

## 高分解能衛星画像のためのベクトル図形基準点の精度検証

### Accuracy Validation of Poly-Line Type Ground Control Points for High Resolution Satellite Imagery

高木 方隆\*・國友 達也\*・小島 光博\*・石田 圭佑\*

*Masataka TAKAGI, Tatsuya KUNITOMO*

*Mitsuhiro KOJIMA and Keisuke ISHIDA*

**Abstract:** Nowadays, high resolution satellite imageries can be used in various fields. The imageries are expected to measure precise coordinates. Then accurate geometric model is required to calculate image coordinates ( $u, v$ ) from ground coordinates ( $x, y, z$ ). Generally, RPC model is applied as the accurate geometric model. However, the RPC model has a systematic error with several pixels. To correct the RPC model, information of GCP (Ground Control Points) should be used. GCP are consisted with precise ground coordinates and corresponded image coordinates. An accuracy of ground coordinates is required less than  $1/5$  of ground sampling distance of satellite imagery.

GCP database in Shikoku Japan has been established by authors. Over 550 points were finished to survey within 4cm accuracy by GPS VRS observation. However, point based GCP doesn't have enough accuracy for high resolution satellite imageries. Because, image coordinates are selected by visual interpretation. Poly-lines or polygon type GCP should be prepared to select accurate image coordinates by image processing.

In this study, Poly-line type GCP were suggested. Target satellite imageries are ALOS PRISM which are panchromatic imageries with 2.5m ground sampling distance. In the test area, 5 intersections and 4 curves of road were surveyed, and Poly-line type GCP were prepared. Corresponding coordinates of Poly-line type GCP in PRISM imageries can be computed by image matching process. Least squares matching method was applied in this study. Then, precise image coordinates can be obtained.

Poly-line type GCP were validated using bias corrected RPC model. The root mean square error showed 0.5 pixel. On the other hand, point based GCP were also validated. In the case of point based GCP, corresponding coordinates were selected by visual interpretation. The root mean square error showed around 1.0 pixel. The results showed poly-line type GCP were effective for precise image registration.

#### 1. はじめに

人工衛星画像の幾何補正は、幾何モデルと共に基準点の精度も重要である (Toutin, 2004)。高分解能の衛星画像の幾何補正は、幾何モデルとして RPC を用いる事が一般的になりつつある (Dowman et al., 2000) (Tao et al., 2002)。RPC モデルにより、基準点がなくとも幾何補正は可能となったが、精密な幾何補正のためには、バイアス補正のために基準点が必要である。

幾何補正の精度は、地上基準点の地上座標の位置精度、対応する画像座標の位置精度、基準点の空間分布が関わっている。

さて、高分解能衛星の地上基準点は、地形図から取得するのでは精度が十分ではない (Smith et al., 2001)。ある画像をベースとして、画像マッチングを利用した幾何補正も提案されているが (Shi et al., 2006)、絶対精度を求める場合には問題である。したがって、地上基準点は、現地で GPS 等により精密に測る必要がある (Homniam et al., 2006)。

著者らは、四国全域を対象に基準点データベースの構築を行って来た (小島ら, 2009) (図1.1を参照)。道路の交差点、橋梁の中心、堤防の屈折点等を GPS VRS

\*高知工科大学社会システム工学科  
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 49, NO. 6, 2010

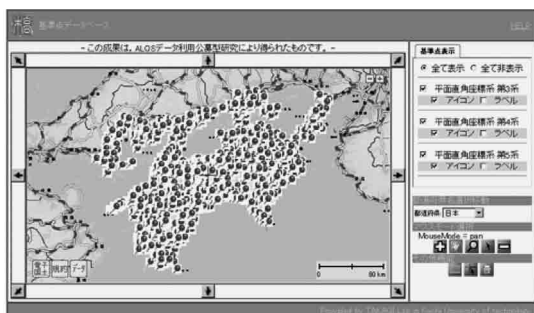


図1.1 基準点データベース



図1.2 従来の基準点取得地物例

観測により測量し、基準点としている(図1.2を参照)。現在、550点を越える基準点を整備し、ホームページで公開をしている (<http://www.infra.kochitech.ac.jp/takalab/Information/research/GCPDB/GCPDB.html>)。このページでは、基準点の座標情報だけでなく、現地のどこを測ったのかが分かるように、GPS 測量の風景写真と基準点周辺の衛星画像が見られるようになってい

る。ところで、多シーンの衛星画像を用いて変化抽出を行う場合は、少なくとも残差0.5ピクセル未満の非常に精度の高い幾何補正を行う必要がある (Stow et al., 2003) (Jeong et al., 2006)。サブピクセルで基準点の座標と画像上の座標とを対応させるためには、ラインやポリゴンで構成されるベクトル図形を画像化し、これを基準点として用いることにより、衛星画像に生じる幾何学的歪みによる影響等を少なくすることが非常に有効である。現在既に、道路等の交差点を利用した基準点 (Xiaolian et al., 2005) や、ポリゴンの図心を利用した基準点 (宮田ら, 2005) の提案がなされている。このような地上基準点は、本研究では、ベクトル図形基準点と呼び、幾何補正のための標定点として扱う。このベクトル図形基準点として、市街地における道路の交差点、農地が利用できる。しかし、山間部では、交差点が明瞭でなく、大きな農地も少ないのが問題である。そこで道路のカーブや河川の流路等の形状自体も基準点とすることで山間部の基準点を増やすことが望ましい。

## 2. 目的と研究手法

本研究の目的は、道路のカーブなどの形状のベクトル図形を基準点として利用し、RPC モデルの高精度のバイアス補正を実現するものである。

まず高分解能衛星画像の幾何補正に用いる基準点として、衛星画像上で周辺の地物との判別が容易である道路等の特徴的形状を測量することによって取得し、ベクトル図形基準点を作成する。次に、作成したベクトル図形と衛星画像とを画像処理手法によりマッチングさせ、対応点を探索する。得られた対応点についてバイアス補正された RPC モデルを用いて、幾何補正の精度を検証する。今回、高分解能衛星画像として ALOS PRISM Level 1B1画像を利用する。PRISM は空間分解能が2.5m のパンクロ画像である。本研究では高知県中央部の PRISM 画像を対象にベクトル型基準点の作成を行った。画像範囲を図2.1に示す。

## 3. ベクトル図形基準点と衛星画像のマッチング手法

ベクトル図形基準点は、衛星画像の分解能に応じて地上座標情報を有した画像を作成し、その画像を衛星画像とのマッチング手法により、対応するポイントの座標を取得するためのものである。本研究では、地上座標を有した画像を XY 画像、衛星画像を UV 画像として、画像マッチングを行う。XY 画像は、平面直角座標系の第 IV 系に従う座標データをもとに作成する。UV 画像は、画像の左上コーナーを原点とする左手系の画素を単位とする座標系で表現する。

画像マッチングには最小二乗マッチングを適用し

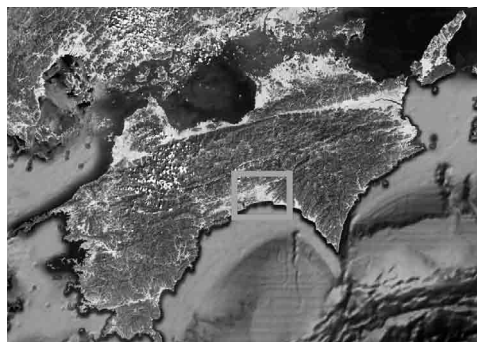


図2.1 使用した PRISM 画像範囲 (赤枠)

た。最小二乗マッチングは、マッチング元となる XY 画像とマッチングさせる UV 画像を用い、UV 画像を濃度変換・幾何変換により XY 画像に逐次近似させながら、画像同士を一致させるものである (Ackerman, 1984) (Gruen et al., 2005)。今回は、最も近似した時の幾何変換のパラメータから、対応点の決定を行う。

最小二乗マッチングに限らず画像マッチングでは、マッチングさせる画像の大きさがマッチング精度に影響を及ぼす。PRISM 画像同士の画像マッチングを試験的に行った結果、100Pixel×100Pixel 以上の大きさになると安定した精度になることが確認された。そこで、PRISM 画像で100Pixel×100Pixel、地上で250m×250m の領域をマッチングさせる地上基準点の領域とした。本研究における最小二乗マッチングでは、250m×250m の領域を対象画像としている。そこでマッチングにおける画像の幾何変換には、狭領域であることから affine 変換 (式 1) を用いることとした。なお、濃度変換は、リニアストレッチを適用している。

$$\begin{cases} X = a_1U + a_2V + a_3 \\ Y = a_4U + a_5V + a_6 \end{cases} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

$a_1 \sim a_6$  : 変換係数

最小二乗マッチングを用いたベクトル図形基準点の作成に際し、実際の衛星画像を使用する前に仮想画像を用いたシミュレーションを行った。最小二乗マッチングは、従来、衛星画像同士のマッチングに利用されてきたものであり、今回道路形状を利用して行うような図形のマッチングに利用できるか確認するためである。また同時に、目視による手法との比較も行った。

まず、十字、カーブ状の地物を画像上に作成し、地上の道路として仮定する。本研究では、十字形状、カーブ形状をそれぞれ、Intersection、Curve と呼ぶ。

XY 画像は、仮想地上画像上の道路の外郭の座標を取得し、その座標を分解能10cmの無地画像にプロットすることにより作成する (図3.1左上と図3.2左上を参照)。さらにこれを画像左下隅回りに10°回転させた状態でマッチングを行う (図3.1右上と図3.2右上を参照)。これは、単に平行移動だけでマッチングさせないための配慮で、衛星画像に見られるスキューの歪みを意識して回転させた画像を利用することにした。

UV 画像は、まず仮想地上画像の分解能を2.5mまで下げ、仮想 PRISM 画像を作成した (図3.1左下と図3.2左下を参照)。XY 画像と画像サイズを統一するため、

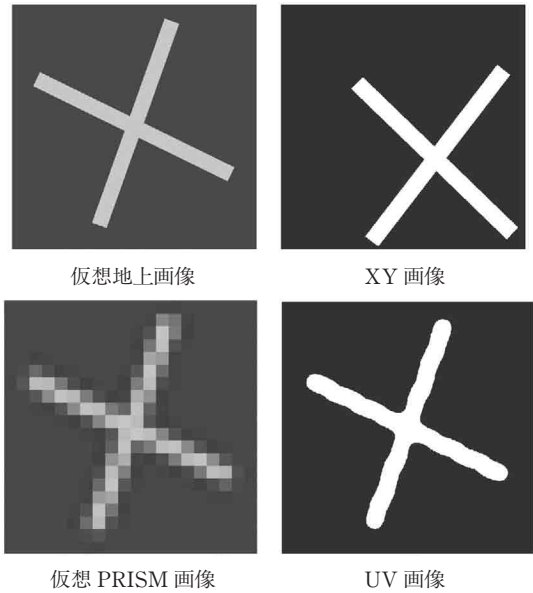


図3.1 Intersection のマッチング画像

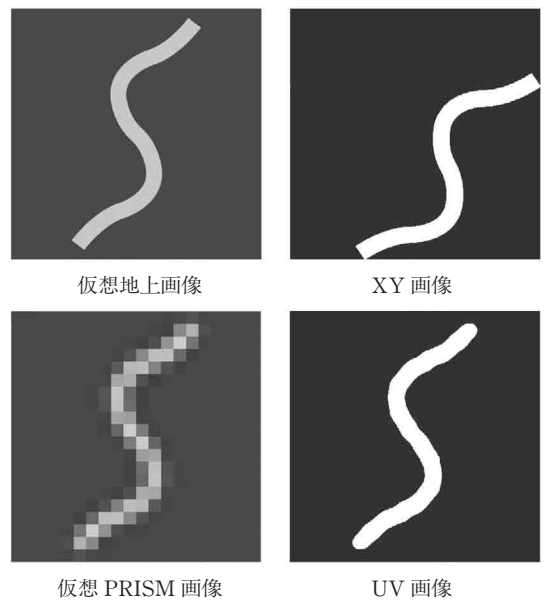


図3.2 Curve のマッチング画像

バイキュービック法を用いて仮想 PRISM 画像の分解能を変更し、コントラスト調整を行ったものを UV 画像とした (図3.1右下と図3.2右下を参照)。

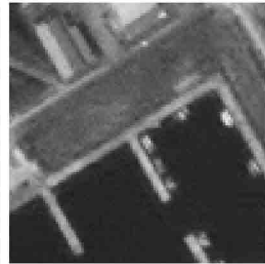
本研究では、最小二乗マッチングの精度と伴に、道路幅によって精度にばらつきがないかを確認するために、道路幅を3, 6, 9, 12, 15mまでの5段階に分けて画像を作成し、マッチングを行った。

5段階での最小二乗マッチングの結果をもとに算出



Curve XY 画像の例  
図4.1

Intersection XY 画像の例  
図4.2



Curve UV 画像の例  
図4.3

Intersection XY 画像の例  
図4.4

表3.1 最小二乗マッチングを用いた場合の RMSE (m)

	U	V
Intersection	0.020	0.016
Curve	0.017	0.015

表3.2 目視を用いた場合の RMSE (m)

	U	V
Intersection	0.121	0.154
Curve	0.184	0.293

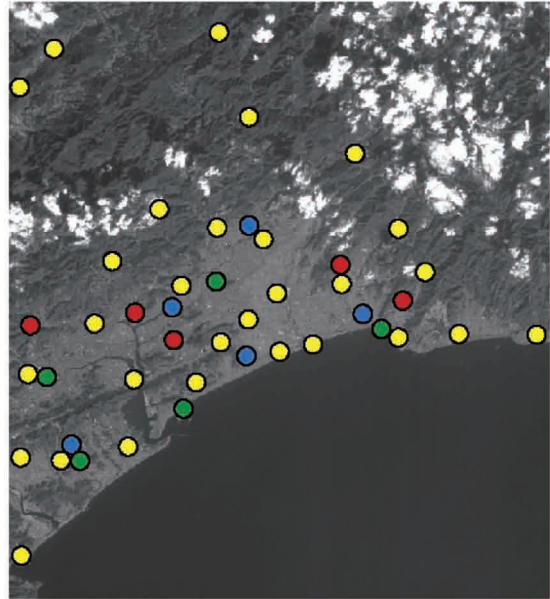


図4.5 使用 PRISM 画像  
(黄：従来の基準点 緑：Intersection 赤：Curve)

した U, V 座標の平均二乗誤差 (RMSE) を表3.1に示す。Intersection, Curve とともに0.02m 以内の精度であるという結果になった。

仮想 PRISM 画像における対応座標を目視により取得しマッチング手法との比較を行った。目視では、Intersection の場合は交差点の中心、Curve の場合は S 字の中央を10人に座標抽出してもらった。最終的な座標値は、10人の試行結果の平均値を採用し、最小二乗マッチングと同様、5段階でのマッチング結果をもとに U, V 座標の RMSE を算出した。結果を表3.2に示す。

RMSE は、Intersection, Curve とともに0.15m を越える結果となった。このシミュレーションの結果より、目視を用いる従来手法よりも最小二乗マッチングを用いた手法の方が、より高精度な基準点取得が期待できることが確認できた。

#### 4. ベクトル図形基準点の構築

実際のベクトル型基準点作成においては、地上座標は、GPS VRS 測量によって平面直角座標を取得し、取得した座標を基にして、XY 画像を作成した(図4.1と図4.2を参照)。

UV 画像は、PRISM 画像のコントラストを強調し、必要な道路以外の部分を消去することによって作成し



た (図4.3と4.4を参照)。

以上の処理によって、用意した XY 画像, UV 画像から最小二乗マッチングにより, 対応座標を取得した。

今回, Intersection 5 箇所, Curve 5 箇所についてベクトル図形基準点を構築した。また, 検証のために, 当研究室で構築している基準点データベースの基準点から27点利用した。各基準点の配置図を図4.5に示す。

## 5. 精度検証

精度検証には, 正確な幾何モデルが必要である。今回は, RPC モデルにバイアス補正を施し, 正しい幾何モデルとして精度検証を行った。RPC モデルは, RES-TEC によって提供されている PRISM 画像の幾何モデルである。規格化係数を含め, 計90の変換係数で構成されている (式2を参照)。

$$\begin{cases} U = \frac{a_1x^3 + a_2y^3 + a_3z^3 \dots + a_{20}}{b_1x^3 + b_2y^3 + b_3z^3 \dots + b_{20}} \\ Y = \frac{c_1x^3 + c_2y^3 + c_3z^3 \dots + c_{20}}{d_1x^3 + d_2y^3 + d_3z^3 \dots + d_{20}} \end{cases} \dots\dots\dots \text{式 2}$$

where

- U, V : 画像座標
- x, y, z : 地上基準点
- a, b, c, d : 変換係数
- $\Delta U, \Delta V$  : バイアス補正項

RPC モデルは, 系統的な誤差を持っているため, 5点程度の基準点座標を用いて, バイアス補正項を求める必要がある。バイアス補正には, 27個のポイント型の基準点の中から5点を抽出し, 最も精度が高いと判断された5点を選点して行った。本来ならば, ベクトル図形基準点を用いてバイアス補正するべきであるが, 平野部の大きな交差点や堤防の屈折点などは, 明瞭であるために, 精度の高い基準点を選点すれば, 変換精度1ピクセル未満を実現できる (高木ら, 2010) からである。

5点の基準点の選点手法は, PRISM 画像を4分割し, それに中央部分を加えた5区画に分割し, 各区画ごとに基準点を1点抽出した。抽出された基準点を用いてバイアス補正を行い, 他の基準点を検証点として扱うことで残差を算出した。抽出した5点の基準点のすべての組み合わせのうちで, 検証点における残差が最も少ない結果が得られた組み合わせの基準点を最終的に利用した。

表5.1 Intersection の RMSE (pixel)

	U	V
平均	0.572	0.488
最大値	0.866	0.733
最小値	0.242	0.324

表5.2 Curve の RMSE (pixel)

	U	V
平均	0.535	0.340
最大値	0.777	0.498
最小値	0.372	0.273

表5.3 従来基準点の RMSE (pixel)

	U	V
平均	0.876	1.365
最大値	0.968	1.443
最小値	0.848	1.331

精度検証は, ベクトル図形基準点に対応する PRISM 画像上の画像座標を評価する。まず, ベクトル図形基準点から作られる XY 画像中心座標の対応する画像座標が最小二乗マッチングによって求められる。一方で, バイアス補正された RPC モデルに, XY 画像の中心座標を入力することでも, 対応する画像座標が計算される。両者の画像座標の残差を誤差とみなして精度検証を行った。その結果, Intersection, Curve ともに RMSE は, 0.5pixel 前後の精度であった (表5.1と表5.2を参照)。

バイアス補正に利用しなかったポイント型の基準点について, 目視によって画像座標を抽出する事で精度検証を行った。ベクトル図形基準点の検証に使用したバイアス補正済み RPC モデルで, 従来の点ベースの基準点27点すべての RMSE を算出した結果を表5.3に示す。その結果, RMSE は v 方向において1 pixel を越え, ベクトル図形基準点の方が精度が高い事を確認した。

## 6. 考 察

高分解能衛星画像の幾何補正のために, ベクトル図形基準点を提案した。ALOS PRISM 画像を対象に, バイアス補正した RPC モデルを用いて精度検証を行った結果, 0.5pixel 程度の RMSE であった。バイアス補正した RPC モデルが, 十分な精度を有していた

のかが問題であるが、従来のポイント型の基準点よりも2倍程度精度が高い事が確認されたため、ベクトル図形基準点は有効であると考えられる。

今後、ベクトル図形基準点を増やすことによって、精度の高い幾何モデルをベクトル図形基準点を用いて構築し、幾何補正精度を絶対量で示す必要がある。そのためには、山間部での基準点を増やすことが急務である。しかし、山間部は携帯電話回線が届かない地域が多く、GPS VRS 観測が困難なため、ベクトル図形基準点の整備には、時間を要す事が課題である。

本研究は、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構における「ALOS データ利用公募型研究」の支援を受けて行っている成果の一部をまとめたものである。

(受付日2010.6.4, 受理日2010.11.12)

#### 参考文献

- 小島光博・Kyaw Sann OO・高木方隆, 2009, 高分解能衛星画像のための基準点データベースの構築, 日本写真測量学会平成21年度年次学術講演会発表論文集, pp.161-164.
- 高木方隆・小島光博・野村 洋, 2010, 四国における人工衛星画像検証データベース構築, 生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」第19回論文集, pp.47-50.
- 宮田 剛・Jong Hyeok JEONG・高木方隆, 2007: ポリゴンの図心を基準点に用いた高精度幾何補正, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 46, No. 3, pp.33-38.
- Ahmed Shaker, Wenzhong Shi and Hazem Barakat, 2005: Assessment of the rectification accuracy of IKONOS imagery based on two-dimensional models, International Journal of Remote Sensing, Volume 26, Issue 4, pp.719-731.
- C. Satirapod and P. Homniam, 2006: Precise Point Positioning Software for Ground Control Point Establishment in Remote Sensing Applications, Journal of Surveying Engineering, Vol. 132, No. 1, pp.11-14.
- C. Vincent Tao and Yong Hu, 2002: 3D Reconstruction methods Based on the Rational Function Model, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp.705-714.
- David P. Smith and Smuel F. Atkinson, 2001: Accuracy of Rectification Using Topographic Map versus GPS Ground Control Points, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 67, No. 5, 2001, pp.565-570.
- Deng Xiaolian, Li Xiangjun, Wang Changyao and Yu Rong, 2005: A remote sensing image ground control point matching algorithm based on feature corner and dynamic template, Proceedings of the SPIE, Volume 5985, pp.544-548.
- D. Stow, L. Coulter and S. Baer, 2003, A frame centre matching approach to registration for change detection with fine spatial resolution multi-temporal imagery, International Journal of Remote Sensing, Volume 24, Issue 19, pp.3873-3879.
- F. Ackermann, 1984: Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry, Photogrammetric Record, 11(64), pp. 429-439.
- Gruen, A., Akca, D., 2005: Least squares 3D surface and curve matching, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(3), 151-174.
- Ian Dowman and John T. Dolloff, 2000: An Evaluation of Rational Functions for Photogrammetric Restitution, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII(B3), pp.254-266.
- Jong Hyeok JEONG・高木方隆, 2006: An adapted Method for Removing Change Detection Errors due to Pointing Direction Shifts of a Satellite Sensor, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 45, No. 2, pp.16-23.
- T. Toutin, 2004: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, International Journal of Remote Sensing, Volume 25, pp.1893-1924.
- Wenzhong Shi and Ahmed Shaker, 2006: The Line-Based Transformation Model (LBTM) for image-to-image registration of high-resolution satellite image data, International Journal of Remote Sensing, Volume 27, Issue 14, pp.3001-3012.
- Yong H and Vincent Tao, 2002: Updating Solutions of the Rational Function Model Using Additional Control Information, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp.715-723.