写真地図作成における逆投影法を用いた数値標高モデルの高精度化

Improvement in the Accuracy of DEM for Orthophoto Generation
by Reverse Projection Method

杉山 史典*・近津 博文**

Fuminori SUGIYAMA and Hirofumi CHIKATSU

Abstract : Recently, generation of the orthophoto using digital aerial photograph is performed for the maintenance of spatial information data for wide areas by middle scale. For orthophoto generation, digital elevation model (DEM) by the stereo matching methods is widely used. For the efficiency of orthophoto generation, mismatching should be removed and accuracy should be improved effectively in stereo matching process.

With this motive, new method which is called “Reverse-Projection Method” to remove mismatching points on DEM generation is proposed. The most remarkable points of the method are its ability to detect mismatching points and improve accuracy of DEM using only neighbor stereo models on the strip or the next strip, and the effectiveness of the method is discussed in this paper.

1. はじめに

2007年5月に成立した「地理空間情報活用推進基本法」を受けて地理空間情報の活用施策が推進され、縮尺1/2,500から1/5,000の中縮尺かつ、広範囲にわたる空間データの整備が進められている。この空間データは国土の基盤情報として使用されるため、位置精度が要求されるばかりでなく、データの鮮度も要求されており、少なくとも数年に一度の頻度で更新されなければならないものである。このような空間データ整備の一環として、デジタル空中写真画像を使用した写真地図作成が行われている。

写真地図は航空写真測量の生成物である数値標高モデルを用いて空中写真画像を正射変換することによって作成されるが、ミスマッチングにより数値標高モデルの高さ情報が正しく取得されていない箇所では、写真地図画像の歪み、画像をモザイク処理する際の接合ズレ、および既存の地図データとの位置不整合が発生するため、目視による点検および修正が必要となる。

したがって、写真地図作成の効率化は数値標高モデル作成におけるミスマッチングの防止に集約される。

ミスマッチングを防止するための取り組みとして、空中写真画像をエピポーララインと平行な方向に偏歪修正処理した画像（以下、エピポーラ画像）を作成して探索範囲を制約する手法(Schenk, 1999)、水平位置を固定して鉛直方向にのみ座標を変動させ、共線条件式により空中写真画像上に順次投影する鉛直線軌跡の手法(Bethel, 1986)、低解像度にて概略の探索範囲を決定し高解像度では狭い範囲のみ探索する多重解像度解析(Schenk, 1999)等がある。これらの方法は画像の探索範囲を制約する手法であり、画像探索範囲を制約することにより、不要な部分を探索することがなくなり、ミスマッチングの防止を可能としている。

さらに、ステレオモデル間でテンプレートを逐次変形させ、その類似度が最も高くなるアフィン変換パラメータを採用する最小二乗マッチングによりサブピクセル単位でのマッチングが達成されている(Forstner, 1982; Ackermann, 1984; Gruen, 1985ほか)。また、テンプレートの変形式に多項式を使用することによりマッチング精度の向上が確認されているが、それでも5%のミスマッチングが発生しており(Bethmann *et al.*, 2010)、ミスマッチング発生の完全な抑制にはつながらっていない。

* 朝日航洋株式会社

**東京電機大学理工学部理工学科建築・都市環境学系
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 50, NO. 2, 2011

ミスマッチングが発生しやすい箇所としては主に以下の二つが考えられる。一つ目はステレオモデル間の画像類似度が全体的に低い箇所であり、このような箇所としてはオクルージョンが発生しやすい山間部などが該当する。一般的なマッチング手法において、ステレオモデル間の正規化相互相関係数が最大となる地点もしくは、画素値の差分が最小となる地点がマッチング点の候補となり、画像類似度が全体的に低い箇所の場合にはマッチング点の候補を採用するか棄却するかを閾値を低く設定することによりマッチングが達成される場合もある。ところが、こうして取得された点の多くはミスマッチングであり、結果的にミスマッチングした点までも採用してしまう危険性が高くなる (Schenk, 1999)。二つ目は画像類似度の極大値が複数回発生し、相関係数の最大値が正しいマッチング点ではない場合である (Schenk, 1999)。このような箇所として、同様の画像パターンが連続する水田などが該当する。

これらの原因により発生したミスマッチングを除去するための手法として以下の手法が提案されている。Foerstner (1984) は、撮影高度および周囲の高さ情報との関係から取得するマッチング点の標高値をあらかじめ推定し、実際に取得された標高値がそれと大きくかけ離れている場合は除去する手法を提案している。この手法を用いることにより、地形が平坦な箇所が発生したミスマッチングについてはある程度除去することが可能であるが、地形が急峻な箇所では正しく取得したマッチング点を誤って削除する可能性もある。Zhang ら (2006) は、ステレオモデルの一方の画像から他方の画像のマッチング点を検索した後に逆方向の検索を行い、双方向のマッチング位置を信頼性で評価するバックマッチング法を提案し、信頼性の低い点を除去することにより最大30%のミスマッチング削減に成功している。ただし、この手法は画像パターンに繰り返しがある箇所が発生したミスマッチングについては検出できない場合も想定される。Zhang ら (2005) は、連続して撮影される多重画像において中心に位置する画像を基準画像とし、基準画像と周囲の画像で構成される複数のステレオモデルのマッチング結果を比較し、もっとも信頼度の高いステレオモデルを採用するマルチレイステレオモデル法を提案している。この手法は、多視点からの画像情報が利用できるためオクルージョン箇所や同一パターンの連続箇所に対する

マッチング率の改善に有効な手法であると考えられる。ただし、この手法は多視点画像から構成される画像群に対してそれぞれステレオモデルを作成する必要があるため、処理時間が増大するという課題がある (武田ら, 2008)。

ところで、従来の空中写真測量においては進行方向に対するステレオモデルごとにステレオモデルの形成が行われていることを考えれば、進行方向前後のステレオモデル、さらには隣接コースのステレオモデルの利用が可能であり、これらの隣接ステレオモデルを利用することによりステレオモデルを新たに作成する必要もなくミスマッチング箇所の改善、防止に関する作業の効率化、さらには成果である数値標高モデルの高精度化が達成されるものと考ええる。

そこで、本研究では、隣接するステレオモデルを利用した逆投影法によるマッチング点の信頼性評価およびミスマッチングの改善を提案し、数値標高モデルの精度向上において本手法の妥当性を検討する。

2. 本研究の原理

数値標高モデル作成の一般的な処理フローはステレオモデルを形成してマッチング処理を行うというものであり、これにエピソード画像の作成および多重解像度解析を用いて、探索範囲の制約および処理速度の向上をはかっている。本研究における逆投影法とは、マッチング処理を行った後、マッチング点を隣接するステレオモデルに投影し、投影した地点における画像の類似度からマッチング結果の信頼性を評価するものである。これにより、信頼性の低い点が除去され、写真地図作成を効率化する上で課題となっているミスマッチングが防止されることにより、数値標高モデルの品質の維持および向上が行われる。逆投影法を用いた数値標高モデルの取得処理フローは図1のとおりであり、処理詳細を次節以降に示す。

2.1 ステレオモデル組み合わせおよび隣接関係の把握

本手法では従来の空中写真測量と同様にステレオモデルをそれぞれ作成するが、図2に示すとおり、同一コースでの隣接関係および隣接コースの関係を把握し、処理対象のステレオモデルと評価対象のステレオモデルの組み合わせを事前に撮影状況から決定し、処理対象のステレオモデルがどのステレオモデルを用い

図1 逆投影法を用いた数値標高モデル取得

図2 処理対象ステレオモデルと隣接関係の把握

て評価可能か把握することとする。

2.2 エピポーラ画像作成

本研究では各ステレオモデルに対して、エピポーラ画像を作成する。エピポーラ画像を作成することにより、マッチング処理でマッチング点を参照した際の類似度が向上しマッチングの可否を正しく判定できるという利点がある。

エピポーラ画像の作成はステレオモデルの左右画像それぞれについて、式(1)により基線回転行列 B に回転行列の転置行列 R^T を乗じて偏歪修正行列 P を生成し、共線条件式(2)を用いて空中写真画像からエピポーラ画像に変換する (Schenk, 1999)。

$$P = BR^T = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x_p = -f_p \frac{x_r * p_{11} + y_r * p_{12} - f_r * p_{13}}{x_r * p_{31} + y_r * p_{32} - f_r * p_{33}} \quad (2)$$

$$y_p = -f_p \frac{x_r * p_{21} + y_r * p_{22} - f_r * p_{23}}{x_r * p_{31} + y_r * p_{32} - f_r * p_{33}}$$

ここで $p_{11} \sim p_{33}$ は偏歪修正行列の各成分、 f_p は偏歪修正後の空中写真の画面距離、 f_r は偏歪修正前の空中写真の画面距離、 x_r, y_r は偏歪修正前の画像座標、 x_p, y_p は偏歪修正後の画像座標である。

2.3 マッチング

本研究におけるマッチング処理手法は写真地図作成に用いる数値標高モデルが等間隔のメッシュデータであり、平面座標を定めた上で高さ情報を取得する必要があることから、鉛直線軌跡の手法を採用することとした。

図3に示すとおり、処理対象のステレオモデルAに対するマッチング処理により左右のエピポーラ画像上でマッチング点が取得され、前方交会法による地上座標計算式により、取得したマッチング点の地上座標が計算される (Schenk, 1999)。すなわち、空中写真の外部標定要素の回転要素 κ, ϕ, ω の順に回転した回転行列の成分 $rl_{11} \sim rl_{33}$ および $rr_{11} \sim rr_{33}$ を算出し、左右のエピポーラ画像上で取得したマッチング点の画像座標 (x_{lr}, y_{lr}) および (x_{rr}, y_{rr}) を、共線条件式(3)により偏歪修正処理前の空中写真画像座標 (u_1, v_1) および (u_2, v_2) へ変換する。ここで f_r は偏歪修正前の空中写真の画面距離である。

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{x_{lr} * rl_{11} + y_{lr} * rl_{12} - f_r * rl_{13}}{x_{lr} * rl_{31} + y_{lr} * rl_{32} - f_r * rl_{33}} & v_1 &= \frac{x_{lr} * rl_{12} + y_{lr} * rl_{22} - f_r * rl_{23}}{x_{lr} * rl_{31} + y_{lr} * rl_{32} - f_r * rl_{33}} \\ u_2 &= \frac{x_{rr} * rr_{11} + y_{rr} * rr_{12} - f_r * rr_{13}}{x_{rr} * rr_{31} + y_{rr} * rr_{32} - f_r * rr_{33}} & v_2 &= \frac{x_{rr} * rr_{12} + y_{rr} * rr_{22} - f_r * rr_{23}}{x_{rr} * rr_{31} + y_{rr} * rr_{32} - f_r * rr_{33}} \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、式(4)によりステレオモデルAにおける交差残差を最小とするマッチング点の高さ情報 Z_r を計算し、式(5)によりその値を代入して左右写真上におけるマッチング点の地上座標 LX_r, LY_r および RX_r, RY_r を得て、式(6)によるマッチング点の三次元座標 G_x, G_y を算出する。式(5)における LX_c, LY_c, LZ_c および RX_c, RY_c, RZ_c は空中写真の撮影地点座標である。

図3 処理対象におけるマッチング点の概念図

$$\begin{aligned} k_1 &= LX_c - u_1 * LZ_c & k_2 &= LY_c - v_1 * LZ_c \\ k_3 &= RX_c - u_2 * LZ_c & k_4 &= RY_c - v_2 * LZ_c \end{aligned}$$

$$Z_r = -\frac{(u_2 - u_1) * (k_3 - k_1) + (v_2 - v_1) * (k_4 - k_2)}{(u_2 - u_1) * (u_2 - u_1) + (v_2 - v_1) * (v_2 - v_1)} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} LX_r &= (Z_r - LZ_c) * u_1 + LX_c & LY_r &= (Z_r - LZ_c) * v_1 + LY_c \\ RX_r &= (Z_r - LZ_c) * u_2 + RX_c & RY_r &= (Z_r - LZ_c) * v_2 + RY_c \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} G_x &= (LX_r + RX_r) / 2 \\ G_y &= (LY_r + RY_r) / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 逆投影法

本研究で提案する逆投影法は、取得したマッチング点の三次元座標を隣接する評価対象のステレオモデルに投影し、投影したステレオモデル上で類似度を算出してマッチング点の信頼性を評価するものである。

2.2節によって既に隣接するステレオモデルに対してもあらかじめエピソード画像が作成されていることから、正しくマッチングした点は投影した評価対象のステレオモデルにおいて類似度が高く評価されることとなる。なお、逆投影法は、従来法と同様にステレオモデルを構築しているため、改めて評価用にステレオモデルを作成する必要があるため、処理コストを最小限に抑えられるという利点を持つ。

式(6)によって算出された三次元座標は共線条件式によるバックプロジェクションの式 (Schenk, 1999) を用いて隣接する評価対象のステレオモデル B に投影計算される (図 4)。

投影計算は、まず空中写真の外部標定要素を元に隣接するステレオモデル B の左右空中写真を κ, ϕ, ω の順に回転した回転行列を作成し、共線条件式を用いて、取得したマッチング点の地上座標を隣接するステレオモデル B の偏歪修正処理前の左右空中写真上に投影する。次にステレオモデル B の左右空中写真の外部標

図 4 評価対象における逆投影の概念

定要素を地上座標系から、左空中写真の撮影地点を原点とし左右空中写真の基線方向を X 軸とする右手座標系とするモデル座標系に変換し、モデル座標系に変換した外部標定要素の回転要素 κ, ϕ, ω の順に回転した基線回転行列を得る。最後にステレオモデル B の左右画像それぞれについて偏歪修正行列を生成し、空中写真画像座標からエピソード画像座標に変換する。

マッチング点の信頼性は、評価対象の隣接するステレオモデルのエピソード画像上に投影した地点に対して、周囲の画像パターンの類似度を比較することにより評価する。類似度が高い場合は取得したマッチング点を採用し、低い場合はマッチング処理の結果を棄却する。なお、本研究では類似度の指標として画像の色調・コントラストによる影響を受けにくい正規化相互相関係数を用いることとした。

ここで、投影計算における処理時間は、逆投影するステレオモデル数に依存することが想定されるから、本研究では逆投影するステレオモデルの組み合わせ方法を考慮し、全モデルおよび同一コースのステレオモデル、隣接コースのステレオモデルに対し、マッチングの信頼性と処理時間から最適な組み合わせについて検証を実施した。

なお、1つのマッチング点に対して投影可能なステレオモデルが複数存在する場合は、次の手順でマッチング点の信頼性を判定する。

- ・隣接するステレオモデルにマッチング点を投影し、それぞれのステレオモデル上での類似度を計算する。
- ・各ステレオモデルについて類似度が指定した閾値以上の場合は一票を投票する。
- ・得票数が隣接するステレオモデル数の半数以上の場合にはマッチング点を採用とし、半数未満の場合は棄却する。

ここで用いる類似度の閾値は、画像の色調・コントラストによる影響を受けにくい正規化相互相関係数を評価指標として用いていることから、一意な閾値を設定することが可能であると考え、一般的にかなり強い相関があるとされている0.4 (前野・三国, 2000) を使用することとした。

また、得票数の閾値を評価可能なステレオモデル数の半数に設定した理由は、全数に設定すると正しく取得されているマッチング点について樹木による隠蔽などが起こっている場合に棄却される場合があること、

表 1 撮影諸元

地区	地物の種別	カメラ	焦点距離 (mm)	画素 サイズ (μm)	撮影縮尺	OL (%)	SL (%)	対地 高度 (m)	基線 長 (m)	理論値	
										平面 (m)	高さ (m)
A	山地	DMC	120.00	12	1 : 16,000	60	50	1944	561	0.194	0.953
B	山地・田畑	RC30	153.32	20	1 : 15,000	60	50	2126	1115	0.277	0.748
C	山地・田畑	RC30	152.94	20	1 : 12,000	70	50	2089	740	0.273	1.090
D	山地・住宅地	DMC	120.00	12	1 : 16,000	60	30	2074	593	0.207	1.025
E	山地・住宅地	RC30	213.90	20	1 : 12,500	60	30	2709	1123	0.253	0.864

逆に限りなく 0 に近い値に設定すると水田箇所など同様のパターンが連続する場合には誤って取得したマッチング点を採用する危険性を考慮したものである。

マッチングが棄却された場合には、すべてのマッチング点に対して逆投影法による評価が終了した後、棄却された点の周囲の採用されたマッチング点を用いて標高値を内挿して次の処理ステップに進むこととした。

2.5 多重解像度解析

多重画像解析は、原画像と同一の解像度を有するエピポーラ画像から段階的に解像度を下げた画像を作成し、最低解像度の画像から順にマッチング点を検索する手法であり、これによりマッチング点の検索範囲が絞り込まれ、マッチング処理が高速化される。しかし、処理途中でミスマッチングが発生した場合は、最後までマッチング点を修正することができないため、処理の途中でミスマッチングを除去して補正を行う必要がある。Foerstner (1984) は取得したマッチング点の高さ情報が周囲と大きく異なる場合は除去することにより補正を行っているが、この手法では地形が急峻な箇所では正しく取得したマッチング点まで削除してしまう可能性がある。そこで、本研究で提案する逆投影法では、多重解像度解析の各ステップにおいて、取得したマッチング点の信頼性を評価し、信頼性の低いマッチング点を除去することにより、ミスマッチングを正しく除去できるものとした。

3. 実験結果および考察

本研究で提案する逆投影法の有効性を実際の空中写真を使用して実験を行った。逆投影法の評価は、撮影

された空中写真から作成した数値標高モデルを用いて定性的・定量的な評価を行った。

3.1 計測諸元

本研究に使用する空中写真画像データは、ミスマッチングの発生頻度の高い山地を含む地域を対象として、アナログ航空カメラまたはデジタル航空カメラによって撮影されたそれぞれ撮影諸元の異なるものを使用した。検証データの計測諸元を表 1 に示す。なお、アナログ航空カメラについては表 1 に示す画素サイズによって数値化した。

3.2 逆投影法による効果の確認

本節ではマッチング処理における逆投影法の効果を確認し、それによって従来のミスマッチ判定手法における課題が解決されることを確認する。

3.2.1 エピポーラ画像作成

エピポーラ画像作成の効果を実際の画像を使用して確認を行った。図 5 に偏歪修正処理前の空中写真画像とエピポーラ画像でマッチングした地点の類似度を示す。図 5 より、偏歪修正前の空中写真画像では 0.38 であるが、エピポーラ画像では 0.60 と類似度の向上が見られ、エピポーラ画像作成の効果が改めて確認された。

図 5 偏歪修正前の空中写真画像とエピポーラ画像におけるマッチング

3.2.2 逆投影法

ここでは、マッチング処理後に逆投影法を行うことによって、マッチング箇所またはミスマッチング箇所が正しく判定されることを確認し、既往の手法である Foerstner (1984) の手法、バックマッチング法 (Zhang *et al.*, 2005) およびマルチレイステレオモデル法 (Zhang *et al.*, 2006) と比較し、その有効性について確認する。

① マッチング箇所における逆投影

まず、マッチング処理により正しく取得されたマッチング点が、逆投影法により正しく判定されるかについて確認を行ったところ、図 6 のとおりマッチング処理を行ったステレオモデル A での類似度が 0.48、隣接するステレオモデル B での類似度が 0.66 といずれも閾値を超過してマッチング点と判定されていることが確認された。

② 急傾斜箇所における逆投影

続いて、急峻な山地で正しく取得されたマッチング点が、逆投影法により正しく判定されるかについて確

図 6 マッチング処理および逆投影によるパターン比較
国土地理院撮影の空中写真（2008年撮影）を使用

図 7 マッチング処理および逆投影によるパターン比較
(急傾斜箇所・地区 A) および逆投影法を用いて作成した数値標高モデル
国土地理院撮影の空中写真（2008年撮影）を使用

認を行った。これは、撮影高度および周囲のマッチング点の高さ情報との関係から信頼性を評価する Foerstner の手法を用いた場合、このような箇所は隣接するマッチング点の高さ情報との差が大きいことから、正しく取得したマッチング点を誤って棄却してしまう可能性があり、その課題が解決されているかを確認するものである。

図 7 は隣接するマッチング点の高さ情報との差が数十メートルある急傾斜箇所取得されたマッチング点であり、逆投影法によりステレオモデル A の類似度が 0.42、ステレオモデル B の類似度が 0.68 となりマッチング点と判定された。

このように、画像の類似度によって評価する逆投影法は、隣接するマッチング点の高さ情報に依存することなく、取得したマッチング点を正しく評価することが可能である。

③ 水田箇所における逆投影

次に、同様な画像パターンが連続する水田箇所が発生したミスマッチングが、逆投影法により棄却されるかについて確認を行った。これは、ステレオモデル双方向からマッチング点の信頼性を評価するバックマッチング法を用いた場合、このように同様な画像パターンが連続する箇所においてはミスマッチングを検出することが困難な場合があり、その課題が解決されているかを確認するものである。

図 8 (a) はステレオモデル A 上でエッジボーラインと平行な方向に同様の画像パターンが連続する畦道で発生したミスマッチングである。図 8 (b) は逆投影法によりこのマッチング点を隣接するステレオモデル B に投影した像であるが、ステレオモデル B における類

図 8 マッチング処理および逆投影によるパターン比較
(水田箇所・地区 B) および同箇所の数値標高モデル

似度が-0.08と低くなり、ミスマッチングとして検出された。

このように、逆投影法は同様の画像パターンが連続する場所についても、ミスマッチングとして検出することが可能である。

④ 逆投影法による処理時間

マルチレイステレオモデル法は、連続して撮影される多重画像において中心に位置する画像を基準画像とし、基準画像と周囲の画像で構成される複数のステレオモデルのマッチング結果を比較し、もっとも信頼度の高いステレオモデルを採用する手法であるが、多視点画像から構成される画像群に対してそれぞれステレオモデルを作成するため、処理時間について課題が残る方法である。

いっぽう、逆投影法では、すでに形成されているステレオモデルをそのまま使用することが可能であるため、新たにステレオモデルを形成するための処理時間が発生することはない。

3.2.3 多重解像度解析

多重解像度解析の各段階で計算された数値標高モデルから、標高値を任意の段階に区分し、各段階を異なる色で表現する段彩図を作成することにより、ミスマッチングが多重解像度解析の各段階で除去されていることを確認する。

図9に多重解像度解析の各段階で計算された数値標高モデルから作成した段彩図を示す。逆投影法を使用

しない場合では、低解像度の段階で発生したミスマッチングが高解像度においても改善されていないが、逆投影法を用いることにより低解像度の段階で発生したミスマッチングが高解像度に至る過程で解消されていることが確認できる。なお、段彩図は格子間隔2mで作成した数値標高モデルを、高さ情報の最小値と最大値の間を20,000階調として表現したものである。

3.3 精度検証

本節では、逆投影法による効果および、逆投影法のケース別の改善効果を確認するために、マッチング処理により数値標高モデルを作成して定量的・定性的な評価を行う。

3.3.1 定量的な評価

ミスマッチング発生頻度の高い山地を含む地域を対象として、最確値にレーザデータを用いて定量的な精度検証を行う。また、逆投影法を行うステレオモデルの組み合わせについて、全モデルおよび同一コースのステレオモデル、隣接するステレオモデルを用いた場合の結果についても評価する。

レーザデータを用いた検証は、レーザデータの信頼性の高い平坦な地形から検証点を選定し、レーザデータに対する標高値の平均二乗誤差およびミスマッチングの数による検証を行った。なお、ここでのミスマッチングは式(7)に示す視差方程式から導かれる理論値 σ_{z0} を超えるものとした。

$$\sigma_{xy0} = \frac{H}{f} \sigma_p, \quad \sigma_{z0} = \sqrt{2} \frac{H}{f} \frac{H}{B} \sigma_p \quad (7)$$

σ_{xy0} ：平面座標の理論値、 σ_{z0} ：高さ座標の理論値、 H ：対地高度、 f ：焦点距離、 B ：基線長、 σ_p ：読取誤差（本研究では1画素とする。）

ここで用いる検証点の平面座標は、マッチング点の平面座標を使用することとし、レーザデータに同一の平面座標が存在しない場合には、レーザデータから不等辺三角網を生成し、内挿処理によって標高値を算出して比較することとした。なお、本研究の最確値とするレーザデータは、計測密度2.8点/m²、地図情報レベル2500の精度を満たすものである。

表2に標高値較差の平均二乗誤差を、表3にミスマッチングの発生数を示す。なお、ここで言うミスマッチングとは、各検証点についてマッチング点とレーザ

図9 多重解像度解析における数値標高モデルの推移（地区A）
国土地理院撮影の空中写真（2008年撮影）を使用

表2 平均二乗誤差

地区	検証 点数	逆投影 法なし (m)	全モデル (m)	同一 コース (m)	隣接 コース (m)
A	126	0.913	0.862	0.833	0.823
B	290	0.986	0.769	0.937	0.722
C	1049	0.877	0.739	0.836	0.799
D	730	0.752	0.646	0.736	0.698
E	1161	0.711	0.643	0.664	0.616

表3 ミスマッチング箇所数

地区	検証 点数	逆投影 法なし	全モデル	同一 コース	隣接 コース
A	126	15	13	14	14
B	290	106	89	97	89
C	1049	185	132	168	165
D	730	153	122	149	126
E	1161	263	239	253	232

データのZ座標値の較差絶対値が、高さ座標の理論値を超過したものとした。

表2、表3より、逆投影法を用いることにより平均二乗誤差およびミスマッチングの発生数ともに、逆投影法を用いなかった場合と比較して改善されていることが確認できる。また、逆投影法を用いることにより、樹木による隠蔽部などにおいて一部マッチング点がミスマッチングに転ずる場合も見られたが、全体的には改善傾向にあることが確認できる。

さらに、逆投影するステレオモデルは、全モデルを使用した場合および隣接コースを使用した場合に良い結果が得られる傾向にあり、同一コースのステレオモデルを使用した場合は、他の投影方法と比較してミスマッチング数が多いことも確認できる。

3.3.2 定性的な評価

マッチング処理によって作成した数値標高モデルを用いて段彩図を作成し、標高の変化を視覚的に把握し、広範囲を定性的に評価することにより、逆投影法の効果を確認する。

図10にマッチング範囲全体を示す写真地図および段彩図を示す。図中の四角で示したとおり全モデルおよび隣接コースのステレオモデルに対して逆投影法を用いることにより、山地箇所・水田箇所で発生したミス

図10 逆投影法により取得した数値標高モデル

マッチングが改善されていることが確認される。段彩図は前節と同様の手法により作成した。

3.4 考 察

逆投影法を行うステレオモデルの組み合わせについて、全モデルおよび同一コースのステレオモデル、隣接するステレオモデルを用いた場合の結果の差異について考察を行う。

3.3節のとおり、レーザデータとの比較および段彩図による評価により、同一コースのステレオモデルを使用した場合よりも全コースおよび隣接コースのステレオモデルを使用した場合について良好な結果を得られることが確認された。これは逆投影法に使用するステレオモデルの違いにより逆投影可能な範囲が変化することに起因しているものと考えられる。なぜならば、逆投影法はその仕組み上、取得したマッチング点を投影するステレオモデルが存在しない場合にマッチング点の信頼性を評価できないため、マッチング点の信頼性の評価は、逆投影可能な領域の割合に依存するからである。

表4は、公共測量において標準的に用いられるオーバーラップ率60%、サイドラップ率30%で撮影された地区Dについて、逆投影可能な領域の占める割合とミスマッチング箇所の削減数を示したものである。逆投影可能な領域の占める割合は全モデルを使用した場合が最も高く、同一コースのモデルを使用した場合が最

表 4 逆投影可能な領域の占める割合とミスマッチング箇所
の削減数（地区 D）

	逆投影可 能な領域の 占める割合 (%)	逆投影可能な領域内 ミスマッチング箇所数		削減数	削減率 (逆投影 可能な領 域内)
		逆投影 なし	逆投影 あり		
全モデル	78.0	121	90	31	25.6%
同一コース	43.0	38	34	4	11.8%
隣接コース	58.2	105	78	27	25.7%

も低いことが確認される。また、ミスマッチング箇所数は、全モデルを使用した場合が最も多く、同一コースのモデルを使用した場合が最も少ないことが確認できる。同様に、逆投影可能な領域に含まれるミスマッチング箇所数が多いほど削減されるミスマッチング箇所数も多いことから、逆投影可能な領域と削減数は比例関係にあると推察される。

以上のとおり、ミスマッチング箇所の削減数は、隣接する全モデルに逆投影した場合において最も高い効果が確認できるが、削減率では隣接コースに逆投影した場合と僅差であること、さらに逆投影処理にかかる時間を考慮すると、隣接コースに逆投影することが有効であると考えられる。

また、逆投影可能な領域内におけるミスマッチング削減率は、全モデルおよび隣接コースと比較して同一コースの削減率が低くなっている。これは図10に示したようなミスマッチング箇所について、同一コースのステレオモデルに逆投影する場合、エビポーララインの方向がほぼ同一となるため、ステレオモデル A 上での写像とほぼ同様になりミスマッチングとして検出できないことによると推測される。

なお、逆投影可能な範囲内にも関わらず結果が改善しなかった箇所が存在したが、その多くは樹木による隠蔽箇所であり、従来手法と同様に高い信頼度を持つマッチングを行うことが困難な箇所であった。

4. ま と め

本研究では数値標高モデルの精度向上を目的として、マッチング処理において発生するミスマッチング箇所を除去する逆投影法について提案し、撮影条件が異なる 5 種類のデータを使用して評価を行った。その結果、レーザデータとの比較による評価および段彩図を使用した評価において、逆投影法の効果が確認でき、

特に隣接する全ステレオモデルおよび隣接コースのステレオモデルを使用した逆投影法が有効であることが理解された。

また、従来手法においては棄却されていた急傾斜箇所についても正しくマッチングの評価が行われていること、水田箇所など同一のパターンが連続する箇所が発生したミスマッチングについても正しく除去されていることが確認された。

本手法は多重解像度化法における、低解像度でのマッチング処理の際に発生したミスマッチングが高解像度まで残ってしまうという課題についても、各解像度で発生したミスマッチングを正しく除去することにより解決した。これにより、多重解像度化法の利点である高速な処理を活かした上で、マッチング処理の信頼性を向上させることに成功した。

いっぽう、多視点画像を用いたマッチング処理の課題であった処理時間の増大に関しては、新たにステレオモデルを形成することなく、従来の空中写真測量業務において取得される進行方向前後のステレオモデルおよび隣接するコースのステレオモデルを用いることにより、処理時間の増大を招くことなく上記の結果を得ることに成功した。

特に、本研究は通常空中写真測量業務において取得される隣接コースのステレオモデルを利用することにより特徴があるため、数値標高モデルの精度向上、取得間隔の高密度化、計測範囲の広域化等を対象とした今後の空間データ整備の効率化に寄与するものと期待される。

（受付日2011.1.5，受理日2011.3.11）

参考文献

1. Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry, Volume I: Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedures, TerraScience, pp231-266, pp301-313.
2. Bethel, J., 1986. The DSR11 image correlator, In Proc. ACSM/ASPRS Ann. Convention, 4, 44-49.
3. Foerstner, W., 1982. On the geometric precision of digital correlation. Int. Archives of Photogrammetry vol. 24 III, Proceedings of the Symposium of the ISPRS Commision III Helsinki: 176-189.
4. Ackermann, F., 1984. Digital Image Correlation: Performance and Potential in Photogrammetry.

- Photogrammetric Record 11(64), S. 429-439.
- 5 . Gruen A.W., 1985. Adaptive Least-Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique, South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3): S. 175-187.
 - 6 . Bethmann, F., Luhmann T., 2010. Least-Squares Matching With Advanced Geometric Transformation Models, IAPRS and SIS, 38, Part5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
 - 7 . Foerstner W., 1984. Quality Assessment of Object Location And Point Transfer Using Digital Image Correlation Techniques, IBID., 25(3a), 197-219.
 - 8 . Zhang, B., Miller, S., DeVenecia, K., Walker, S., 2006. Automatic terrain extraction using multiple image pair and back matching, ASPRS 2006 Annual Conference. Reno, Nevada. May 1-5.
 - 9 . Zhang, J., Zhang, Y., Zhang, Z., 2005. Multi-Image Matching for Generation of DSM and True Ortho-Image. MIPPR 2005: SAR and Multi-spectral Image Processing. Proc. Of SPIE Vol. 6043 60431R, pp.1-7.
 10. 武田浩志, 赤松幸生, 南 義彦, 2008. 独立偏位修正法による多重撮影画像の特徴探索, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 47, No. 2, pp.16-25.
 11. 図解でわかる統計解析: 前野昌弘・三國 彰, 日本実業出版社, 2000, pp.227.