

# 高分解能衛星画像における 適用可能な幾何モデルの検討

1120306 芝床 仁志

高知工科大学工学部社会システム工学科

高分解能衛星画像における適用可能な幾何モデルの検討を行った。商業用高分解能衛星GeoEye-1は、2008年に運用開始され、0.41mのパンクロマティック画像と1.64mのマルチスペクトル画像を取得可能である。GeoEye-1画像のような高分解能衛星画像の幾何補正は、RPCモデル(Rational Polynomial Coefficients)が使われている。RPCモデルは、人工衛星の位置・姿勢・センサタイプから導かれるもので、三次元多項式の分数関数となっており、非常に複雑なモデルである。複雑なモデルの場合、三次元データ生成においては、少しの誤差が大きく伝播してしまう恐れがある。そこで、GeoEye-1の高分解能衛星画像における幾何モデルとして単純な幾何モデルが適用可能なかどうかを確認した。検討の結果、シミュレーション同様、検証結果でも三次元アフィンでの幾何補正が可能だと考えた。今後は、幾何モデルの検証だけでなく、三次元計測における精度についても検討が必要である。

**Key Words :** GeoEye-1, 高分解能衛星画像, 幾何モデル, 平均二乗誤差 (RMSE)

## 1. はじめに

商業用高分解能衛星GeoEye-1は、2008年に運用開始された。GeoEye-1は、0.41mのパンクロマティック画像と1.64mのマルチスペクトル画像を取得可能である。GeoEye-1画像は分解能0.5mのパンシャープン画像として配布されている。分解能0.5mに限定されているが、分解能0.5mは、商業用高分解能衛星では最も高い分解能である。GeoEye-1は、0.5mと高分解でありながら観測幅が約15km×15kmと広域の画像を取得可能であり、ステレオ画像を取得できるため三次元データを生成することができる。図1.1にGeoEye-1による画像取得概念図を示す。

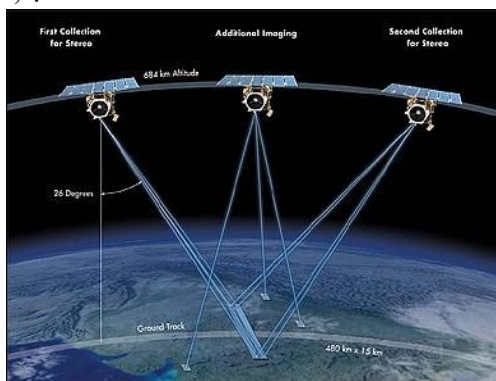


図1.1 GeoEye-1

おもに生成された三次元データは防災、インフラ整備等、様々分野に应用されている。GeoEye-1画像のような高分解能衛星画像の幾何補正は、RPCモデル(Rational Polynomial Coefficients)が使われている。RPCモデルは、人工衛星の位置・姿勢・センサタイプから導かれるもので、三次元多項式の分数関数となっており、非常に複雑なモデルである。複雑なモデルの場合、

三次元データ生成においては、少しの誤差が大きく伝播してしまう恐れがある。そこで、本研究の目的は、GeoEye-1の高分解能衛星画像における幾何モデルとして単純な幾何モデルが適用可能なかどうかを確認する。簡単な幾何モデルでの画像の幾何補正が可能であれば地上基準点の数も少なく済むため効率よく高精度の計測が期待される。

## 2. 使用データ

本研究では使用したGeoEye-1画像は、2010年3月22日に撮影された画像である。画像範囲は、高知県香美市周辺の約15km×15kmの画像である。GeoEye-1の仕様の詳細を表1.1に示す。

表1.1 GeoEye-1の仕様

項目	仕様
Sensor Name	GeoEye-1
保有者/運用機関	GeoEye社(米国)
衛星メーカー	General Dynamics社(米国)
打ち上げ	2008年9月6日(現地時間)
回帰日数	11日
再訪日数	3日
衛星軌道	太陽同期準極軌道
軌道傾斜角	98°
衛星高度	681km
焦点距離	13.3m
走査方向	東西方向、南北方向、直線的走査はすべて可能
地上分解能(GSD)	Panchromatic ナディア 0.41m オフナディア 60deg 0.50m
	Multi spectral ナディア 1.64m オフナディア 60deg 2.00m
波長域	Panchromatic 0.45~0.80μm Blue 0.45~0.51μm Green 0.51~0.58μm Red 0.65~0.69μm Nir 0.78~0.92μm
観測幅(直下)	15.2km
ポインティング	全方位45deg
量子化ビット数	11bit(2.048階調)

### 3. 幾何モデル

本研究では、以下の4つの幾何モデル式を用い、平均二乗誤差 (RMSE) により評価する。幾何モデルとは、地上座標系  $(x, y, z)$  を入力すれば画像座標系  $(u, v)$  が計算できる関数である。三次元アフィン、三次元Pseudoアフィン、独立三次元射影、RPCモデルを対象とした。各モデル式と各モデルの幾何学を以下に示す (図3.1~図3.4)。

・三次元アフィン

$$\begin{cases} u = a_1x + a_2y + a_3z + a_4 \\ v = b_1x + b_2y + b_3z + b_4 \end{cases}$$

$u, v$ : 画像座標  
 $x, y, z$ : 地上座標  
 $a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$ : 変換係数

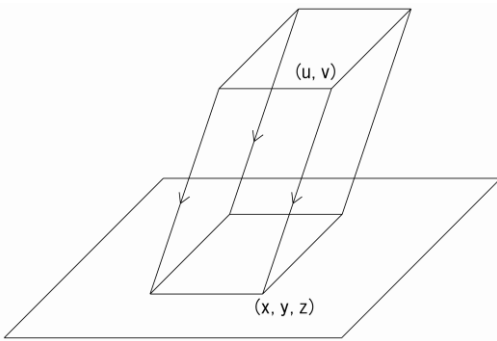


図 3.1 三次元アフィン

・三次元Pseudoアフィン

$$\begin{cases} u = a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6zx + a_7 \\ v = b_1x + b_2y + b_3z + b_4xy + b_5yz + b_6zx + b_7 \end{cases}$$

$u, v$ : 画像座標  
 $x, y, z$ : 地上座標  
 $a_1 \sim a_7, b_1 \sim b_7$ : 変換係数

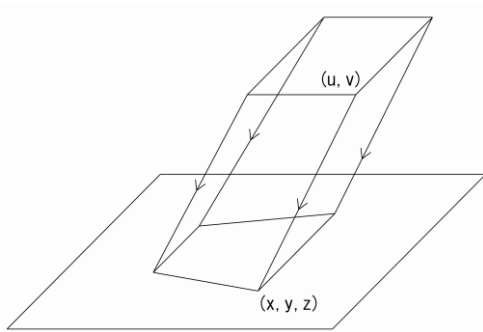


図3.2 三次元Pseudoアフィン

・独立三次元射影

$$\begin{cases} u = \frac{a_1x + a_2y + a_3z + a_4}{b_1x + b_2y + b_3z + 1} \\ v = \frac{c_1x + c_2y + c_3z + c_4}{d_1x + d_2y + d_3z + 1} \end{cases}$$

$u, v$ : 画像座標  
 $x, y, z$ : 地上座標  
 $a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_3, c_1 \sim c_4, d_1 \sim d_3$ : 変換係数

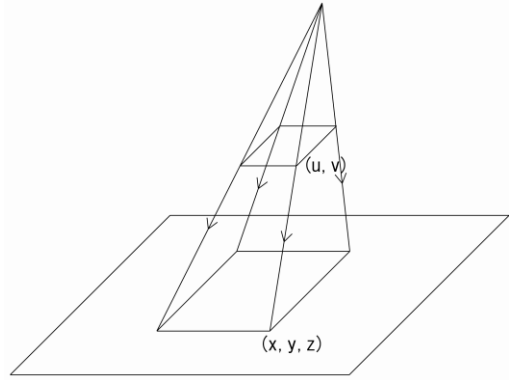


図 3.3 独立三次元射影

・RPCモデル

$$\begin{cases} u = \frac{a_1 + a_2y + a_3x + a_4z + \dots + a_{20}z^3}{1 + b_1y + b_2x + b_3z + \dots + b_{19}z^3} + e \\ v = \frac{c_1 + c_2y + c_3x + c_4z + \dots + c_{20}z^3}{1 + d_1y + d_2x + d_3z + \dots + d_{19}z^3} + f \end{cases}$$

$u, v$ : 画像座標  
 $x, y, z$ : 地上座標  
 $a_1 \sim a_{20}, b_1 \sim b_{19}, c_1 \sim c_{20}, d_1 \sim d_{19}$ : 変換係数  
 $e, f$ : バイアス補正項

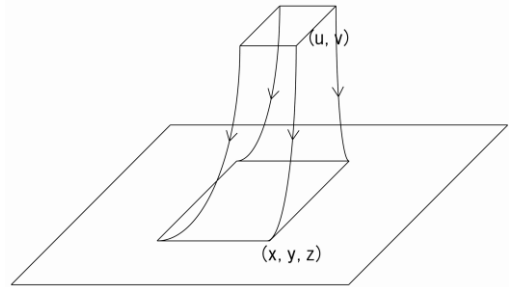


図3.4 RPCモデル

対象物とセンサの距離が近い場合は、独立三次元射影変換の幾何モデルに基づかねばならないがGeoEye-1衛星の高度は、681kmに対し、範囲は15km×15kmと非常に狭い。したがって、三次元アフィンや三次元Pseudoアフィンのような平行投影の幾何学で表現できると期待される。そこで、シミュレーションによって確認した。シミュレーションは、画像の両端に投影されている地上座標を  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$  とおき、 $z_1$  と  $z_2$  を変化させた時の画像座標  $(u_1, v_1)$ 、 $(u_2, v_2)$  間の距離の変化をみた。図3.5にシミュレーション結果を示す。シミュレーションを行った結果、このグラフから高度681kmの場合は、距離の変化がほとんどなく、線形変換が適応可能だと言える。

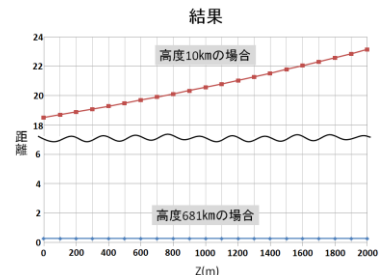


図3.5 シミュレーションの結果

#### 4. 対象範囲と基準点および検証点

シミュレーション結果は、平行投影の幾何学で代替可能とみられたため、実際の画像に適用して検討する。

基準点および検証点の取得をVRS-GPS測量によって行った。

VRS-GPS測量は、仮想基準点方式であり、全国の国土地理院電子基準点データを、配信機関である(社)日本測量協会から民間の計算センターを通じて、観測点をリアルタイムにデータを受けて観測する方法である。この測量は、数センチの精度で計測できる。なお、分解能1m未満の高分解能衛星画像の場合、基準点や検証点は、道路標示(ペイントされたもののコーナー等)や交差点の形状やポリゴンを使う必要がある1) 2) 3) 。図4.1にVRS-GPS測量の概念図を示す。

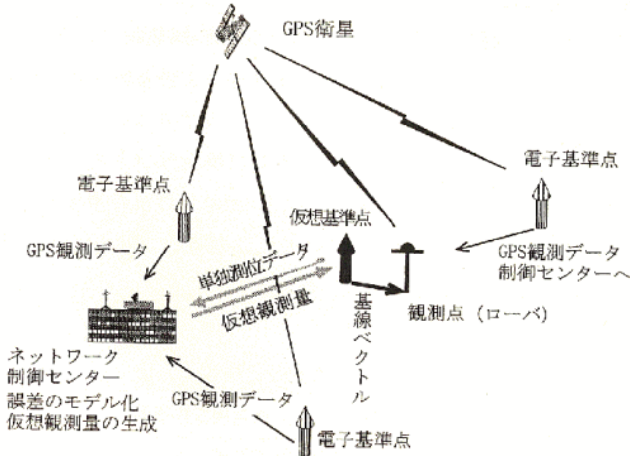


図4.1 VRS-GPS測量の概念図

今回基準点には、道路標示「横断歩道又は自転車横断帯あり」を対象とした。検証点には、道路標示に加えて、交差点のコーナーの4点、堤防の角などの1点のポイント型を対象とした。図4.2に基準点と検証点の分布を示す。赤のマーカーは基準点を、青のマーカーは検証点の位置を表している。基準点の個数は9点であり、検証点の個数は30点である。

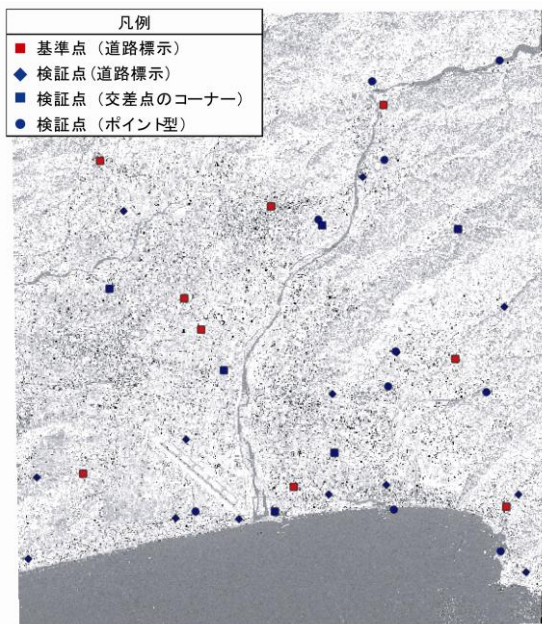


図4.2 対象範囲にある基準点・検証点分布図

#### 5. 各幾何モデルにおける係数決定手法

各幾何モデルにおける係数決定には、最小二乗法を用いた。基準点  $(x, y, z)$  と基準点に対応する画像上の座標  $(u, v)$  を幾何モデルに入力すれば、変換係数を未知数とする方式が得られる。各式について未知数の数だけ基準点があれば連立方程式により未知数を求めることができる。今回の基準点は9点あるため最小二乗法により係数を算出した。なお、RPCモデルについては、画像配布元から変換係数が提供されているのでその値をそのまま使うことができるが、RPCモデルに含まれる系統的誤差を軽減させるために、シフト変換によるバイアス補正を行った。バイアス補正項は、基準点1点のみを用いて算出した。

#### 6. 検証結果

検証は、検証点における平均二乗誤差RMSEを求めた。検証点の地上座標  $(x, y, z)$  を幾何モデルに入力し、画像座標  $(u, v)$  を算出する。この座標と目視で得られた実際の画像座標との差が誤差と言える。そこで、誤差ベクトルを作成し、図示した。図6.1に三次元アフィン、図6.2に三次元Pseudoアフィン、図6.3に独立三次元射影、図6.4にバイアス補正したRPCを表している。それぞれの誤差ベクトルをみると、三次元アフィン、三次元Pseudoアフィン、独立三次元射影では、山間部の検証点で大きな誤差がみられる。また、画像右下の検証点にも大きな誤差がみられる。それに対しバイアス補正を行ったRPCモデルは山間部でも大きな誤差がなく安定しているように見える。この誤差を平均二乗誤差RMSEで評価した。表6.1に検証点周りのRMSEを各幾何モデルごとに示している。検証点周りのRMSEをみると、三次元アフィンとバイアス補正RPCは  $u, v$  共に1pixel未満と良い結果を得ることができたが、三次元Pseudoアフィンと独立三次元射影は  $v$  が1pixel以上と期待した結果を得ることができなかった。

表6.1 検証点周りのRMSE

幾何モデル	$u$ [pixel]	$v$ [pixel]
三次元アフィン	0.652	0.783
三次元Pseudoアフィン	0.961	1.118
独立三次元射影	0.949	1.661
バイアス補正RPC	0.551	0.839

#### 7. 考察

高分解能衛星画像における適用可能な幾何モデルの検討を行った。シミュレーション同様、検証結果でも三次元アフィンでの幾何補正が可能だと言えた。今後は、幾何モデルの検証だけでなく、三次元計測における精度についても検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 宇田幸司, GeoEye-1画像を用いた三次元計測の精度検証, 高知工科大学2010年度修士論文
- 2) 宮田剛, ポリゴンの図心を基準点に用いた高精度幾何補正手法の確立, 高知工科大学2005年度修士論文
- 3) 国友達也, 高分解能衛星のためのベクトル型基準点の構築, 高知工科大学2009年度学士論文
- 4) 高木方隆, 国土を測る技術の基礎

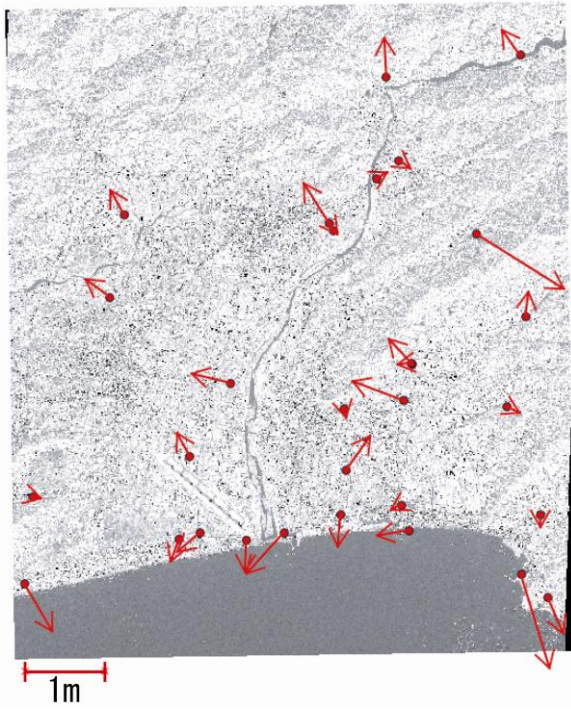


図6.1 三次元アフィン

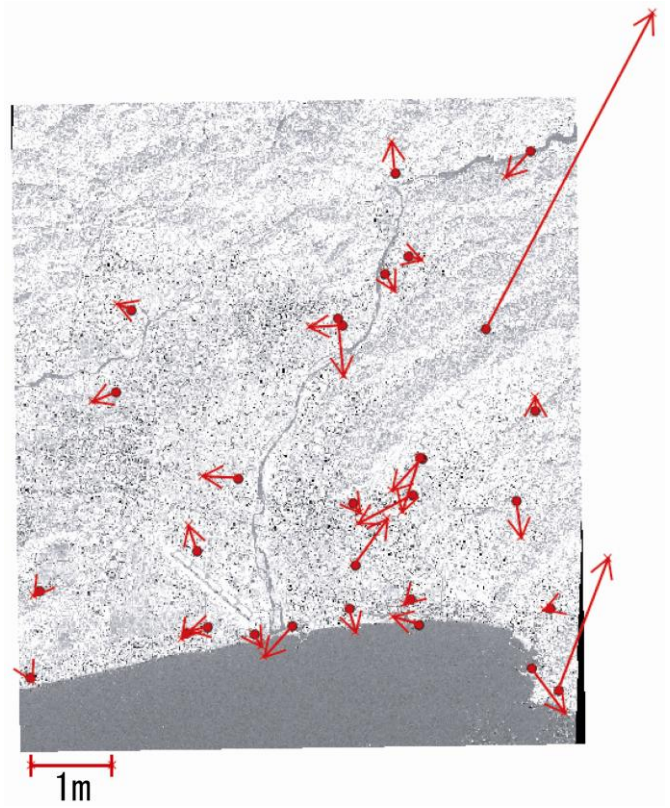


図6.3 独立三次元射影

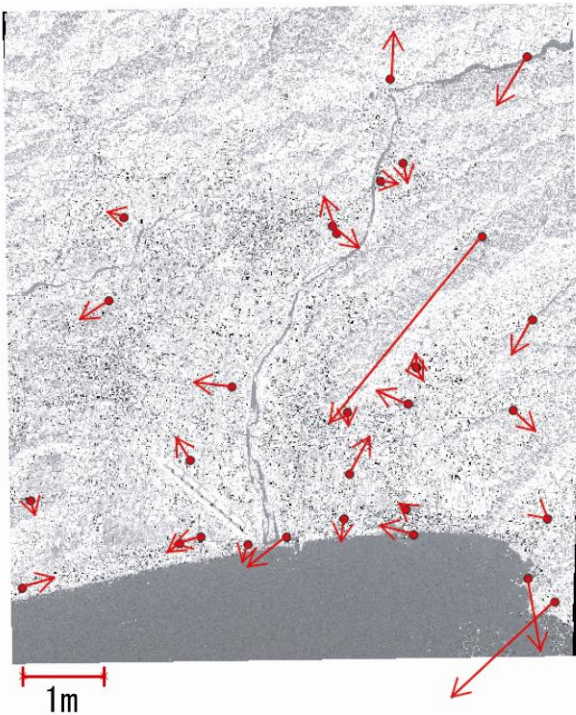


図6.2 三次元Pseudoアフィン

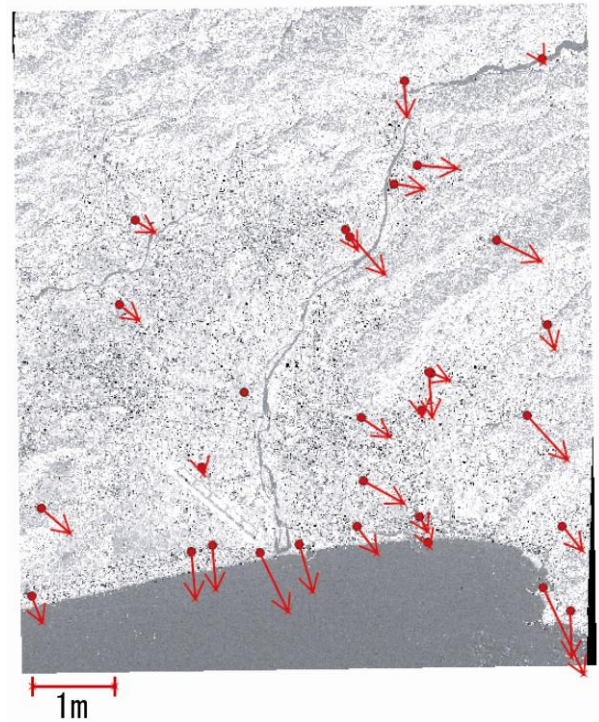


図6.4 バイアス補正したRPCモデル