

(50) 衛星画像を用いた 3 次元計測と地物の判読に関する研究

Research on 3D Ground Point Positioning and Interpretation Characteristics from Satellite Images

北川悦司¹・田中成典²・福島佑樹³・村木広和⁴

Kitagawa Etsuji, Tanaka Shigenori, Fukushima Yuki, and Muraki Hirokazu

抄録：現在，最新の衛星を利用すれば，1/2500 以下の地形図が作成可能とされている．さらに，衛星画像は，航空機に比べ膨大な地域を一度に撮影できるため，費用や時間，効率面などに優れており，既存の航空機に代わる次世代の地形図作成手法として非常に期待されている．しかし，現在は，いくつかの問題や課題があるため，国内，国外を見渡しても事例，実験レベルの研究・調査しか行われておらず，実務レベルには達していない．そこで，本研究では，衛星からの 3 次元計測を目的としている．特に，回帰周期の問題を解決するために異なる衛星画像を用いた計測手法の構築を目的とする．また，光学やレーダといった複数の衛星画像を重ね合わせることで地物の判読を行い，オブジェクトの種類毎に取得可能な情報などを整理することを目的とする．

キーワード：衛星画像，RPC モデル，DLT モデル，3 次元計測，リモートセンシング

Keywords : Satellite Image, RPC Model, DLT Model, 3D Ground Point Positioning, Remote Sensing

1. はじめに

近年，人工衛星に搭載されるセンサの技術開発が進み，地上分解能 1m 未満の衛星画像が入手可能となっている．衛星画像は，広範囲な地域を一度に撮影でき，地上分解能によっては地物の判読も十分に可能であることから，地図作成だけでなく様々な分野においての活用¹⁾が期待できる．特に，1999 年 9 月に地上分解能約 1m の地球観測衛星 IKONOS が打ち上げられて以降，ステレオ画像も取得できることから，衛星画像を用いた 3 次元計測が，既存の写真測量に代わる地形図作成手法²⁾として注目が高まった．さらに，2007 年 9 月には，地上分解能 0.45m の World View-1 の打ち上げに成功した．また，2008 年 9 月には，地上分解能 0.41m の GeoEye-1 の打ち上げに成功した．地上分解能 0.5m 以下の衛星画像を利用すれば，理論的には 1/2500 以下（分解能(m)×5000 分の 1）の地形図が作成可能とされている．このような衛星画像を用いた大縮尺地形図や DTM の作成には，高精度かつ安定した標定モデルが必要となる．そこで，本研究では，IKONOS などで有効とされた RPC モデル^{3) 4)}と DLT モデル^{3) 4)}を最新の衛星に適用し，精度を検証することを目的とする．さらに，衛星には，回帰周期や天候の問題により，必要な箇所が中々撮影できないという問題がある．そこで，本研究では，異なった衛星画像を用いた 3 次元計測⁵⁾の実現も目的とする．これにより，異なる衛星の画像を用いて 3 次元計測ができるようになるため，従来に

比べ撮影の機会が数倍にも増加し，定期的なモニタリングや地形図作成など様々な分野での衛星画像の利用が期待できる．

また，衛星画像を利用した地物の判読は，土木・建築の分野などにおいて非常にニーズが高いにもかかわらず，海外の湿地帯や海洋の判読といった広大で単調な地物の事例のみに留まっている．そこで，本研究では，光学やレーダといった複数の衛星画像を重ね合わせることで地物の判読を実現する．具体的には，オブジェクトの種類毎に取得可能な情報などを整理することを目的とする．

2. 衛星画像を用いた 3 次元計測

(1) 3 次元計測手法

本研究では，既研究^{3) 4)}において IKONOS などで有効とされた RPC モデルと RPC 付加モデル，DLT 付加モデルを用いて 3 次元計測を行った．

a) RPC モデル

RPC モデルとは，画像と被写体を直接的に変換するモデルである．RPC モデルの計算式を式(1)-(5)に示す．RPC モデルを解くためには，World View-1 や GeoEye-1 などの衛星画像と共に提供される 80 個 ($a_1 - a_{20}, b_1 - b_{20}, c_1 - c_{20}, d_1 - d_{20}$) のパラメータが必要である．

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} = \frac{P_1}{P_2} \quad y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} = \frac{P_3}{P_4} \quad (1)$$

1：正会員 情博 阪南大学 准教授 経営情報学部

(〒580-8502 大阪府松原市天美東 5 丁目 4 番 33 号, Tel:072-332-1224, E-mail: kitagawa@hannan-u.ac.jp)

2：正会員 工博 関西大学 教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2 丁目 1 番 1 号)

3：学生会員 関西大学大学院 総合情報学研究所 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2 丁目 1 番 1 号)

4：非会員 情博 (株)イメージワン GEOソリューション部

(〒163-0712 東京都新宿区西新宿 2 丁目 7 番 1 号 小田急第一生命ビル 12F)

$$P_1 = a_1 + a_2Y + a_3X + a_4Z + a_5YX + a_6YZ + a_7XZ + a_8Y^2 + a_9X^2 + a_{10}Z^2 + a_{11}XYZ + a_{12}Y^3 + a_{13}YX^2 + a_{14}YZ^2 + a_{15}Y^2X + a_{16}X^3 + a_{17}XZ^2 + a_{18}Y^2Z + a_{19}X^2Z + a_{20}Z^3 \quad (2)$$

$$P_2 = b_1 + b_2Y + b_3X + b_4Z + b_5YX + b_6YZ + b_7XZ + b_8Y^2 + b_9X^2 + b_{10}Z^2 + b_{11}XYZ + b_{12}Y^3 + b_{13}YX^2 + b_{14}YZ^2 + b_{15}Y^2X + b_{16}X^3 + b_{17}XZ^2 + b_{18}Y^2Z + b_{19}X^2Z + b_{20}Z^3 \quad (3)$$

$$P_3 = c_1 + c_2Y + c_3X + c_4Z + c_5YX + c_6YZ + c_7XZ + c_8Y^2 + c_9X^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ + c_{12}Y^3 + c_{13}YX^2 + c_{14}YZ^2 + c_{15}Y^2X + c_{16}X^3 + c_{17}XZ^2 + c_{18}Y^2Z + c_{19}X^2Z + c_{20}Z^3 \quad (4)$$

$$P_4 = d_1 + d_2Y + d_3X + d_4Z + d_5YX + d_6YZ + d_7XZ + d_8Y^2 + d_9X^2 + d_{10}Z^2 + d_{11}XYZ + d_{12}Y^3 + d_{13}YX^2 + d_{14}YZ^2 + d_{15}Y^2X + d_{16}X^3 + d_{17}XZ^2 + d_{18}Y^2Z + d_{19}X^2Z + d_{20}Z^3 \quad (5)$$

b) RPC 付加モデル

RPC 付加モデルとは、衛星画像上に一定のバイアス誤差に着目し、式(6)のように RPC モデルに平行移動量 S_x, S_y を付加したモデルである。 S_x, S_y を求めるためには、1 点以上の基準点が必要である。

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} + S_x \quad y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} + S_y \quad (6)$$

c) DLT 付加モデル

DLT モデルとは、3 次の射影変換式をベースとしてカメラパラメータ(傾きや位置)を算出する手法である。しかし、衛星画像は、中心投影の航空写真やデジタルカメラとは異なり、ラインセンサを用いたライン画像として撮影されている。そのため、DLT 付加モデルは、ラインスキャナの進行方向を x 軸とする場合、付加パラメータ項 b_{12} を付加した式(7)のようなモデルとなる。DLT 付加モデルは、各画像に対して $b_1 \sim b_{12}$ を算出し、それを利用して式(8)を解くことにより、各画像に写っている同一点の空間位置 X, Y, Z を求めることができる。ただし、式(8)を解くためには、6 点以上の基準点が必要となる。

$$x = \frac{b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4}{b_9X + b_{10}Y + b_{11}Z + 1} + b_{12}xy \quad (7)$$

$$y = \frac{b_5X + b_6Y + b_7Z + b_8}{b_9X + b_{10}Y + b_{11}Z + 1}$$

X, Y, Z : 3 次元座標

$b_1 \sim b_{12}$: DLT モデルの未知数

$$\begin{aligned} &((x - b_{12}xy) \cdot b_9 - b_1)X + ((x - b_{12}xy) \cdot b_{10} - b_2)Y \\ &+ ((x - b_{12}xy) \cdot b_{11} - b_3)Z = (b_4 - (x - b_{12}xy)) \\ &(yb_9 - b_5)X + (yb_{10} - b_6)Y + (yb_{11} - b_7)Z = (b_8 - y) \end{aligned}$$

X, Y, Z : 3 次元座標 (8)

x, y : 写真上の対応点

(2) 実証実験

本研究では、同一衛星画像を用いた 3 次元計測と、異なる衛星画像を用いた 3 次元計測の実験を行った。

a) 同一衛星画像を用いた 3 次元計測

本研究では、最新の衛星である GeoEye-1 でステレオ撮影した衛星画像を用いて、基準点なしの RPC モデルと、基準点 1 点の RPC 付加モデル、基準点 6 点の DLT 付加モデルを用いて 3 次元計測を行った。なお、基準点は、国土地理院が提供している電子国土ポータル上で取得した。利用した衛星画像の撮影データを表-1 に、計測結果を表-2 示す。表-2 が示すように、IKONOS などの既存衛星に比べ高精度に 3 次元計測できていることがわかる。特に、RPC 付加モデルについては、対応点の取得時の人為的誤差があることや、直下撮影でないため地上分解能が 0.5m 以上あることを考慮すると、高精度の計測ができたと言える。

b) 異なる衛星画像を用いた 3 次元計測

本研究では、最新の衛星である World View- 1 (2 枚) と GeoEye-1 (1 枚) の計 3 枚の衛星画像を基準点なしの RPC モデルと、基準点 1 点の RPC 付加モデルを適用して 3 次元計測を行った。利用した衛星画像の撮影データを表-3 に示す。また、利用した衛星画像を図-1 に示す。本実験では、図-2 のような円形に近い地点の中心を GPS で 2 時間計測した 12 点を検証点とし、RPC モデル(基準点なし)と RPC 付加モデル(12 点の内 1 点を基準点とした)の算出結果と比較した。GPS 測量との比較結果を表-4 に示す。表-4 が示すように、同一衛星画像(画像 1-2)及び異なる衛星画像(画像 1-3, 2-3)の両方において、数 m 以内の誤差で 3 次元計測ができた。特に、基準点を与えた RPC 付加モデルでは、直下の地上分解能程度の誤差で計測できた。この精度については、対応点の取得時の人為的誤差があ

表-1 衛星画像の撮影データ

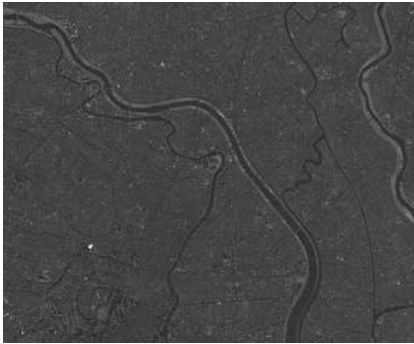
衛星名	GeoEye-1
地上分解能(直下)	0.41m
画像撮影日	2009/10/27
画像サイズ(縦)	10189pixel
画像サイズ(横)	10198pixel
撮影場所	三浦半島付近

表-2 計測結果

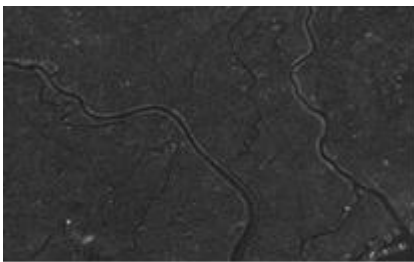
適用モデル	平均誤差(単位:m)	
	XY	Z
RPCモデル	2	1.6
RPC付加モデル	0.49	1.5
DLT付加モデル	0.72	3.09

表-3 衛星画像の撮影データ

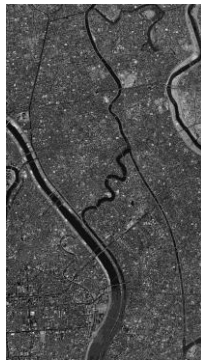
	画像1	画像2	画像3
衛星名	World View-1	World View-1	GeoEye-1
地上分解能 (直下)	0.45m	0.45m	0.41m
	※0.5mにサンプリングされた画像を利用		
画像撮影日	2007/12/14	2007/12/18	2009/3/19
画像サイズ(縦)	27892pixel	21228pixel	27116pixel
画像サイズ(横)	34571pixel	35180pixel	15398pixel
撮影場所	東京都荒川区近辺		



画像 1



画像 2



画像 3

図-1 利用した衛星画像



図-2 検証点

表-4 計測結果

		平均誤差(単位:m)		
		X	Y	Z
画像1-2	RPCモデル	0.66	1.16	4.51
	RPC付加モデル	0.91	0.58	2.08
画像1-3	RPCモデル	1.43	0.54	4.61
	RPC付加モデル	0.56	0.56	1.14
画像2-3	RPCモデル	2.08	0.96	2.94
	RPC付加モデル	0.36	0.82	1.91

ることや、直下撮影でないため地上分解能が 0.5m 以上あることを考慮すると、高精度の計測ができたと言える。

3. 衛星画像を用いた地物の判読

(1) 地物の判読手法

地物の判読手法は、まず、光学とレーダの衛星画像をそれぞれオルソ化し、重ね合わせる。次に、重ね合わせたレーダ衛星の値の差分が閾値以上の箇所を抽出する。そして、抽出画像に対して収縮膨張の処理を行うことによって、雑音を除去する。最後に差分箇所に対して、光学衛星を用いて 3 次元計測を行う。

(2) 実証実験

代表的なレーダ衛星の RADARSAT-2 で撮影した画像を様々な組み合わせ（異なる解像度や時期など）で重ね合わせて実験を行った。画像は、2011 年 5 月 2 日（解像度 3m）、2011 年 9 月 23 日（解像度 1m）、2012 年 1 月 21 日（解像度 1m）に、同じ位置と角度で撮影した物を利用した。

a) 河川の判読

2011 年 9 月に発生した台風 15 号の影響で 9 月に撮影した画像では江戸川が河川敷まで浸水していた。その画像を 5 月や 1 月の画像と重ね合わせることで浸水箇所やその領域などを把握できた。その他、溜池や海などの水に関係する地物については、非常によく違いを把握できることがわかった。このことにより、災害時の状況把握などに衛星画像が十分に利用できることがわかった。レーダ衛星で抽出できた江戸川の浸水画像を図-3 に示す。



2011 年 5 月 2 日



2011 年 9 月 23 日

図-3 河川（江戸川）の抽出部分画像



2011 年 5 月 2 日



2011 年 9 月 23 日

図-4 道路の抽出部分画像



2011 年 5 月 2 日



2012 年 1 月 21 日

図-5 建物の抽出部分画像

b) 道路の判読

道路は基本的に平面であるため、重ね合わせた場合黒くなる。そのため、ある程度の抽出は可能であることがわかった。また、新しいバイパスなどの大きな道路が作成された箇所などは抽出することができた。しかし、交通量が多い道路などは、車がゴミデータとな

っているため、上手く抽出できない場合も多かった。このことにより、既存道路の変化量抽出などは難しいが、新規に作成された道路などを抽出できるため、衛星画像が地図の更新などに利用できることがわかった。レーダ衛星で抽出できた作成段階の道路の画像を図-4 に示す。

c) 建物の判読

建物に大きな変化（ビルが建設されたなど）があった場合は、ほぼ全てで抽出できることがわかった。しかし、植栽や移動物体などの変化でも差分が抽出されるため、小さな建物の変化についてはゴミデータと区別ができなかった。そのため、地図更新という面においてはゴミデータをどのように取り除くかが非常に重要であることがわかった。このことにより、衛星画像上の変化を建物と判断できれば、地図の作成や更新など様々な分野で利用できることがわかった。レーダ衛星で抽出できた建物の変化箇所を図-5 に示す。

4. おわりに

本研究では、World View-1 や GeoEye-1 などの光学衛星において、異なる組み合わせでも高精度に 3 次元計測できることが確認できた。しかし、対応点の取得など手動で行っている点は今後の課題である。また、地物の判読についてもレーダ衛星を利用することで、ある程度行えることが確認できた。しかし、移動体や植栽などの除去が今後の課題である。

謝辞：本稿は、平成 21～23 年度科学研究費補助金（若手 A）の「衛星画像を用いた 3 次元地形図の作成と地物の判読に関する研究」の成果の一部を用いて公表するものである。

参考文献

- 1) GIS 次世代情報基盤の構築手法及び活用に関する調査研究，国土地理院，<http://www.gsi.go.jp/GIS/what/gis_gise_dai1.html>，（入手 2008 年 9. 12）。
- 2) 国際建設技術協会測量部会技術委員会新技術専門部会報告，国際建設技術協会，2005 年。
- 3) 山川毅，小野徹，服部進：高解像度衛星画像の幾何学的解析のためのシミュレーション，日本写真測量学会平成 13 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，2001 年。
- 4) 山川毅，Clive S. Fraser：高解像度 IKONOS 衛星画像を用いた精密 3 次元計測，写真測量とリモートセンシング Vol. 41, No. 2，写真測量学会，2002 年。
- 5) Rongxing Li, Feng Zhou, Xutong Niu, and Kaichang Di：Integration of Ikonos and QuickBird Imagery for Geopositioning Accuracy Analysis, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.73, No.9, pp.1067-1074, 2007.