最小2乗マッチング法における画像の内挿手法のマッチング精度比較

Comparison of Image Interpolation Methods on Matching Accuracy of Least Squares Matching

松岡 龍治*・曾根 光男*・須藤 昇*・横塚 英世*

Ryuji MATSUOKA, Mitsuo SONE, Noboru SUDO and Hideyo YOKOTSUKA

Abstract: Least squares matching requires appropriate interpolation of the gray values in the search window corresponding to a template. Since there are few reports on comparison of image interpolation methods on matching accuracy, we decided to investigate performance of image interpolation methods applied to least squares matching. This paper reports an experiment conducted to evaluate image interpolation methods on matching accuracy by using 54 diverse images. Three popular methods in remote sensing and digital photogrammetry: bi-linear interpolation (BL), bi-cubic interpolation (BC), and cubic convolution (CC) were investigated. The results do not necessarily indicate that the matching accuracy of all methods depends on the interpolation accuracy. The results demonstrate that BC can produce better matching results than BL and CC in most cases when an image has no noise or smaller noises. Meanwhile, the results demonstrate that there is nothing to choose among three interpolation methods when an image has larger noises. Since the differences of the matching accuracy among three methods were small to be neglected, we conclude that BL would be the best interpolation method applied to least squares matching considering its inexpensive computational cost.

1. はじめに

ステレオ画像計測により対象物の3次元位置を正確に求めようとするときには、ステレオ対応点の位置をできるだけ精密に計測しようとするのが一般的であり、1画素以下の単位で対応位置を推定できるサブピクセル推定法がしばしば利用されることになる。ディジタル写真測量分野での代表的なサブピクセル推定法は最小2乗マッチング法であるが、この方法では、探索画像をテンプレート画像に重なり合うように幾何変換する際に、濃淡レベルを内挿する必要がある。

ディジタル画像の内挿については、1970年代より数多くの手法が提案されており (Meijering, 2002)、現在リモートセンシングやディジタル写真測量で用いられている内挿手法のほとんどが、1980年代初めまでに

発表されている (Colwell, 1983)。内挿手法の性能比較の多くが新しい内挿手法を提案する論文においてなされており、新しい内挿手法の優位性を示すために、少数の画像を対象として行った実験の結果を示すものがほとんどであり、様々なテクスチャを有する多数の画像を対象として行った実験結果の報告はほとんどない。

一方、最小2乗マッチング法では、濃淡レベルの内挿をバイリニア法で行うことが一般的であると言われている (Schenk, 1999, McGlone *et al.*, 2004)。また、Gruen (1996) は、最小2乗マッチング法を実施する際に考慮すべき項目の1つとして、濃淡レベルの内挿を挙げている。しかし、画像の内挿手法の違いによるマッチング精度の違いを多様な画像について比較した報告は、ほとんど見当たらない。

そこで、画像の内挿手法の違いによって最小2乗マッチング法におけるマッチング精度がどの程度異なるのかを、様々なテクスチャを有する多数の画像について調査することにした。前報 (松岡ほか, 2008) では、その予備調査として行った対象画像のテクスチャや内挿手法の違いによる内挿精度の違いを定量的に評

*東海大学情報技術センター

Tokai University Research & Information Center

〒151-0063 東京都渋谷区富ヶ谷2-28-4

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 47, NO. 4, 2008

価する実験の結果を報告した。今回は、画像の内挿手法の違いによる最小2乗マッチング法でのマッチング精度の違いを、様々なテクスチャを有する多数の画像について調査した実験の結果を報告する。

なお、本論文では、前報（松岡ほか，2008）で報告した対象画像のテクスチャや内挿手法の違いによる内挿精度の違いを定量的に評価する実験を、内挿精度評価実験と呼ぶことにする。

2. 実験の概要

2.1 実験対象画像

本論文では、マッチングの基準となるテンプレート画像を抽出する画像をテンプレート画像と呼び、マッチングにおいてテンプレートに対応する位置を探索する画像を探索画像と呼ぶことにする。

今回のマッチング実験では、既報（松岡ほか，2007）のマッチング実験と同様に、様々なテクスチャを有する54枚の画像を対象とした。これらの画像は、岩石、木、金属、布、草、紙などの表面や、多数の小石、種子、葉、菓子、機械部品などが一面に分布した状況を撮影した画像で、テクスチャが画像上の位置に応じて大きく変動することがない画像である。画像の内挿手法の違いによるマッチング精度の違いが平均としては1画素以下となることが予想されるため、実験に用いるテンプレート画像および探索画像は、対応位置の真値をサブピクセル単位で与えることができるように、以下のようにして作成した画像である。

- (i) 横2,048画素×縦2,048画素の大きさで、8ビット256レベルのグレースケール画像を準備する。以降この画像を原画像と呼ぶことにする。この原画像は実験には用いない。
- (ii) 画素サイズを原画像の画素サイズの横4倍×縦4倍の大きさにした低解像度画像を作成する。図1に示すように、既報（松岡ほか，2007）のマッチング実験に用いたテンプレート画像および探索画像の作成と同様に、原画像の横4画素×縦4画素、合計16画素の濃淡レベルの平均値を、低解像度画像の1画素の濃淡レベルとして作成する。
- (iii) 図1における $(\Delta c, \Delta r)$ は、横4画素×縦4画素の平均化（標本化）の開始位置を表しており、今回のマッチング実験では、テンプレート画像は $(\Delta c, \Delta r)=(0, 0)$ の1種類、探索画像は $(\Delta c, \Delta r)$

図1 横4画素×縦4画素の平均化による低解像度画像の作成

$= (1, 1) \sim (1, 3), (2, 1) \sim (2, 3), (3, 1) \sim (3, 3)$ の9種類とした。これにより対応位置の真値を1/4画素単位で与えられることになる。

- (iv) 現実の撮像素子による画像形成においては、雑音が入混入することを考慮して、低解像度画像の各画素の濃淡レベルを、原画像の横4画素×縦4画素の濃淡レベルの平均化で求める際に、ガウス雑音を加えた画像も作成する。付加するガウス雑音の標準偏差 σ_N は4, 8の2種類とする。ただし、テンプレート画像には雑音が付加せず、探索画像にのみ雑音が付加した。以後、雑音が付加していない画像を $\sigma_N=0$ のガウス雑音が付加した画像と考え、 σ_N は0, 4, 8の3種類として扱うことにする。
- (v) つまり、テンプレート画像は、平均化開始位置 $(\Delta c, \Delta r)$ が $(0, 0)$ で、雑音が付加されていない低解像度画像であり、その大きさは横512画素×縦512画素である。探索画像は、平均化開始位置 $(\Delta c, \Delta r)$ が $(1, 1) \sim (1, 3), (2, 1) \sim (2, 3), (3, 1) \sim (3, 3)$ の9種類で、 $\sigma_N=0, 4, 8$ の3種類の雑音が付加された低解像度画像であり、その大きさは横511画素×縦511画素である。

2.2 実験対象画像の特徴量

最小2乗マッチング法の結果は、画像のテクスチャの影響を受けると考えられるため、実験に使用した54枚のテンプレート画像のテクスチャ特徴量である、平均空間周波数、濃淡レベルの標準偏差および差分統計

量の特徴量 contrast を求めた。

平均空間周波数 f は、2.4.1で述べるように、テンプレート画像の大きさを決定するのにも利用した特徴量で、テンプレート画像 $t(i, j)$ の離散フーリエ変換を $T(u, v)$ とするとき、次式で求めた。

$$f = \frac{\sum_u \sum_v |T(u, v)|^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{\sum_u \sum_v |T(u, v)|^2} \quad (1)$$

差分統計量の特徴量 contrast C は、内挿精度評価実験において内挿精度との間に高い相関関係が認められた特徴量で、一定の変位 $\delta = (r, \theta)$ だけ離れた2点の濃淡レベルの差 (grey level difference vector. 以降 GLDV と表記する) の絶対値が k である確率 $P_\delta(k)$ ($k=0, 1, \dots, n-1$) (n は濃淡レベル数) から次式で計算した。

$$C = \sqrt{\sum_{k=0}^{n-1} k^2 P_{(1,0)}(k) + \sum_{k=0}^{n-1} k^2 P_{(1,\pi/2)}(k)} \quad (2)$$

これは、水平方向あるいは垂直方向に1画素離れた2点の GLDV の RMS である。高木・下田 (2004) は、 contrast を $\sum_{k=0}^{n-1} k^2 P_\delta(k)$ と定義しているが、本論文では、濃淡レベルの標準偏差 σ と次元を合わせるため、式(2)で計算される値 C を GLDV Contrast とした。また、 C を σ で除して無次元化した C/σ を正規化 GLDV Contrast と呼ぶことにする。なお、内挿精度評価実験において、画像のテクスチャ特徴量 (濃淡レベルの標準偏差, GLDV Contrast, 正規化 GLDV Contrast, 平均空間周波数) と内挿精度の評価指標 (内挿誤差, 正規化内挿誤差, 相関係数) との相関関係を調べたが、正規化 GLDV Contrast と正規化内挿誤差 (定義は2.5参照) の組み合わせが最も強い相関関係があることを示した組み合わせであった。

表1に、 f , σ , C , C/σ の最小値, 最大値, 平均値を示す。また、図2に、54枚のテンプレート画像の f に対する σ , C , C/σ の分布を示す。なお、対象画像を、 f の昇順で、IMG01, IMG02, ……、IMG54と番号を

付けたため、図2では、左から IMG01, IMG02, ……、IMG54の順で、画像の特徴量が示されていることになる。表1の最下段に示した IMG29の f , σ , C , C/σ の

図2 テンプレート画像のテクスチャ特徴量

表1 テンプレート画像のテクスチャ特徴量

	平均空間周波数 f	濃淡レベルの標準偏差 σ	GLDV Contrast C	正規化 GLDV Contrast C/σ
最小値	25.0 (IMG01)	11.9 (IMG52)	15.2 (IMG16)	0.404 (IMG01)
最大値	148.2 (IMG54)	65.1 (IMG37)	88.3 (IMG47)	1.669 (IMG54)
平均値	79.2	39.1	40.1	1.050
IMG29	79.2	38.6	41.9	1.086

図3 実験に用いたテンプレート画像の中で特徴的な画像

値は、全54枚のテンプレート画像のそれぞれの平均値にほぼ一致しており、図2において、IMG29は54枚のテンプレート画像の特徴量の分布のほぼ中央に位置する。図3に、54枚のテンプレート画像の代表として、IMG01(f が最小)、IMG54(f が最大)、IMG52(σ が最小)、IMG37(σ が最大)、IMG29の5枚の画像を示す。

2.3 実験対象とした画像の内挿手法

内挿精度評価実験と同様に、最小2乗マッチング法における画像の内挿手法として、以下に示す1次式を用いたたたみ込み内挿法であるバイリニア法および3次式を用いたたたみ込み内挿法であるバイキュービック法とキュービックコンボリューション法の3種類を実験対象とした。

以下の説明では、画像データが与えられている格子点（以降観測点と呼ぶ）の画像座標を (i, j) 、その画像データを $P_{i,j}$ とし、画像データを求めたい点（以降内挿点と呼ぶ）の画像座標を (u, v) 、その画像データを P とする。また、画像座標 (u, v) に対応した格子点の画像座標 (k, l) を次式で求めることにする。

$$\begin{cases} k = [u] \\ l = [v] \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $[ ]$ はガウス記号で、小数部分を切り捨てて整数部分を取りだすものである。

2.3.1 バイリニア法

バイリニア法（共1次内挿法。bi-linear interpolation. 以降BLと略記する）は、以下の式(5)で示す1次式 $w(t)$ を重み関数として、内挿点の周囲の観測点4点の画像データ $P_{i,j}$ ($k \leq i \leq k+1, l \leq j \leq l+1$)を用いて、次式(4)で内挿点の画像データ P を計算する手法である。

$$P = [w(l-v) \ w((l+1)-v)] \begin{bmatrix} P_{k,l} & P_{k+1,l} \\ P_{k,l+1} & P_{k+1,l+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(k-u) \\ w((k+1)-u) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$w(t) = \begin{cases} 1-|t|, & |t| \leq 1 \\ 0, & |t| > 1 \end{cases} \quad (5)$$

2.3.2 バイキュービック法

バイキュービック法（共3次内挿法。bi-cubic interpolation. 以降BCと略記する）は、以下の式(7)で示す3次式 $w(t)$ を重み関数として、内挿点の周囲の観測点16点の画像データ $P_{i,j}$ ($k-1 \leq i \leq k+2, l-1 \leq j \leq l+2$)を用いて、次式(6)で内挿点の画像データ P を計算する手法である（Simon, 1975；Keys, 1981）。

$$P = [w((l-1)-v) \ w(l-v) \ w((l+1)-v) \ w((l+2)-v)] \begin{bmatrix} P_{k-1,l-1} & P_{k,l-1} & P_{k+1,l-1} & P_{k+2,l-1} \\ P_{k-1,l} & P_{k,l} & P_{k+1,l} & P_{k+2,l} \\ P_{k-1,l+1} & P_{k,l+1} & P_{k+1,l+1} & P_{k+2,l+1} \\ P_{k-1,l+2} & P_{k,l+2} & P_{k+1,l+2} & P_{k+2,l+2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w((k-1)-u) \\ w(k-u) \\ w((k+1)-u) \\ w((k+2)-u) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$w(t) = \begin{cases} \frac{3|t|^3 - 5|t|^2 + 2}{2}, & 0 \leq |t| < 1 \\ \frac{-|t|^3 + 5|t|^2 - 8|t| + 4}{2}, & 1 \leq |t| < 2 \\ 0, & 2 \leq |t| \end{cases} \quad (7)$$

2.3.3 キュービックコンボリューション法

キュービックコンボリューション法（3次たたみ込み内挿法。cubic convolution. 以降CCと略記する）は、以下の式(9)で示す3次式 $w(t)$ を重み関数として、内挿点の周囲の観測点16点の画像データ $P_{i,j}$ ($k-1 \leq i \leq k+2, l-1 \leq j \leq l+2$)を用いて、次式(8)で内挿点の画像データ P を計算する手法である（Rifman, 1973）。

$$P = [w((l-1)-v) \ w(l-v) \ w((l+1)-v) \ w((l+2)-v)] \begin{bmatrix} P_{k-1,l-1} & P_{k,l-1} & P_{k+1,l-1} & P_{k+2,l-1} \\ P_{k-1,l} & P_{k,l} & P_{k+1,l} & P_{k+2,l} \\ P_{k-1,l+1} & P_{k,l+1} & P_{k+1,l+1} & P_{k+2,l+1} \\ P_{k-1,l+2} & P_{k,l+2} & P_{k+1,l+2} & P_{k+2,l+2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w((k-1)-u) \\ w(k-u) \\ w((k+1)-u) \\ w((k+2)-u) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$w(t) = \begin{cases} |t|^3 - 2|t|^2 + 1, & 0 \leq |t| < 1 \\ -|t|^3 + 5|t|^2 - 8|t| + 4, & 1 \leq |t| < 2 \\ 0, & 2 \leq |t| \end{cases} \quad (9)$$

2.4 最小2乗マッチング法の実行条件

2.4.1 テンプレートの大きさ

テンプレートの形や大きさがマッチング結果に重大な影響を与えることは、よく知られた事実である。適切なテンプレートの形や大きさは、対象とする画像の性質（濃淡やテクスチャなど）に大きく依存するが、与えられた画像に対して、試行錯誤を行わずに、適切なテンプレートの形や大きさを決定することは非常に困難である。

本研究では、既報（松岡ほか，2007）のマッチング実験と同様に、画像ごとにテンプレートの形や大きさを変えることはせず、全対象画像に共通に、横 M_T 画素×縦 M_T 画素の正方形のテンプレートを用いることにした。ここで、 M_T の値はテンプレート画像（横512画素×縦512画素）の平均空間周波数 f から以下のようにして設定した。

実験に用いた54枚のテンプレート画像の f の平均値が79.2であり、この値から次式(10)を用いて計算される空間周期 λ の値を基にして、 λ , $1.5 \times \lambda$, $2 \times \lambda$ に最も近い奇数の値を M_T の値とした。

$$\lambda = \frac{\sqrt{M^2 + N^2}}{f} \quad (10)$$

ただし、 M , N は、テンプレート画像の大きさを表し、 $M=N=512$ 画素である。

λ の値が9.1画素であったため、 λ , $1.5 \times \lambda$, $2 \times \lambda$ に対応する M_T の値が9, 13, 17となることより、横9画素×縦9画素、横13画素×縦13画素、横17画素×縦17画素の3種類のテンプレートを用いることにした。

2.4.2 未知パラメータ

最小2乗マッチング法は幾何学的歪みに対応できる手法であるが、今回の実験では、幾何学的歪みが含まれた画像を実験対象とはしていないため、平行移動量（オフセット）だけを未知パラメータとして推定することにした。この平行移動量の初期値は、相関係数法によって求められる対応位置から計算することにした。

2.4.3 計測点

テンプレート画像上で、横50画素×縦50画素の間隔で、横10点×縦10点の合計100点を選定し、これを計測点とした。テンプレートは、この計測点を中心に、2.4.1に示した3種類の大きさで抽出した。

1枚のテンプレート画像（計測点は100点）について、探索画像の平均化開始位置 $(\Delta c, \Delta r)$ が $(1, 1) \sim (1, 3)$, $(2, 1) \sim (2, 3)$, $(3, 1) \sim (3, 3)$ の9種類あるため、9組のマッチングが行われ、計測点の合計は900点となる。

2.4.4 マッチング精度の評価方法

探索画像の平均化開始位置を $(\Delta c, \Delta r)$ とするとき、計測点の探索画像における対応位置のテンプレート画像に対するオフセットの真値が $(\Delta c/4, \Delta r/4)$ であるとし、最小2乗マッチング法によって推定した計測点 k のオフセット $(\delta c_{(\Delta c, \Delta r), k}, \delta r_{(\Delta c, \Delta r), k})$ に対する誤差 $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}$ を、次式(11)で求めた。

$$\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k} = \sqrt{(\delta c_{(\Delta c, \Delta r), k} - \Delta c/4)^2 + (\delta r_{(\Delta c, \Delta r), k} - \Delta r/4)^2} \quad (11)$$

テンプレート画像ごとの誤差として、この誤差 $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}$ のRMSを求め、その値をマッチング精度の評価に用いた。探索画像ごとの計測点数を $K (=100)$ とすると、テンプレート画像ごとの誤差は次式(12)で求められる。

$$\text{テンプレート画像ごとの誤差} = \sqrt{\frac{1}{9K} \sum_{(\Delta c, \Delta r)} \sum_{k=1}^K (\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k})^2} \quad (12)$$

ここで $(\Delta c, \Delta r)$ は $(1, 1) \sim (1, 3)$, $(2, 1) \sim (2, 3)$, $(3, 1) \sim (3, 3)$ の9種類である。

また、計測点 k において、画像の内挿手法をBL, BC, CCとしたときの誤差を、それぞれ $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[BL]}$, $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[BC]}$, $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[CC]}$ としたとき、CCを基準とした内挿手法間の誤差の差 $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[BL]} - \varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[CC]}$, $\varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[BC]} - \varepsilon_{(\Delta c, \Delta r), k}^{[CC]}$ の度数分布もマッチング精度の評価に用いた。

なお、今回の実験では、2.4.2で述べたように、平行移動量の初期値を相関係数法によって求めたが、相関係数法でのミスマッチングにより最終的に大きなマッチング誤差が発生した計測点が少ないながらも存在し、そのために画像ごとのマッチング誤差が極端に大きくなった画像が発生した。そこで、相関係数法で求められた平行移動量の初期値 $(\delta c_0, \delta r_0)$ が以下の条件を満足した計測点のマッチング結果のみを集計することにした。

$$\begin{cases} -\frac{1}{2} \leq \delta c_0 \leq +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \leq \delta r_0 \leq +\frac{1}{2} \end{cases} \quad (13)$$

条件(13)を満足した計測点の総数が最も少なかったのは $\sigma_N=8$, $M_T=9$ のときで46,370点であり、このときの画像ごとの計測点数の平均値、最小値、最大値は、それぞれ859点, 625点, 900点であった。逆に最も多かったのは $\sigma_N=0$, $M_T=17$ のときで48,340点であり、このときの画像ごとの計測点数の平均値、最小値、最大値は、それぞれ895点, 845点, 900点であった。なお、全54枚の画像の計測点の総数は48,600点である。

2.5 内挿精度の評価方法

内挿精度評価実験と同様に、テンプレート画像と内挿画像の各画素の濃淡レベルの差のRMSを内挿誤差、また内挿誤差を濃淡レベルの標準偏差 σ で割って無次元化した値を正規化内挿誤差と呼び、これらの値で内挿精度を評価した。

なお、BCとCCでは画像の幅1画素の縁に位置する画素に対する内挿処理を行うことができないため、内挿誤差の計算では、テンプレート画像および内挿画像の幅2画素の縁を除いた横508画素×縦508画素を対象とした。

3. 実験結果と考察

3.1 内挿位置によるマッチング精度の違い

内挿精度評価実験において、内挿誤差の大きさが内挿位置に依存する結果が得られたため、マッチング誤差についても内挿位置との関係を調べた。図4に、IMG29における $\sigma_N=0$ のときの内挿誤差と $M_T=9$ の場合のマッチング誤差との関係を示す。ここで、 $\langle 1-1 \rangle$ は $(\Delta c, \Delta r)=(1, 1), (1, 3), (3, 1), (3, 3)$ の4組の結果を、 $\langle 1-2 \rangle$ は $(\Delta c, \Delta r)=(1, 2), (2, 1), (2, 3), (3, 2)$ の4組の結果を、そして $\langle 2-2 \rangle$ は $(\Delta c, \Delta r)=(2, 2)$ の結果を表している。この図は、探索画像の平均化開始位置 $(\Delta c, \Delta r)$ 、すなわち内挿位置とマッチング誤差の関係を示す代表的な例である。

内挿誤差の場合とは異なり、マッチング誤差の大きさは必ずしも内挿位置に依存しないことを示す結果であった。以後、マッチング誤差については $(\Delta c, \Delta r)=(1, 1) \sim (3, 3)$ の9組すべての結果を総合した結果を示

図4 IMG29における内挿位置によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=0$, $M_T=9$)

すことを基本とする。

3.2 画像の特徴量とマッチング精度の関係

内挿精度評価実験において、正規化 GLDV Contrast と $\sigma_N=0$ のときの正規化内挿誤差との間に強い相関関係を示す結果が得られたため、マッチング誤差についても GLDV Contrast との関係調べた。図5に、GLDV Contrast と $\sigma_N=0$, $M_T=9$ の場合のマッチング誤差との関係を示す。

内挿誤差の場合とは異なり、3種類すべての内挿手法において、GLDV Contrast とマッチング誤差との間の相関関係はほとんどないと言えるほど弱いことを示す結果であった。

3.3 内挿精度とマッチング精度の関係

図6に $\sigma_N=0$ のときの $(\Delta c, \Delta r)=(2, 2)$ ($\langle 2-2 \rangle$) に

図5 正規化 GLDV Contrast とマッチング誤差の関係 ($\sigma_N=0$, $M_T=9$)

図6 <2-2>における正規化内挿誤差とマッチング誤差の関係 ($\sigma_N=0$, $M_T=9$)

における内挿誤差と $M_T=9$ の場合のマッチング誤差の関係を示す。

この図6は、3種類すべての内挿手法において、マッチング誤差が必ずしも内挿誤差に依存していないことを示しているものである。

3.4 内挿手法によるマッチング精度の違い

内挿手法によるマッチング精度の違いに関する実験結果は以下ようになった。

- (1) 図7, 図8, 図9に, $\sigma_N=0, 4, 8$ のときのマッチング誤差をそれぞれ図示する。これらの図の(a), (b), (c)は, それぞれ $M_T=9, 13, 17$ の場合のテンプレート画像ごとのマッチング誤差の散布図を, 横軸をCCのマッチング誤差, 縦軸をBLあるいはBCのマッチング誤差として示したものである。また, (d)は, 式(13)の条件を満足した計測点に関する, CCを基準とした内挿手法間のマッチング誤差の差 $\epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[BL]} - \epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[CC]}, \epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[BC]} - \epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[CC]}$ の度数分布を表している。
- (2) 表2, 表3, 表4に, $\sigma_N=0, 4, 8$ のときのマッチング誤差をそれぞれ示す。これらの表の(a)は, それぞれの画像において最もマッチング精度が高くなった内挿手法をカウントした結果を示し, (b)は, 式(13)の条件を満足した計測点に関して, CCを基準とした内挿手法間のマッチング誤差の差 $\epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[BL]} - \epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[CC]}, \epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[BC]} - \epsilon_{\{Jc, dr\}, k}^{[CC]}$ の絶対値が0.1画素を超えた計測点の割合を示す。
- (3) $\sigma_N=0$ のときの画像ごとのマッチング精度に関しては, ほとんどの画像においてBCが最も高い精度を示した。またBLとCCのマッチング精度の優劣

は画像によって大きく異なっていた。BLとCCとの比較では, $M_T=9$ では, 多くの画像でCCがBLよりマッチング精度が高く, 逆に $M_T=17$ では, 多くの画像でBLがCCよりマッチング精度が高かった。ただし, 画像ごとのマッチング誤差の内挿手法間の差の最大値は0.063画素 ($M_T=17$ のとき, BCは0.053画素, CCは0.116画素)であり, 優劣の差は大きいとは言えない。計測点ごとのマッチング精度に関しては, CCはBLとほぼ同程度の精度であり, BCより精度が低いと言える結果であった。なお, マッチング誤差の差の絶対値が0.1画素を超えた計測点の割合は $M_T=9$ の場合に最も高く, BLとCCの差では5.5%, BCとCCの差では2.8%であった。

- (4) $\sigma_N=4$ のときの画像ごとのマッチング精度に関しては, $\sigma_N=0$ のときとほぼ同様の傾向を示し, ほとんどの画像でBCが最も精度が高くなった。またBLとCCのマッチング精度の違いが画像によって大きく異なっている点も $\sigma_N=0$ と同様であった。画像ごとのマッチング誤差の内挿手法間の差の最大値は0.060画素 ($M_T=17$ のとき, BCは0.054画素, CCは0.114画素)であり, $\sigma_N=0$ のときと同様に, 優劣の差は大きいとは言えない結果であった。計測点ごとのマッチング精度に関しても, $\sigma_N=0$ のときとほぼ同様の傾向を示した。ただし, BCの優位性は $\sigma_N=0$ のときより減少した。また, マッチング誤差の差の絶対値が0.1画素を超えた計測点の割合は $M_T=9$ の場合に最も高く, BLとCCの差では6.1%, BCとCCの差では4.7%であり, 差が大きい計測点は $\sigma_N=0$ のときより増加した。
- (5) $\sigma_N=8$ のときの画像ごとのマッチング精度および計測点ごとのマッチング精度に関しては, 明らかにBCの優位性が減少した。マッチング精度に関する内挿手法の優劣は画像によって大きく異なり, 特定の内挿手法の優位性を示す結果ではないと言える結果であった。また, 画像ごとのマッチング誤差の内挿手法間の差の最大値は0.071画素 ($M_T=17$ のとき, BLは0.160画素, BCは0.231画素)であり, $\sigma_N=0$ や $\sigma_N=4$ のときと同様に, 優劣の差は大きいとは言えない結果であった。なお, マッチング誤差の差の絶対値が0.1画素を超えた計測点の割合は $M_T=9$ の場合に最も高く, BLとCCの差では8.2%, BCとCCの差では7.9%であり, 差が大きい計測点は $\sigma_N=4$ のときよりさらに増加した。

(a) 画像ごとの誤差 ($M_T=9$)

(b) 画像ごとの誤差 ($M_T=13$)

(c) 画像ごとの誤差 ($M_T=17$)

(d) 計測点ごとの誤差の差の分布

図7 内挿手法によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=0$)

表2 内挿手法によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=0$)

(a) 最もマッチング精度が高い画像の枚数

画像枚数	$M_T=9$	$M_T=13$	$M_T=17$
BL	0	0	0
BC	52	52	50
CC	2	2	4

(b) マッチング誤差の差の絶対値が0.1画素を超える計測点の割合

マッチング 誤差の差	$M_T=9$		$M_T=13$		$M_T=17$	
	< -0.1 画素	$> +0.1$ 画素	< -0.1 画素	$> +0.1$ 画素	< -0.1 画素	$> +0.1$ 画素
[BL]-[CC]	1.5%	4.0%	0.7%	2.7%	0.4%	2.2%
[BC]-[CC]	2.2%	0.6%	1.2%	0.3%	0.7%	0.2%

(a) 画像ごとの誤差 ($M_T=9$)

(b) 画像ごとの誤差 ($M_T=13$)

(c) 画像ごとの誤差 ($M_T=17$)

(d) 計測点ごとの誤差の差の分布

図8 内挿手法によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=4$)

表3 内挿手法によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=4$)

(a) 最もマッチング精度が高い画像の枚数

画像枚数	$M_T=9$	$M_T=13$	$M_T=17$
BL	5	6	7
BC	46	44	41
CC	3	4	6

(b) マッチング誤差の差の絶対値が0.1画素を超える計測点の割合

マッチング 誤差の差	$M_T=9$		$M_T=13$		$M_T=17$	
	< -0.1画素	> +0.1画素	< -0.1画素	> +0.1画素	< -0.1画素	> +0.1画素
[BL]-[CC]	2.4%	3.7%	1.2%	2.4%	0.5%	2.0%
[BC]-[CC]	3.5%	1.2%	1.7%	0.6%	0.9%	0.4%

(a) 画像ごとの誤差 ($M_T=9$)

(b) 画像ごとの誤差 ($M_T=13$)

(c) 画像ごとの誤差 ($M_T=17$)

(d) 計測点ごとの誤差の差の分布

図9 内挿手法によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=8$)

表4 内挿手法によるマッチング誤差の違い ($\sigma_N=8$)

(a) 最もマッチング精度が高い画像の枚数

画像枚数	$M_T=9$	$M_T=13$	$M_T=17$
BL	24	27	25
BC	24	20	14
CC	6	7	15

(b) マッチング誤差の差の絶対値が0.1画素を超える計測点の割合

マッチング 誤差の差	$M_T=9$		$M_T=13$		$M_T=17$	
	< -0.1 画素	$> +0.1$ 画素	< -0.1 画素	$> +0.1$ 画素	< -0.1 画素	$> +0.1$ 画素
[BL]-[CC]	4.5%	3.7%	2.0%	2.2%	1.0%	1.6%
[BC]-[CC]	4.9%	3.0%	2.3%	2.5%	1.1%	2.6%

以上の実験結果をまとめると、雑音がない ($\sigma_N=0$), あるいは小さい ($\sigma_N=4$) ときには、BC は BL, CC に比べて、ほとんどの画像でマッチング精度が高くなった。このとき、BL と CC のマッチング精度の違いは画像によって大きく異なった。雑音が大きくなるに従って、BL の優位性が明らかに減少した。そして、雑音が大きい ($\sigma_N=8$) ときには、マッチング精度に関する内挿手法の優劣は画像によって大きく異なり、特定の内挿手法の優位性を示す結果は得られなかった。ただし、雑音の有無や大小にかかわらず、内挿手法の違いによるマッチング精度の違いは無視できると言えるほど小さかった。

4. まとめ

内挿精度評価実験では、画像のテクスチャ特徴量である正規化 GLDV Contrast と正規化内挿誤差との間に強い相関関係があることが認められたが、今回の実験では、GLDV Contrast とマッチング誤差の間には相関関係がほとんどないと言える結果が得られた。

また、3 種類すべての内挿手法において、マッチング精度が必ずしも内挿精度に依存していないことを示す実験結果が得られた。

マッチング精度に関する内挿手法の比較では、探索画像に雑音が含まれていない、あるいは含まれている雑音が少ない場合には、BC は BL, CC に比べて、ほとんどの画像でマッチング精度が高くなった。これに対し、含まれている雑音が大きい場合には、マッチング精度に関する内挿手法の優劣は画像によって大きく異なり、特定の内挿手法の優位性を示す結果は得られなかった。ただし、雑音の有無や大小にかかわらず、内挿手法の違いによるマッチング精度の違いは無視できると言えるほど小さかった。

今回の実験では、最小 2 乗マッチング法でのマッチング精度に関して、BL が最適な内挿手法であるという結果は得られなかった。しかし、BL と他の内挿手法 BC や CC とのマッチング精度の違いは無視できると言えるほど小さいものであった。したがって、BL の計算コストが BC や CC の計算コストに比べて平均的には小さくなることが期待できることを考慮すると、今回の実験結果より最小 2 乗マッチング法での画像の内挿手法として BL が最も適していると結論できると考える。

(受付日2008.5.7, 受理日2008.7.15)

参考文献

- 高木幹雄, 下田陽久監修, 2004. 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, pp.1261-1267.
- 松岡龍治, 曾根光男, 須藤 昇, 横塚英世, 2007. テンプレートマッチングにおけるサブピクセル推定法の精度比較, 写真測量とリモートセンシング, vol. 46, no. 4, pp.42-54.
- 松岡龍治, 曾根光男, 須藤 昇, 横塚英世, 2008. サブピクセル推定法での利用を想定した画像の内挿手法の定量的特性評価, 写真測量とリモートセンシング, vol. 46, no. 6, pp.25-35.
- Colwell, R.N., Ed., 1983. *Manual of Remote Sensing*, Second Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, USA, pp.734-737.
- Gruen, A.G., 1996. "Least Squares Matching: A Fundamental Measurement Algorithm," *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, K.B. Atkinson Ed., Whittler Publishing, pp.217-255.
- Keys, R.G., 1981. "Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing," *IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 29, no. 6, pp.1153-1160.
- McGlone, J.C., Mikhail, E.M., Bethel, J., Eds., 2004. *Manual of Photogrammetry*, Fifth Edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, USA, pp.484-492.
- Meijering, E., 2002. "A Chronology of Interpolation: From Ancient Astronomy to Modern Signal and Image Processing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 3, pp.319-342.
- Rifman, S.S., 1973. "Digital Rectification of ERTS Multispectral Imagery," *Proceedings of the Symposium on Significant Results Obtained from the ERTS-1 (NASA SP-327)*, vol. 1, sec. B, pp.1131-1142.
- Schenk, T., 1999. *Digital Photogrammetry*, Vol. 1, TerraScience, Laurelville, OH, USA, pp.252-263.
- Simon, K.W., 1975. "Digital Image Reconstruction and Resampling for Geometric Manipulation," *Proceedings of IEEE Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, pp.3A-1-3A-11.