

PENGEMBANGAN RELASI MATEMATIK SENSOR *PUSHBROOM* UNTUK KOREKSI GEOMETRIK SISTEMATIK DATA CITRA SATELIT LAPAN A3

Oleh:
Musyarofah*
Dinari Nikken Sulastrie Sirin*
Ahmad Maryanto*

Abstrak

Telah dikembangkan relasi matematik sensor pushbroom untuk koreksi geometrik sistematis data citra satelit LAPAN A3. Koreksi geometrik sistematis perlu dilakukan untuk mengurangi distorsi yang timbul pada citra akibat penyimpangan atau ketidakteraturan sistem pencitra. Penyimpangan atau ketidakteraturan tersebut terutama disebabkan adanya pergeseran orientasi, baik dari parameter di dalam (*internal*) ataupun di luar (*eksternal*) sistem pencitra. Pengembangan relasi matematis ini dimulai dengan studi pustaka kajian sistem sensor pushbroom yang digunakan untuk menentukan parameter-parameter internal ataupun eksternal yang berpengaruh terhadap terjadinya penyimpangan atau ketidakteraturan. Selanjutnya, dikaji spesifikasi LAPAN A3 untuk menentukan instrumen-instrumen pengukur mana yang dapat memberikan informasi atau data mengenai parameter yang diperlukan. Dari hasil kedua kajian tersebut, dianalisis dan dikembangkan relasi matematik yang menghubungkan koordinat citra dengan koordinat target di bumi. Penulisan paper dimaksudkan untuk mengkaji sensor pushbroom dan LAPAN A3, yang digunakan untuk mengembangkan relasi matematik sensor pushbroom yang diperlukan untuk koreksi geometrik sistematis sensor satelit LAPAN-A3.

Kata kunci: sensor pushbroom, koreksi geometrik, LAPAN A3, parameter internal, parameter eksternal, sistem koordinat.

Abstract

The mathematical relation of pushbroom sensor for systematic geometric correction of imagery data LAPAN A3 have developed. Systematic geometric correction need to be done to minimize distortion on the images caused by aberrations or irregularities of imagery system. This aberration or irregularity mainly caused by orientation displacement, either from the internal or external imagery system. The development of this mathematical relation begin with literature study of pushbroom sensor system that are used to determine the internal or external parameters which influence on the occurrence of aberrations or irregularities. Furthermore, reviewing the specification of LAPAN A3 to determine the measuring instruments which can provide data or information about the parameters needed. From those reviews, the mathematic relation of the image coordinate and the target location on earth is analyzed and developed. This paper is intended to review the pushbroom sensor and LAPAN A3, which used to develop the mathematic relation of pushbroom sensor needed for LAPAN A3 satelliet's sensor systematic geometric correction.

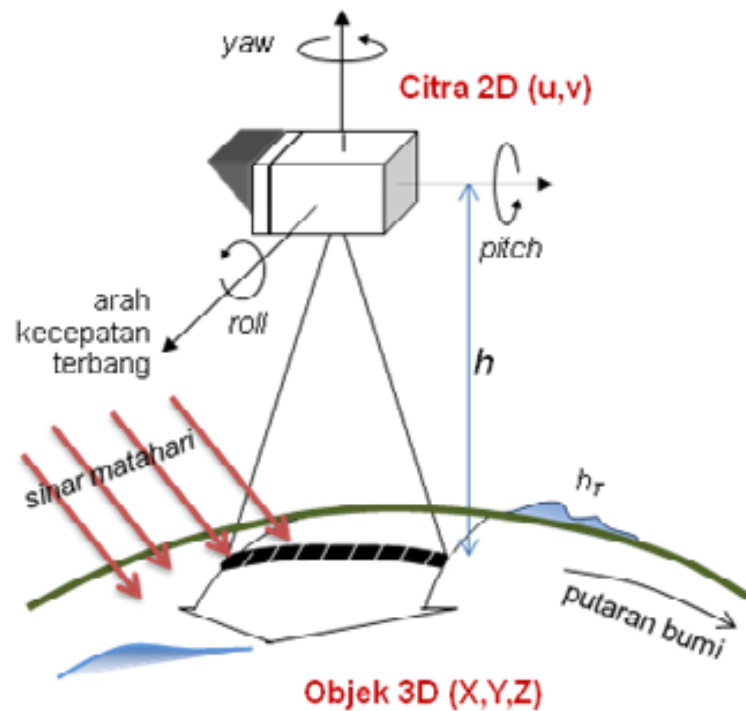
Key words: pushbroom sensor, geometric correction, LAPAN A3, internal parameters, external parameters, coordinate systems.

1. PENDAHULUAN

Penginderaan jauh satelit dengan menggunakan sensor *pushbroom* semakin banyak digunakan saat ini, misalnya pada beberapa satelit yang telah operasional seperti Landsat (ETM+), SPOT 5 (HRG/HRS), EOS AM-1(MISR), NMP EO-1 (ALI) dan sebagainya. Teknik akuisisi citra dengan sensor ini merupakan teknologi perolehan citra dengan kamera optik (sistem optik) yang dikombinasikan dengan detektor, berupa barisan *charge coupled devices* (CCD) larik linear. Barisan CCD larik linear tersusun dengan posisi tegak lurus terhadap arah terbang satelit¹. Teknik pemotretan target dilakukan garis demi garis (*line by line scan*). Area yang berbeda pada permukaan target dicitrakan baris per baris searah (*along-track*) dengan arah terbang satelit. Garis demi garis hasil pemotretan tersebut, disimpan secara berurutan hingga membentuk suatu bidang citra dua dimensi

* Peneliti dan Perakayasa Bidang Teknologi Akuisisi dan Stasiun Bumi Penginderaan Jauh, Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh, LAPAN

(2D)². Geometri pencitraan pada proses akuisisi citra dengan menggunakan sensor *pushbroom* yang dibawa oleh satelit pada ketinggian (h) tertentu dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Geometri Pencitraan Sensor *Pushbroom*

Citra 2D yang dihasilkan oleh sistem sensor pencitra merupakan hasil pantulan gelombang elektromagnetik dari sinar matahari yang mengenai objek yang ada di permukaan bumi. Hasil pantulan tersebut akan dideteksi oleh CCD yang ada pada sensor pencitra satelit. Citra yang dihasilkan tidak selalu ideal karena adanya penyimpangan atau ketidakteraturan yang disebabkan oleh iluminasi, linearitas gerakan satelit, kelengkungan dan topografi permukaan bumi. Penyimpangan atau ketidakteraturan tersebut menimbulkan distorsi pada citra yang akan mempengaruhi kualitas citra yang dihasilkan, baik secara geometrik maupun radiometrik. Oleh karena itu, diperlukan koreksi geometrik maupun radiometrik untuk mengurangi pengaruh distorsi dan meningkatkan kualitas citra.

Koreksi geometrik dapat diartikan sebagai proses *georeferencing*, yaitu proses mengembalikan geometri citra kepada besaran dan satuan sebenarnya di bumi yang dilakukan dengan cara menyamakan posisi lokasi target di citra dengan lokasi sebenarnya di bumi. Proses *georeferencing* dapat dilakukan secara langsung (*direct georeferencing*) ataupun tidak langsung (*indirect georeferencing*)².

Proses *indirect georeferencing* merupakan proses koreksi citra yang dilakukan melalui bantuan data-data koordinat sebenarnya yang bisa diperoleh dari citra lain yang telah dikoreksi atau dari pengukuran lapangan. Proses ini dikenal juga sebagai pemodelan empirik karena menggunakan fungsi matematik yang mengkorelasikan titik citra dengan *ground control point* (GCP) yang merupakan fakta empirik lokasi titik tersebut pada koordinat bumi yang sebenarnya. Sedangkan proses *direct georeferencing* dapat dikatakan sebagai proses koreksi geometrik sistematis karena dilakukan melalui bantuan semua parameter sistem akuisisi yang terlibat pada saat gambar (citra) diambil, baik parameter dari dalam (internal) maupun dari luar (eksternal) sensor pencitra. Proses ini memanfaatkan prinsip kese Pancaran (homologitas) antara titik citra dan titik objek. Karena menggunakan bantuan parameter fisis sistem akuisisi dan geometri objek, maka metode ini dikenal juga dengan istilah pemodelan fisik.

Perbedaan antara model empirik dan model fisis dapat dilihat pada Tabel 1.1 berikut³.

Tabel 1.1. Perbandingan Model Empiris dan Model Fisis

Model Empiris (2D/3D)	Model Fisis (2D/3D)
<ul style="list-style-type: none"> - Transformasi koordinat citra (u,v) ke koordinat kartografik (X,Y,Z) dilakukan melalui fungsi matematik (polinomial 2D/3D, rasional 3D) yang tidak memperhatikan korelasi fisis sistem akuisisi - Tidak memerlukan informasi awal semua komponen sistem akuisisi - Memerlukan GCP - Mengoreksi lokal di sekitar GCP - Rentan terhadap kesalahan pengambilan GCP - Diutamakan citra dengan tingkat distorsi rendah (daerah datar, citra terkoreksi sistematis) - Kebanyakan digunakan oleh end user - Persamaan⁴ $P_{3D}(XYZ) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k$	<ul style="list-style-type: none"> - Transformasi koordinat citra (u,v) ke koordinat kartografik (X,Y,Z) dilakukan melalui fungsi matematik yang menghubungkan satu sistem dengan sistem berikutnya di dalam sistem akuisisi - Memerlukan informasi awal semua komponen sistem akuisi - Tidak memerlukan GCP - Mengoreksi secara keseluruhan - Dapat diterapkan pada kondisi apapun - Fungsi-fungsi fisis yang digunakan tergantung pada sistem akuisisi yang digunakan - Kebanyakan diterapkan pada stasiun bumi atau vendor data/pemilik satelit/pemerintah yang merahasiakan sebagian informasi teknis sistem akuisisinya - Persamaan⁴ $x = (-f) \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$ $y = (-f) \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$

Satelit LAPAN-A3 yang rencananya akan diluncurkan pada tahun 2013, merupakan satelit LAPAN generasi ketiga setelah LAPAN-A1 (LAPAN-TUBSAT yang telah berhasil mengorbit dan operasional) dan LAPAN-A2 (rencananya akan diluncurkan pada tahun 2012). Satelit LAPAN-A3 akan membawa sensor pencitra *pushbroom* dengan kamera jenis multispektral *3-linear CCD camera* dengan spesifikasi sebagai berikut⁵:

Tabel 1.2. Spesifikasi LAPAN-A3

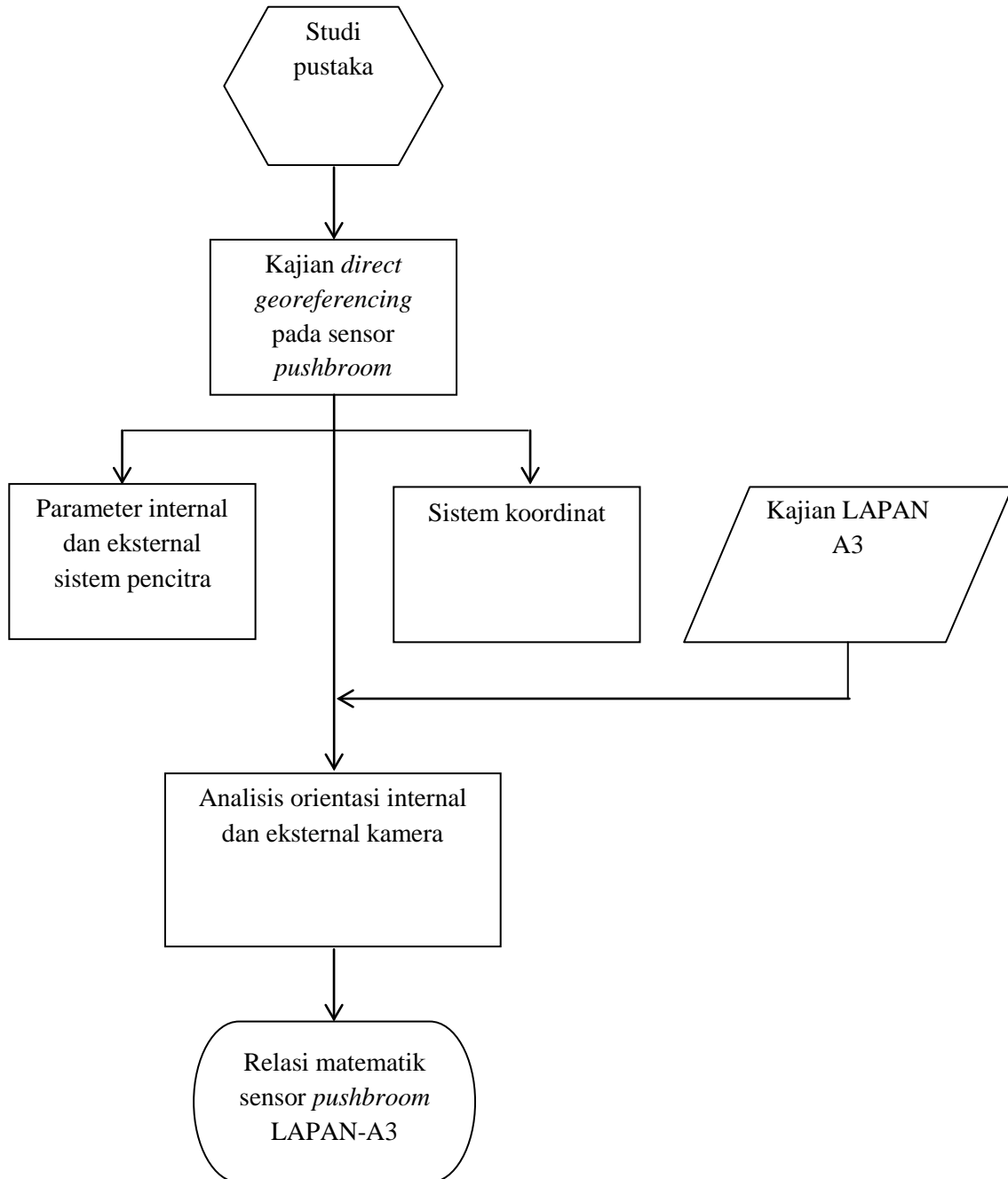
Sensor pendeteksi	CCD – Kodak KLI 8023, 8002 @9×9 μm active pixels
Lensa kamera	<i>Focal plane: 55×55 mm; Focal length: 350 mm</i>
Teknik penyiaran	<i>Pushbroom</i>
CCD Exposure rate	6.829×10 ³ m/s
Kanal spektral	Kanal-1: 525 – 605 nm; Kanal-2: 630 – 690 nm; Kanal-3: 750 – 900 nm
Ketinggian satelit	650 km

Dari spesifikasi sensor satelit LAPAN-A3, diharapkan dapat dikaji instrumen apa saja yang dapat memberikan informasi mengenai parameter yang diperlukan untuk pengembangan relasi matematik sensor *pushbroom*. Sehingga sebelum satelit diluncurkan, instrumen yang akan menyediakan data parameter internal dan eksternal yang diperlukan dapat ditentukan dan dapat memberikan masukan untuk tim pembuat satelit LAPAN-A3.

Penulisan *paper* ini, dimaksudkan untuk mengkaji sensor *pushbroom* dan LAPAN A-3, yang digunakan untuk mengembangkan relasi matematik sensor *pushbroom* yang diperlukan untuk koreksi geometrik sistematis sensor satelit LAPAN-A3.

2. METODOLOGI

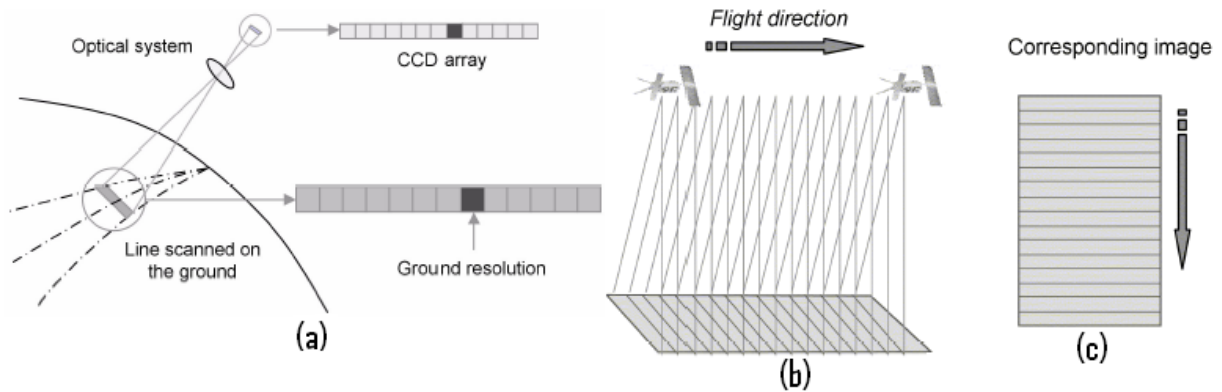
Kajian ini merupakan hasil studi literatur beberapa makalah yang berisi informasi mengenai relasi matematik untuk koreksi geometrik sensor *pushbroom*. Dari hasil studi literatur kemudian dikembangkan model fisis pengolahan geometrik citra LAPAN A3 dengan mengadopsi model yang sudah ada melalui berbagai penyesuaian yang dicocokkan dengan karakteristik sensor dan orbit satelit LAPAN A3. Berikut adalah alur proses pemodelan *direct georeferencing*.



Gambar 2.1. Diagram Alur Proses Pemodelan *Direct Georeferencing*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum, akuisisi citra dengan sensor *pushbroom* dapat dijelaskan dengan Gambar 3.1².



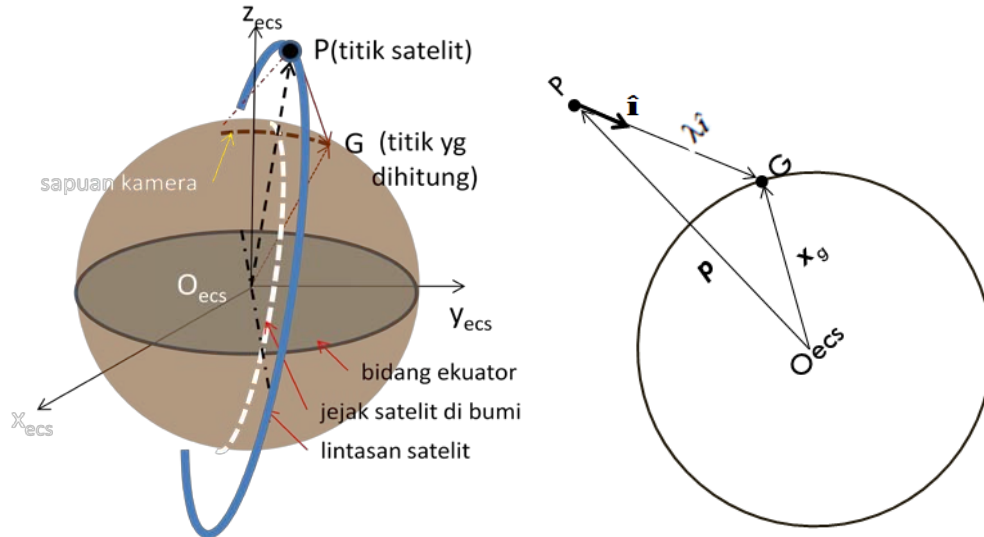
Gambar 3.1. Akuisisi Citra dengan Sensor *Pushbroom*

Pada sensor larik linear CCD, elemen sensor atau detektor (*chips*) tersusun pada bidang fokus dan berjajar membentuk satu larik atau *line* (lihat Gambar 3.1a) yang terdiri dari ribuan piksel. Kombinasi sistem optik dan larik CCD ini memungkinkan akuisisi citra dengan prinsip *pushbroom*. Larik linear CCD yang diletakkan pada bidang fokus sistem optik memperoleh *scanline* dengan cara menyiam target secara tegak lurus terhadap lintasan satelit. *Linescan* diperoleh satu per satu saat satelit bergerak sepanjang lintasannya dan disimpan dalam bentuk *strip* pada tiap larik CCD (lihat Gambar 3.1b). *Strip-strip* yang tersimpan pada CCD membentuk citra 2D (lihat Gambar 3.1c).

Citra 2D diperoleh melalui kombinasi yang tepat antara kecepatan pergeseran relatif kamera dalam arah longitudinal (arah jalur terbang wahana) dengan laju *shooting*. Masing-masing *linescan* yang terbentuk pada citra mempunyai pusat perspektif sendiri-sendiri. Kualitas citra yang terbentuk tidak sebaik *point scanning* karena dalam satu *scene* citra ada kemungkinan gradasi yang disebabkan oleh perbedaan responsivitas antar detektor dalam satu larik.

Pada prinsipnya, pencitraan dapat dipandang sebagai sebuah relasi satu-satu (pemetaan) antara titik citra dengan titik target yang dicitrakan (di bumi). Karena titik-titik citra dengan pasangannya merupakan titik-titik homolog (sepancaraan)², maksudnya terhubung secara langsung oleh sebuah garis lurus (sinar) yang memancar dari sebuah titik (pusat perspektif), maka dengan bantuan parameter-parameter sistem yang memuat titik-titik tersebut dapat diturunkan relasi matematis yang menghubungkan koordinat titik citra dengan koordinat titik target. Proses *direct georeferencing* mengestimasi koordinat titik target (objek) di permukaan bumi dengan cara memotongkan garis-garis homolog (perpanjangan sinar dari titik perpektif yang melalui titik citra) dengan menggunakan informasi orientasi internal dan orientasi eksternal kamera.

Untuk pengembangan relasi matematiknya, akan dimulai dengan mempelajari relasi geometrik di dalam sistem kamera yang membangun garis arah elementer yang menggambarkan arah pandang menuju target, mengkaji relasi fisik antara kamera dan wahana (satelit) untuk menentukan model transformasi geometrik yang sesuai dari sistem kamera ke sistem wahana, dan mempelajari relasi fisik wahana dengan sistem bumi beserta transformasinya sehingga diperoleh rumusan akhir yang menghubungkan koordinat citra dengan koordinat objek pasangannya di bumi. Dari relasi ini maka akan bisa dikaji lebih lanjut besaran-besaran fisis yang berkontribusi besar terhadap galat akhir dan karakteristiknya terhadap hasil akhir perhitungan posisi geometrik objek. Pada Gambar 3.2 ditampilkan relasi geometris sistem bumi-satelit-objek⁶.



Gambar 3.2. Relasi Geometris Sistem Bumi-Satelit-Objek

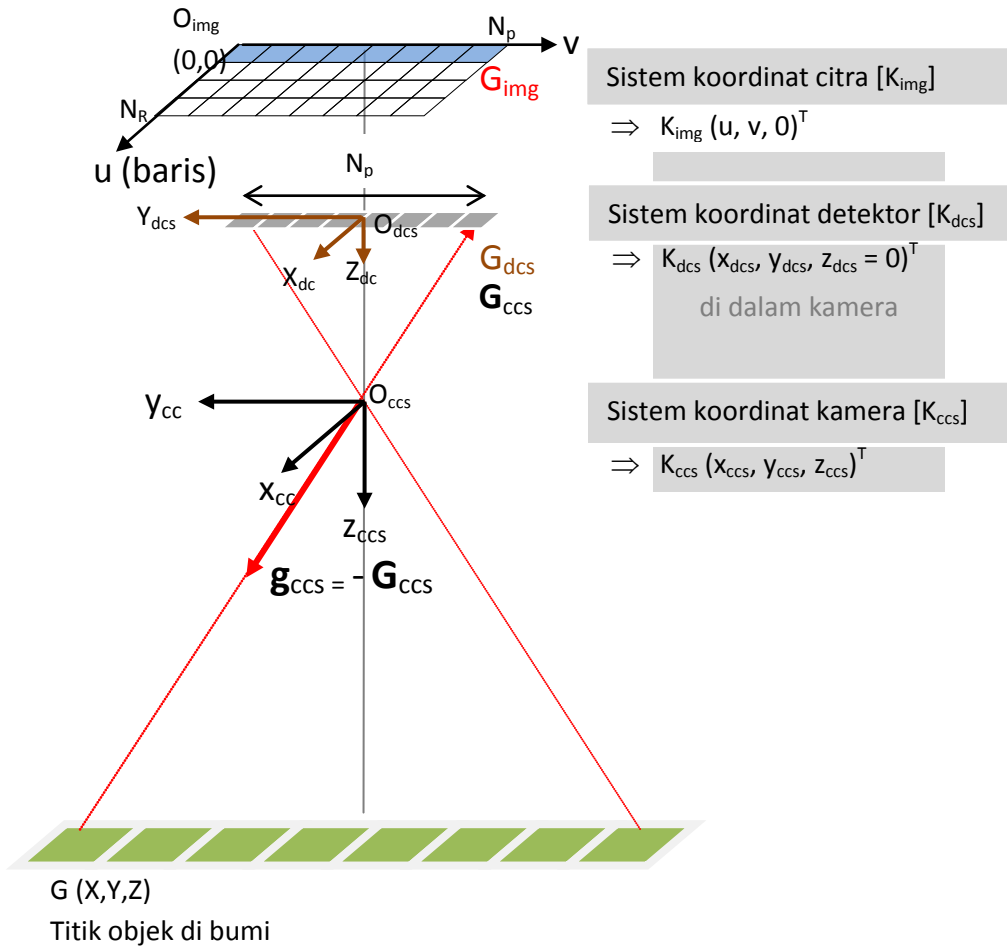
$$x_g = p + \lambda \hat{i} \tag{1}$$

Keterangan:

- p = vektor posisi satelit
- x_g = vektor posisi titik objek yg akan dihitung (G)
- λ = faktor perbesaran
- \hat{i} = vektor satuan yang menyatakan arah titik target dari titik satelit (orientasi eksternal arah target).

Masing-masing vektor, x_g , p , dan \hat{i} harus dalam sistem yang sama, yaitu sistem koordinat terpusat bumi (*earth centered*), baik sistem koordinat bumi yang berputar (*rotated = ECR*) ataupun sistem koordinat bumi yang lembam (*inert = ECI*). Titik P (koordinat posisi satelit) adalah titik pusat gravitasi atau pusat kelembaman satelit.

Selain sistem koordinat bumi, terdapat tiga sistem koordinat yang berlaku pada sistem pencitra *pushbroom*, yaitu, sistem koordinat citra, sistem koordinat detektor, dan sistem koordinat kamera. Ketiga sistem koordinat tersebut digunakan untuk menentukan vektor arah titik citra di dalam sistem pencitra (orientasi internal). Gambaran sistem koordinat tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini.

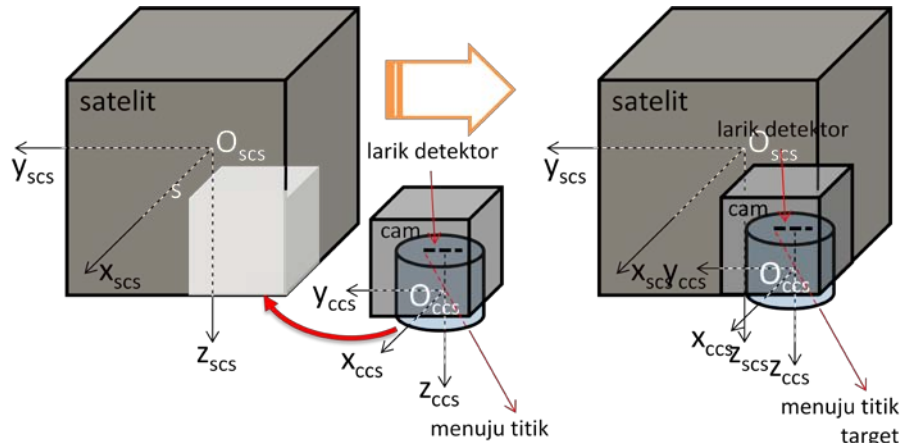


Gambar 3.3. Sistem Koordinat yang Berlaku pada Sistem Pencitra Pushbroom

Sistem koordinat citra [K_{img}] merupakan sistem koordinat yang terdapat pada citra, dengan pusat koordinat terletak di sudut kiri atas citra. Sebuah titik G pada citra dapat dinyatakan dengan $G_{img} = (u, v, 0)^T$. Sistem koordinat detektor [K_{dcs}] merupakan sistem koordinat pada detektor dengan pusat koordinat di pertengahan larik detektor. G_{img} pada K_{img} ditransformasi menjadi G_{dcs} pada sistem koordinat detektor. Karena detektor berupa larik tunggal, maka $G_{dcs} = (0, (v - N_p/2)y_p, 0)^T$ dengan y_p adalah ukuran sel detektor pada arah y_{dcs} . Sistem koordinat kamera [K_{ccs}] merupakan sistem koordinat pada kamera dengan pusat koordinat di pusat perspektif kamera. Dalam K_{ccs} , maka K_{dcs} mengalami penggeseran dengan vektor translasi $T_{ccsdcs} = (0, 0, -f)^T G_{dcs}$ pada K_{dcs} ditransformasi menjadi G_{ccs} pada sistem koordinat kamera. $G_{ccs} = T_{ccsdcs} + G_{dcs} = (0, (v - N_p/2)y_p, -f)^T$.⁶

$$g_{ccs} = \left(0, \left(v - \frac{N_p}{2} \right) y_p, -f \right)^T \quad (2)$$

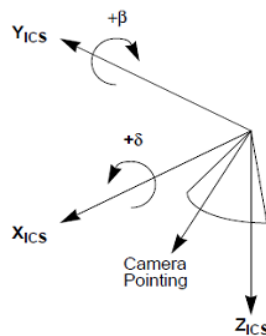
Untuk menentukan orientasi eksternal, dapat dijelaskan dengan keterikatan dalam sistem akuisisi citra satelit, yaitu antara sistem pencitra (kamera), satelit dengan bumi. Penempatan kamera pada satelit dapat digambarkan dengan Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4. Keterikatan Kamera-Satelit-Bumi dalam Sistem Akuisisi Citra Satelit

Kamera diasumsikan diikat secara tetap (*fixed*) terhadap satelit dengan suatu jarak dan orientasi tertentu. Pada sebagian satelit yang telah operasional, kamera tidak langsung terikat ke satelit, tetapi melalui peralatan lain (instrumen) yang terikat tetap dengan satelit. Sebagai sebuah benda terbang, orientasi satelit tidak selalu konsisten terhadap sistem koordinat lokal orbital, yaitu sistem koordinat yang berpusat pada pusat kelembaman satelit, dengan arah z (z_{ocs}) adalah kebalikan vektor posisi satelit, arah y (y_{ocs}) adalah arah *cross product* antara z_{ocs} dan vektor kecepatan satelit (V_t), dan arah x (x_{ocs}) adalah arah *cross product* antara y_{ocs} dan z_{ocs} . Sistem koordinat orbital (pusat kelembaman satelit) bergerak mengorbit bumi dalam sistem koordinat terpusat bumi (sistem dimana vektor posisi lokasi titik target bumi berada).

Dari asumsi-asumsi tersebut, dapat disimpulkan bahwa terdapat empat sistem koordinat yang menghubungkan kamera dengan sistem bumi, yang membangun orientasi eksternal vektor arah objek. Dengan demikian, diperlukan empat tahap transformasi antar sistem koordinat. Keempat tahap transformasi yang harus dilakukan antara lain adalah transformasi dari sistem koordinat kamera ke instrumen (T_{ic}), dari instrumen ke satelit (T_{sc}), dari satelit ke orbital (T_{os}) dan dari orbital ke pusat bumi (T_{co}).



Gambar 3.5. Transformasi dari Sistem Koordinat Kamera ke Sistem Koordinat Instrumen

Secara umum, transformasi antar sistem koordinat dalam sistem akuisisi citra indera satelit dapat bersifat rotatif (biasanya dinyatakan dalam sudut-sudut Euler) dan translusif. Pada umumnya nilai parameter translasi bersifat tetap, bukan fungsi waktu (jarak antar pusat sistem koordinat). Parameter rotasi ada yang bersifat tetap dan ada yang merupakan fungsi waktu. Pada transformasi kamera-instrumen (T_{ic}), rotasi tetap dan terjadi penggeseran (translasi) oleh vektor *mounting* kamera (M_c). Persamaan yang digunakan untuk mentransformasi dari sistem koordinat kamera ke sistem koordinat instrumen adalah:

$$T_{ic} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \delta & \sin \beta \cos \delta \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \delta & \cos \beta \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

dimana, β dan δ adalah besarnya sudut rotasi pada sumbu y dan sumbu z sistem koordinat instrumen. Pada transformasi dari sistem koordinat instrumen ke satelit (T_{sc}), rotasi tetap dan terjadi penggeseran (translasi) oleh vektor *mounting* instrument (M_i). Persamaan yang digunakan adalah:

$$T_{sc} = \begin{bmatrix} \cos \omega_y \cos \omega_z & \sin \omega_x \sin \omega_y \cos \omega_z + \cos \omega_x \sin \omega_z & -\cos \omega_x \sin \omega_y \cos \omega_z + \sin \omega_x \cos \omega_z \\ -\cos \omega_y \sin \omega_z & -\sin \omega_x \sin \omega_y \sin \omega_z + \cos \omega_x \cos \omega_z & \cos \omega_x \sin \omega_y \sin \omega_z + \sin \omega_x \cos \omega_z \\ \sin \omega_y & -\sin \omega_x \cos \omega_y & \cos \omega_x \cos \omega_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

dimana ω_x , ω_y , ω_z adalah sudut rotasi pada sumbu x, y, dan z sistem koordinat satelit. Transformasi dari sistem koordinat satelit ke sistem koordinat orbital (T_{os}) merupakan rotasi fungsi waktu, sehingga persamaannya menjadi:

$$T_{os} = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos K & \sin \Omega \sin \Psi \cos K + \cos \Omega \sin K & -\cos \Omega \sin \Psi \cos K + \sin \Omega \cos K \\ -\cos \Psi \sin K & -\sin \Omega \sin \Psi \sin K + \cos \Omega \cos K & \cos \Omega \sin \Psi \sin K + \sin \Omega \cos K \\ \sin \Psi & -\sin \Omega \cos \Psi & \cos \Omega \cos \Psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

dengan Ω , Ψ , K adalah nilai *roll*, *pitch* dan *yaw* satelit yang bisa diperoleh dari informasi data *ephemeris* satelit. Dan transformasi dari sistem koordinat orbital ke sistem koordinat pusat bumi (T_{co}) dilakukan dengan mengalikan dengan vektor satuan pada sistem koordinat terpusat bumi. Sehingga, matriks transformasinya menjadi

$$T_{co} = [\hat{x} \quad \hat{y} \quad \hat{z}] \quad (6)$$

dengan x, y dan z adalah vektor posisi pada sistem koordinat geosentrik. Aplikasi empat tahap transformasi pada vektor posisi internal (persamaan 2) akan menghasilkan vektor satuan arah eksternal (\hat{i}) yang dimaksud pada persamaan (1), yaitu:

$$\hat{i} = T_{co} \cdot T_{os} \cdot T_{si} \cdot T_{ic} \cdot g_{ccs} \quad (7)$$

dengan memasukkan persamaan (7) ke persamaan (1) memberikan persamaan:

$$\vec{x}_g = \vec{p} + \lambda \cdot T_{co} \cdot T_{os} \cdot T_{si} \cdot T_{ic} \cdot \vec{g}_{ccs} \quad (8)$$

Karena matriks-matriks rotasi bersifat orthogonal, maka vektor satuan arah internal (vektor citra) dapat dinyatakan sebagai fungsi dari vektor satuan arah eksternal (\hat{i}) dan vektor posisi objek di bumi di bumi x_g . Sehingga diperoleh:

$$\vec{g}_{ccs} = \lambda^{-1} \cdot (T_{ic}^T \cdot T_{si}^T \cdot T_{os}^T \cdot T_{co}^T) \cdot [\vec{x}_g - \vec{p}] \quad (9)$$

Diasumsikan bahwa kamera dipasang dengan pusat sistem koordinat kamera berimpit dengan pusat kelembaman satelit, maka $T_{si} = 1$, transformasi menjadi langsung dari sistem koordinat kamera ke sistem koordinat satelit, T_{sc} . Transformasi dianggap rotasional. Pers (9) dapat ditulis menjadi:

$$\vec{g}_{ccs} = \lambda^{-1} \cdot (T_{sc}^T \cdot T_{os}^T \cdot T_{co}^T) \cdot [\vec{x}_g - \vec{p}] \quad (10)$$

Dengan mengalikan parameter-parameter di ruas kanan, dapat dituliskan:

$$\begin{bmatrix} 0 - 0 \\ \left(v - \frac{N_p}{2}\right) y_p \\ -f \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (11)$$

Jika baris pertama dan baris kedua persamaan (11) dibagi dengan baris ketiga, maka akan diperoleh persamaan kolinieritas.

$$\begin{aligned} 0 - 0 &= -f \left(\frac{b}{d}\right) \\ V - \text{konstanta} &= -f \left(\frac{c}{d}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

Dengan memasukkan parameter internal kamera satelit LAPAN-A3 (panjang fokus (f) dan ukuran detektor (y_p) pada arah sumbu y sistem koordinat detektor), maka pengembangan relasi matematik sensor *pushbroom* satelit LAPAN-A3 dapat dilakukan. Berdasarkan kajian dari literatur yang ada, dapat diasumsikan bahwa *bus* LAPAN-A3 identik (bahkan sama) dengan *bus* LAPAN-A1, kamera dipasang langsung pada *bus* satelit dengan orientasi sistem koordinat kamera sejajar dengan sistem koordinat satelit, informasi mengenai parameter yang diperlukan untuk koreksi pemasangan kamera pada kerangka (*body*) satelit dan parameter kalibrasi posisi detektor tersedia, dan data-data *ephemeris* disediakan oleh NORAD TLE. Untuk pengembangan formulasi matematiknya diadaptasi dari persamaan kolinieritas (persamaan 8 dan 9) dengan mengeliminasi beberapa fungsi transformasi sesuai dengan kondisi sistem.

4. KESIMPULAN

Direct georeferencing memformulasikan penghitungan titik koordinat bumi dengan melibatkan seluruh parameter sistem fisis komponen akuisisi, internal sistem pencitra (kamera) dan perangkat fisis/mekanis diluar kamera termasuk asumsi besaran parametris bumi yang digunakan. Secara umum, parameter internal kamera yang terlibat dalam formulasi *direct georeferencing* semua sistem akuisisi *pushbroom* adalah identik, yaitu: panjang fokus, cacah piksel dalam satu larik, ukuran piksel, dan data-data kalibrasi kesearahan (*alignment*) *mounting* detektor dan sumbu optik kamera. Dengan anggapan relasi mekanis imager Lapan A3 identik dengan Lapan A1, parameter sistem satelit diluar kamera yang datanya sangat diperlukan unruk memodelkan *direct georeferencing* citra Lapan A3 adalah data rotasi pada *mounting* kamera dan data vektor posisi titik pusat koordinat kamera dari pusat kelembaman satelit. Sebagai saran, untuk sampai pada tahap geodetik diperlukan satu langkah lagi yaitu melakukan uji komputasi dengan memasukkan parameter-parameter yang diperlukan. Selain itu, perlu dikaji batas-batas toleransi yang bisa diterima untuk parameter-parameter *attitude* yang merupakan fungsi waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Gupta, Rajiv and Hartley, I. Richard. *Camera Estimation for Orbiting Pushbroom Imaging Systems*. General Electric Corporate R&D. River Rd, Schenectady, NY 12309, USA. 1995.
- ²Poli, Daniela. *Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors*. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Zurich, Swiss. 2005.
- ³Maryanto, A., Sirin, DNS., Musyarofah. *Laporan Kemajuan Semester-1 Kegiatan Bidang Teknologi Akuisis dan Stasiun Bumi "Penguasaan Teknologi dan Rancang Bangun Payload Imager"*. Pustekdata – LAPAN. Jakarta. 2011.

- ⁴ Toutin, T. **Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods**. International Journal Remote Sensing, Vol. 25, No. 10, 1893 – 1924. ISSN 1366-5901 online. Taylor & Francis. Canada. 2004.
- ⁵ Kadri, T.M. **Pembangunan Satelit di LAPAN**. Pusat Teknologi Elektronika Dirgantara, LAPAN. Jakarta. 2010.
- ⁶ Jovanovic, M., et al. **Level 1 Georectification and Registration Algorithm Theoretical Basis**. JPL D-11532, Rev. D. California Institute of Technology. USA. 1999.
- ⁷ Weser. T, Rottensteiner. F, Willneff. J, Fraser. C. **A Generic Pushbroom Sensor Model for High-Resolution Satellite Imagery Applied to SPOT 5, QUICKBIRD and ALOS Data Sets**. Department of Geomatics, The University of Melbourne VIC 3010. Australia.
- ⁸ Gupta, Rajiv and Hartley, I. Richard. **Linear Pushbroom Cameras**. General Electric Corporate R&D. River Rd, Schenectady, NY 12301, USA. 1997.
- ⁹ Anonim. **SPOT Satellite Geometry Handbook**. S-NT-73-12-SI, Ed.1 – Rev. 0, France. 2002.
- ¹⁰ Capderou, Michel. **Satellites Orbits and Missions**. Springer. France. 2005.
- ¹¹ Sohn. HG, Yoo. HH, Kim. SS. **Evaluation of Geometric Modeling for KOMPSAT-1, EOC Imagery Using Ephemeris Data**. ETRI Journal, Vol. 26, No. 3. 2004.
- ¹² Jacobsen. K. **Geometric Aspects of the Handling of Space Images**. Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings. 2002.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PEMAKALAH

Nama Penulis : Dinari Nikken Sulastrie Sirin
Tempat & Tanggal Lahir : Balikpapan, 29 April 1980
Pendidikan Terakhir : S1 Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada
Instansi : LAPAN
Alamat Kantor : Jl. LAPAN No.70, Pekayon, Pasar Rebo Jakarta Timur 13710
Telp : 021-8710786
Alamat Rumah : Jl. Melati IV No.14 RT.014 RW.01
Cijantung, Pasar Rebo, Jakarta Timur 13770
Telp : 021-8711126 HP: 08159013014
Alamat E-mail : dinari.nss@lapan.go.id
dinari_nss@yahoo.com
Seminar Terakhir Yang Diikuti : The 4th International RS and GIS Workshop Series on Demography,
Land Use-Land Cover and Disaster (IReSWS-DLULD)
Motto Hidup : Awali hari dengan senyum dan basmallah

Nama Penulis : Musyarofah
Tempat & Tanggal Lahir : Demak, 15 Oktober 1980
Pendidikan Terakhir : S1 Fisika Institut Pertanian Bogor
Instansi : LAPAN
Alamat Kantor : Jl. LAPAN No.70, Pekayon, Pasar Rebo Jakarta Timur 13710
Telp : 021-8710786
Alamat Rumah : Legenda Wisata Zona Van Gogh Blok S5 No.30,
Kel. Wanaherang, Kec.GunungPutri Bogor
Telp : 021-82485288 HP: 081319485410
Alamat E-mail : musyarofah@lapan.go.id
ofa_1015@yahoo.com
Seminar Terakhir Yang Diikuti : The 4th International RS and GIS Workshop Series on Demography,
Land Use-Land Cover and Disaster (IReSWS-DLULD)
Motto Hidup : *Work hard, play hard*

Nama Penulis : Ahmad Maryanto
Tempat & Tanggal Lahir : Purworejo, 2 Februari 1964
Pendidikan Terakhir : S2 Opto-Elektroteknika dan Aplikasi Laser Universitas Indonesia
Instansi : LAPAN
Alamat Kantor : Jl. LAPAN No.70, Pekayon, Pasar Rebo Jakarta Timur 13710
Telp : 021-8710786
Alamat Rumah : Jl. Masjid Al-Maghfiroh RT.03 RW.09 Pekayon, Pasar Rebo,
Jakarta Timur 13710 HP: 085219403451
Alamat E-mail : a_maryanto@lapan.go.id
a_maryanto@yahoo.com

HASIL DISKUSI DALAM PELAKSANAAN SEMINAR

Pertanyaan :

1. Apakah sudah dilakukan simulasi? Bagaimana hasilnya? Mengapa tidak dicantumkan?
2. Apa-apa saja yang termasuk dalam parameter eksternal kamera itu?

Jawaban :

1. Simulasi sudah kami lakukan, akan tetapi tidak kami tampilkan karena masih ada beberapa *error* sehingga mempengaruhi akurasi letak koordinat yang sebenarnya di bumi. Simulasi tersebut, kami lakukan dengan menggunakan data *ancillary*, *ephemeris*, dan *attitude* satelit SPOT4 (instrumen HRVIR2, tanggal 29/09/1998). Hasil yang diperoleh sedikit berbeda dengan lokasi objek pada *scene* (koordinat sebenarnya di bumi), hal ini bisa jadi dikarenakan kurang tepatnya kami dalam menginterpretasikan posisi satelit.
2. Parameter eksternal kamera adalah parameter yang berada di luar kamera, yaitu parameter yang terkait antara sistem pencitra (kamera), satelit, dan bumi. Dan biasanya data-data ini terdapat dalam data *ephemeris* dan *ancillary*.