa citra referensi yang diperoleh dari berbagai literatur berupa citra hasil pengamatan *remote sensing* sebagai wilayah yang akan diamati dalam simulasi,
- Menggunakan format citra RGB untuk memudahkan analisis kinerja,
- Menentukan parameter kamera seperti lebar piksel dan panjang fokus,
- Menentukan lintasan wahana pembawa kamera *imager* yang dinyatakan dalam koordinat bumi
- Menentukan trayektori orientasi kamera *imager pushbroom* selama pengamatan berlangsung,
- Melakukan perhitungan untuk proyeksi kolinear untuk setiap baris pengamatan,
- Melakukan proses *resampling* citra untuk setiap layer RGB yang dihasilkan dengan menggunakan metode interpolasi,
- Menghasilkan citra yang terdistorsi hasil pengamatan *imager pushbroom* dan data *ancillary* sebagai data *dummy*.

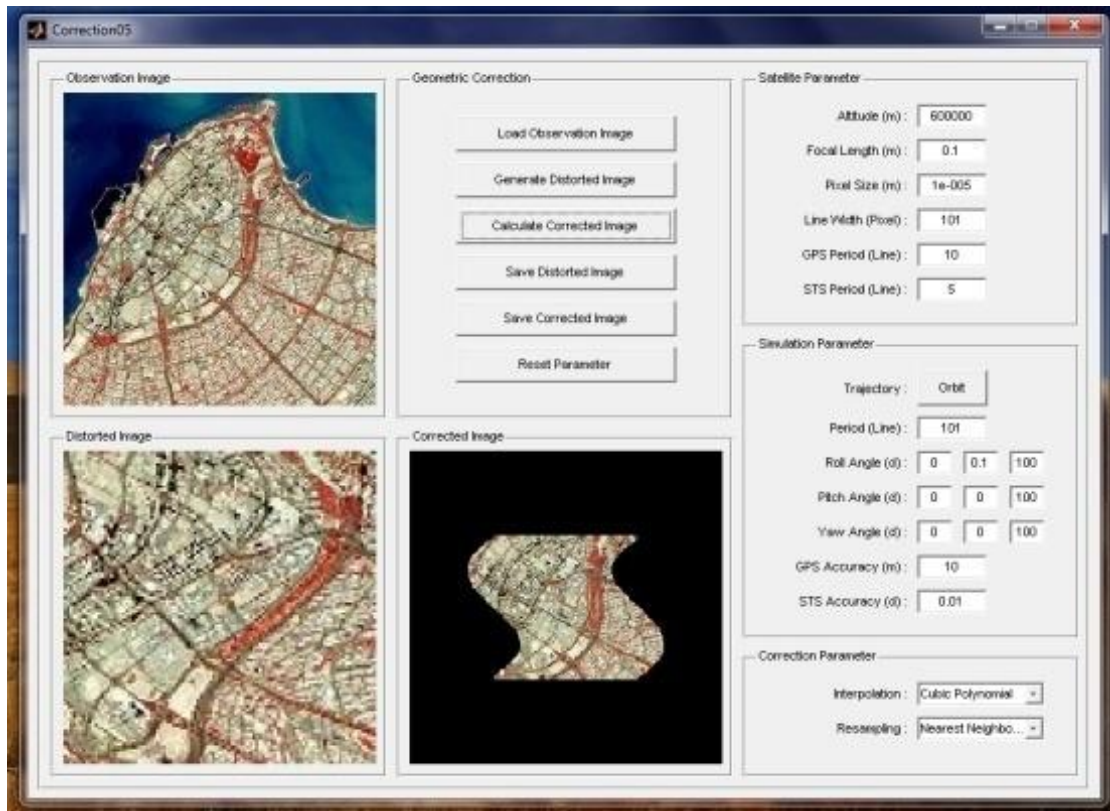
Gambar 3-2 menunjukkan contoh *Graphical User Interface* (GUI) dari *software* yang dirancang dengan menggunakan Matlab. GUI tersebut sengaja dibangun untuk memudahkan

pengguna untuk menghasilkan data *dummy* yang diasumsikan menyerupai data satelit asli dan selanjutnya dapat digunakan sebagai masukan untuk melakukan koreksi geometri sistematis. Dalam menghasilkan data *dummy*, GUI memiliki fitur untuk menentukan posisi awal dan akhir beserta lintasan linear dari pengamatan dan juga bentuk trayektori orientasi ketiga sudut kamera selama periode pengamatan tersebut. Sedangkan untuk koreksi geometri sistematis, GUI memiliki fitur untuk menentukan parameter koreksi seperti metode interpolasi dan *resampling* citra.

3.3.2 Verifikasi simulator

Sebagai contoh berikut ini akan dilakukan beberapa simulasi pengambilan citra pada suatu wilayah menggunakan lintasan dan orientasi kamera yang berbeda. Pengamatan berlangsung pada wilayah di dalam kotak pada Gambar 3-3.

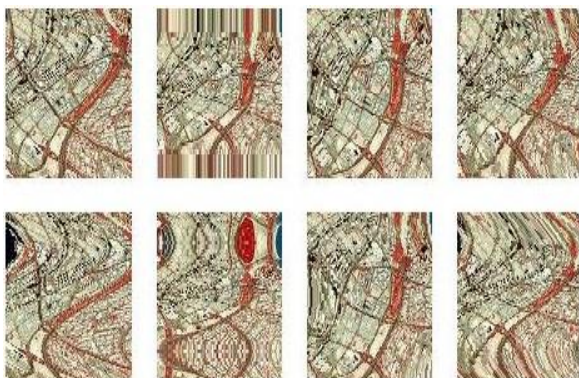
Gambar 3-4 adalah beberapa contoh hasil pengamatan kamera *imager pushbroom* yang mengamati wilayah yang telah ditentukan di atas dengan berbagai variasi orientasi kamera selama pengamatan. Kolom pertama merupakan citra hasil pengamatan pada saat orientasi kamera hanya bervariasi pada sumbu *roll* dimana tampak bahwa variasi sudut *roll* akan menyebabkan pergeseran piksel pada arah baris pengamatan. Kolom kedua merupakan citra hasil pengamatan pada saat orientasi kamera hanya bervariasi pada sumbu *pitch* dimana tampak bahwa variasi sudut *pitch* akan menyebabkan terjadinya *spacing* di antara baris pengamatan. Kolom ketiga merupakan citra hasil pengamatan saat orientasi kamera hanya bervariasi pada sumbu *yaw* saja dimana tampak bahwa variasi sudut *yaw* akan menyebabkan penumpukan beberapa baris pengamatan. Kolom keempat merupakan hasil pengamatan pada saat orientasi kamera bervariasi pada semua sumbu dan tampak bahwa kombinasi ketiganya akan menyebabkan distorsi yang signifikan.



Gambar 3-2: Tampilan *graphical user interface*



Gambar 3-3: Wilayah pengamatan simulator



Gambar 3-4: Hasil pengamatan simulator

Dengan menggunakan simulator *imager pushbroom* tersebut maka dapat dihasilkan data *dummy* berupa data citra hasil pengamatan yang mengalami distorsi beserta data *ancillary* yaitu posisi dan sudut orientasi kamera selama proses pengamatan berlangsung.

4 SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Pada perangkat lunak GUI tersebut di atas terdapat dua buah modul yaitu modul simulator *imager pushbroom* dan modul koreksi geometri sistematis. Berdasarkan hasil verifikasi maka diasumsikan modul simulator dapat mewakili karakteristik kamera dan sensor satelit sehingga data keluaran simulator yaitu koordinat piksel (u, v) dan data *ancillary* dapat digunakan untuk menguji sistem koreksi geometri sistematis.

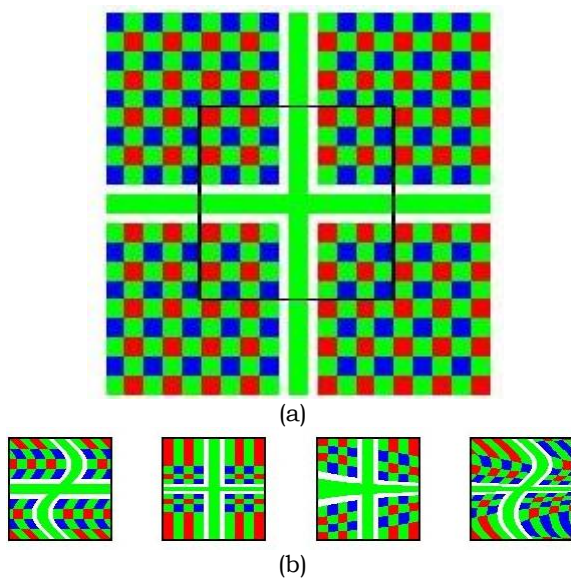
Selanjutnya akan dilakukan simulasi untuk menguji sistem koreksi geometri sistematis yang telah dirancang menggunakan perangkat lunak Matlab. Pengujian dilakukan dalam beberapa kondisi pengamatan yang berbeda. Pada

masing-masing studi kasus dilakukan empat pengamatan dengan beberapa variasi sudut pada sumbu *roll*, *pitch* dan *yaw*. Untuk setiap pengamatan tersebut dilakukan beberapa koreksi berdasarkan tingkat keakuratan data *ancillary* yang digunakan dalam hal ini data orientasi yang diperoleh dari *star sensor*.

Untuk menunjukkan kualitas citra hasil koreksi maka digunakan data *error* berupa jarak antara proyeksi koordinat piksel yang dihasilkan dengan koordinat pada citra referensi yang digunakan. Kualitas citra terkoreksi ditentukan dengan menghitung nilai *Root Mean Square* (RMS) dari *error* seluruh piksel pada citra. Penentuan kualitas citra berupa nilai RMS ini hanya dapat dilakukan pada simulasi sedangkan pada aplikasi dengan menggunakan data citra dan data *ancillary* satelit asli maka kualitas citra hasil koreksi tersebut tidak dapat ditentukan tanpa adanya citra referensi asli sama seperti dalam kasus koreksi citra nonsistematis.

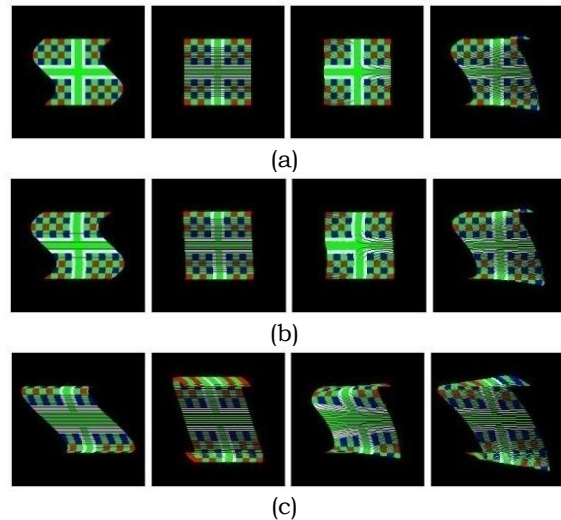
4.1 Studi Kasus 1: Wilayah Citra Berpola

Gambar 4-1(a) berikut ini menunjukkan suatu wilayah citra berpola yang akan diamati dan Gambar 4-1(b) menunjukkan beberapa hasil pengamatan dalam berbagai kondisi.



Gambar 4-1: Pengamatan wilayah citra berpola; (a) wilayah yang diamati, (b) hasil pengamatan

Citra berpola tersebut digunakan untuk menunjukkan dengan jelas bagaimana pengaruh variasi orientasi ketiga sudut tersebut dan juga untuk memverifikasi kinerja simulator yang digunakan. Selain itu, kualitas citra terkoreksi dapat dibandingkan dengan jelas terhadap citra aslinya. Citra hasil koreksi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2: Hasil koreksi wilayah citra berpola; (a) kondisi ideal, (b) akurasi *star sensor* 10 miliderajat, (c) akurasi *star sensor* 100 miliderajat

Gambar 4-2(a) menunjukkan citra hasil koreksi dengan asumsi bahwa data *ancillary* yang digunakan tidak memiliki *error*. Tampak bahwa citra hasil koreksi sama persis seperti wilayah citra berpola yang diamati. Sementara itu Gambar 4-2(b) dan 4-2(c) menunjukkan citra hasil koreksi dengan asumsi bahwa akurasi data *ancillary* yang disebabkan oleh *error* akibat akurasi *star sensor* sebesar 10 dan 100 miliderajat. Tampak bahwa dengan akurasi sebesar 100 miliderajat maka kualitas citra hasil koreksi menjadi lebih buruk dibandingkan dengan citra sebelum dilakukan koreksi.

4.2 Studi Kasus 2: Wilayah Perkotaan

Agar lebih realistis berikut ini dilakukan pengujian terhadap wilayah perkotaan seperti pada Gambar 3-3 yang digunakan dalam proses verifikasi simulator. Hasil pengamatan dalam

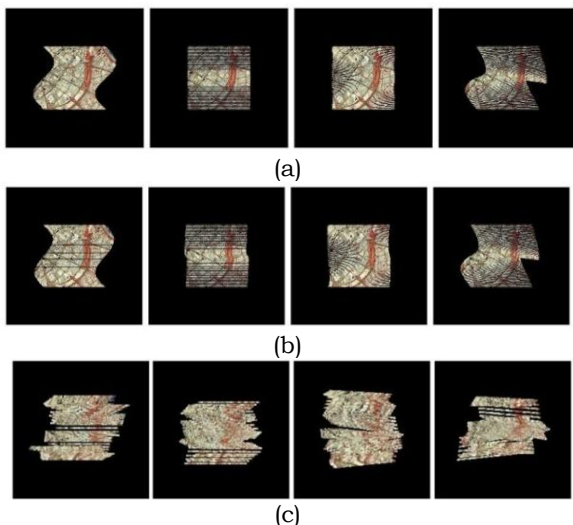
berbagai kondisi dapat dilihat pada Gambar 4-3 berikut ini.



Gambar 4-3: Hasil pengamatan wilayah perkotaan

Tampak bahwa pengaruh variasi orientasi sudut kamera terhadap citra tidak tampak secara eksplisit. Secara visual, sulit untuk menentukan tingkat distorsi yang terjadi pada citra sehingga kualitas citra hasil koreksi tidak dapat ditentukan berdasarkan citra referensi yang digunakan. Citra hasil koreksi wilayah perkotaan dapat dilihat pada Gambar 4-4.

Seperti studi kasus sebelumnya, citra hasil koreksi dengan asumsi tidak ada *error* pada data *ancillary* dapat menghasilkan citra yang sama persis dengan wilayah perkotaan yang diamati. Sedangkan jika data *ancillary* memiliki *error* maka kualitas citra hasil koreksi akan menurun sebanding dengan tingkat akurasi data *ancillary* yang digunakan. Pada studi kasus ini digunakan sumber *error* data *ancillary* berupa *noise* yang terjadi pada pengukuran *star sensor* sebesar 10 dan 100 miliderajat.



Gambar 4-4: Hasil koreksi wilayah perkotaan; (a) kondisi ideal, (b) *noise star sensor* 10 miliderajat, (c) *noise star sensor* 100 miliderajat

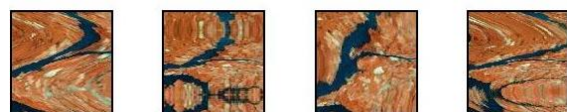
Salah satu perbedaan mendasar dari kedua studi kasus tersebut adalah pada studi kasus pertama digunakan sumber *error* yang berasal dari akurasi *hardware star sensor* yang bersifat seragam, sedangkan pada studi kasus kedua digunakan *error* berupa *noise* pengukuran *star sensor* yang umumnya bersifat acak. Tampak bahwa *noise* pengukuran lebih signifikan dalam menentukan kualitas citra hasil koreksi.

4.3 Studi Kasus 3: Wilayah Alam

Pada kedua studi kasus tersebut terutama pada studi kasus pertama, perbedaan kualitas citra hasil koreksi dapat diketahui dengan jelas secara visual karena wilayah yang digunakan bersifat terstruktur. Tetapi jika wilayah yang diamati bersifat tidak terstruktur seperti wilayah alam maka perbedaan kecil sangat sulit terlihat secara visual. Pada studi kasus ketiga berikut ini dilakukan pengamatan terhadap citra wilayah alam. Dengan pengujian dan analisis yang sama, pada Gambar 4-5 ditunjukkan hasil pengamatan suatu wilayah alam sedangkan hasil koreksinya ditunjukkan pada Gambar 4-6.

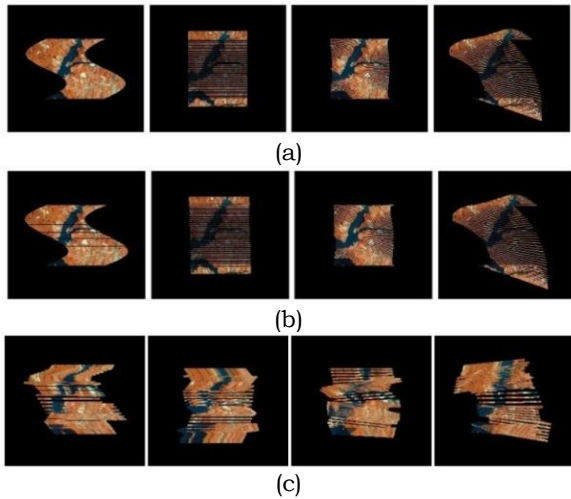


(a)



(b)

Gambar 4-5: Pengamatan wilayah alam; (a) wilayah yang diamati, (b) hasil pengamatan



Gambar 4-6: Hasil koreksi wilayah alam; (a) kondisi ideal, (b) *noise star* sensor 10 miliderajat, (c) *noise star* sensor 100 miliderajat

4.4 Analisis Simulasi

Perbandingan kualitas citra hasil koreksi dapat dilihat dari data nilai *error* untuk setiap pengujian. Data hasil pengujian masing-masing pengamatan berupa RMS untuk setiap citra hasil koreksi dapat dilihat pada Tabel 4-1, 4-2 dan 4-3 berikut ini.

Tabel 4-1: DATA RMS STUDI KASUS 1

Akurasi Ancillary	Distorsi Citra (m)			
	Roll	Pitch	Yaw	3 Axis
Tanpa error	0.099	0.099	0.029	0.144
0,01 derajat	82.88	81.56	93.31	85.12
0,1 derajat	905.7	821.9	823.1	934.2

Tabel 4-2: DATA RMS STUDI KASUS 2

Akurasi Ancillary	Distorsi Citra (m)			
	Roll	Pitch	Yaw	3 Axis
Tanpa error	0.093	0.087	0.035	0.234
0,01 derajat	79.23	83.65	80.23	88.76
0,1 derajat	878.7	901.4	954.6	921.2

Tabel 4-3: DATA RMS STUDI KASUS 3

Akurasi Ancillary	Distorsi Citra (m)			
	Roll	Pitch	Yaw	3 Axis
Tanpa error	0.101	0.099	0.025	0.156
0,01 derajat	85.7	75.2	83.2	84.3
0,1 derajat	923.4	854.8	912.3	1021.2

Pada masing-masing tabel tampak bahwa jika tidak ada *error* pada data *ancillary* maka RMS bernilai nol. Hal tersebut sesuai dengan gambar di atas yang menunjukkan citra hasil koreksi akan sama persis dengan citra referensi. Namun dalam implementasinya hal ini sulit terjadi karena pasti terdapat kesalahan pada data *ancillary* baik yang disebabkan oleh tingkat akurasi sensor maupun frekuensi *sampling* yang digunakan. Pada tabel di atas juga dapat dilihat bahwa dengan akurasi data *ancillary* yang buruk maka dihasilkan nilai RMS yang tinggi. Hal tersebut menandakan bahwa kualitas citra hasil koreksi cukup buruk, sesuai dengan persepsi secara visual.

Dari beberapa hasil simulasi yang telah dilakukan tampak jelas bahwa kualitas citra hasil koreksi geometri sistematis sangat bergantung pada akurasi data *ancillary*. Secara teoritis, dari Tabel 4-1, 4-2 dan 4-3, citra hasil koreksi dapat memiliki akurasi yang tinggi jika data *ancillary* yang digunakan tidak memiliki *error*.

4.5 Kinerja Untuk Data Satelit Asli

Seluruh simulasi koreksi geometri yang dilakukan menggunakan data *dummy* sebagai data masukan untuk modul koreksi geometri sistematis sehingga kualitas modul koreksi belum teruji untuk data satelit asli. Walaupun demikian, persamaan proyeksi kolinear yang digunakan merupakan persamaan yang cukup handal dalam merepresentasikan sifat dan karakteristik *imager pushbroom*, sehingga pada dasarnya data *dummy* yang dihasilkan oleh simulator tersebut memiliki kemiripan dengan data citra satelit asli. Dengan demikian, diharapkan modul koreksi geometri sistematis ini dapat mengoreksi data satelit asli dengan kualitas yang cukup baik, walaupun tidak sebaik kualitas citra hasil koreksi menggunakan data simulator.

Justru permasalahan utama untuk koreksi terhadap data satelit asli adalah pada pengolahan data *ancillary* yang digunakan, terutama data sudut orientasi yang dihasilkan oleh *star sensor*. Faktor akurasi, *noise* pengukuran dan periode *sampling* harus diketahui dengan tepat agar dapat menghasilkan citra hasil koreksi dengan kualitas yang baik. Selain itu struktur data citra mentah dan data *ancillary* pada satelit tersebut juga harus diketahui secara akurat.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Model koreksi geometri sistematik dengan metode proyeksi kolinear dapat mengoreksi distorsi geometri sistematik pada citra,
- Akurasi data *ancillary* terutama data orientasi sangat berpengaruh terhadap akurasi citra hasil koreksi dimana untuk akurasi $0,01^\circ$ dihasilkan citra dengan akurasi 100 meter sedangkan untuk akurasi $0,1^\circ$ dihasilkan citra dengan akurasi 1000 meter
- Dengan asumsi bahwa akurasi data orientasi kamera hasil kombinasi akurasi *star sensor* LAPAN-A3 dan *noise* pengukuran adalah $0,1^\circ$ maka diharapkan citra hasil koreksi dapat

memiliki tingkat akurasi 1000 meter pada pengamatan di sekitar nadir

DAFTAR RUJUKAN

- Cramer, M., D. Stallmann, dan N. Haala, 2000. *Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications*, IAPRS Vol. XXXIII, Amsterdam.
- Fu, K.S., R.C. Gonzalez, dan C.S.G. Lee, 1987. *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, New York: McGraw-Hill.
- Hutton, J., dan Mostafa, M.M.R., 2005. *10 Years of Direct Georeferencing For Airborne Photogrammetry*, Photogrammetric Week 2005.
- Indradi, 2012. *Implementasi Koreksi Sistematik Data Airborne*, Bimbingan Teknik Koreksi Sistematik Geometrik dan Radiometrik, LAPAN, Bogor.
- Maryanto, Ahmad, 2012. *Model Koreksi Geometri Sistematik Data Imager Satelit*, Bimbingan Teknik Koreksi Sistematik Geometrik dan Radiometrik, LAPAN, Bogor.
- Syafrudin, A. H., dan A. Rahman, 2011. *Koreksi Vignetting pada Uji Coba Imager LAPAN-A3*, Buku Ilmiah Pusteksat 2011, LAPAN.
- www.en.wikipedia.org/wiki/Earth_radius