

最急降下法を用いた白頭山画像の融合処理

Fusion Method for Mt. Paektu Imagery Using Steepest Decent Method

栗田 康傑 (Yasutake KURITA)*、嶋野 岳人 (Taketo SHIMANO)**、
谷口 宏充 (Hiromitsu TANIGUCHI)**、工藤 純一 (Jun-ichi KUDOH)**

キーワード: スペクトルレスポンス、IKONOS、画像融合、最急降下法

1. はじめに

地球観測衛星は世界中を、様々な空間分解能で、様々な波長の電磁波を取り出すことにより撮影している [Poul et al. 1998: 823-854] [土屋 1990: 1]。SPOTやIRS、Landsat 7、IKONOS、Quickbirdの地球観測衛星にはマルチスペクトル (MS) とパンクロマチック (PAN) の特性の異なる2つのモードのセンサが搭載されている [Zhang 2002: 24-28]。MSモードのセンサから、R、G、B、近赤外 (NIR) のそれぞれの波長帯を受光している。こうして得られる4つの波長帯の画像をまとめてMS画像と呼ぶ。PANモードのセンサはR、G、Bの可視光域からNIRまでのすべての波長帯を受光していて、PAN画像を得ることができる。MSモードとPANモードのセンサから得られる画像の解像度は異なり、PAN画像の解像度はMS画像の解像度より高い。すなわち、MS画像はPAN画像と比較して多くのスペクトル情報をもっていて、PAN画像はMS画像と比較して多くの空間情報をもっている。

画像融合は高解像度で低スペクトル分解能の画像と、低解像度で高スペクトル分解能の画像を結合させることによって高解像度で高スペクトル分解能をもった画像を生成する処理である。この融合処理によってPAN画像の解像度をもったMS画像を生成することが可能になる (以下、融合処理によって得られるMS画像を、「融合MS画像」と記す)。このような異なる特性を持つ画像データを融合することにより、より多くの情報を効率的に得ることができる。

画像融合処理手法は以前から様々な手法が研究され、衛星画像に関する画像融合アルゴリズムが数多く提案されてきている。よく利用される融合処理手法として、Intensity-Hue-Saturation (IHS) 変換 [高木ら 1991: 485-491] [Smith 1978: 12-18] [Haydn et al. 1982: 599-616] [Joblore et al. 1983: 613-620] [Raines 1977: 1463-1472]、主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) [Chavez et al. 1991: 295-303] [Kathleen et al. 1989: 339-348]、Brovey変換 [Chavez et al. 1991: 295-303]、Wavelet変換 [Mallet 1989: 674-693] [Djamdjani et al. 1993: 645-653] [Ranchine et al.

* 東北大学大学院情報科学研究科

** 東北大学東北アジア研究センター

1993: 615-619] が挙げられる。これらの手法によってSPOTのPAN画像と、Landsat TM画像、SPOT HRV XS画像等のMS画像との高精度な融合処理を可能にしてきた [Chavez at el. 1991: 295-303] [Zhang 2002]。しかし、既存の融合処理手法をIKONOS画像に適用するとスペクトル歪みが生じ、処理の前後で色調が変化してしまうという問題点が明らかになった [Joblore at el. 1983: 613-620] [Chavez at el. 1991: 295-303]。スペクトルの歪みが生じる原因は2つある。1つは従来の衛星のPANの波長帯が可視光の領域であるのに対し、IKONOSのPANの波長帯が可視光から近赤外の領域まで及んでいることである。もう1つはR、G、BのそれぞれのスペクトルレスポンスのレベルがPANのスペクトルレスポンスのレベルと異なることである。この2つの原因により、融合処理の前後でMSとPANのスペクトルレスポンスの関係が保たれず、融合画像にスペクトル歪みが生じることになる。

本稿ではPAN画像とMS画像（R、G、B、NIR）の各画素値を変数としたエネルギー関数を定義し、最急降下法によってエネルギー関数が最小に収束するまで繰り返し画素値を更新する、という融合処理アルゴリズムを提案する。この提案アルゴリズムによってスペクトル歪みの小さい融合画像の生成が可能になった。そして、相関係数を用いて既存の手法との比較を行い、その有用性を示した。

2. IKONOSの概要

IKONOSは米国の軍事技術をベースに開発された世界最高性能の地球観測衛星である（表1）。この衛星はCCDセンサを搭載していて、解像度1mという高画質で世界中を撮影している（表2）。IKONOSにより撮影されたデジタル画像により、車や家屋まで識別することが可能である [日本スペースイメージング株式会社 2001: 10]。

表1 IKONOS衛星の仕様

衛星名称	IKONOS（イコノス）
運用機関	SPACE IMAGING（米国）
回帰日数	11日（直下より10度以内に戻る場合）
軌道傾斜角	98度12分
軌道の種類	太陽同期準極軌道
衛星高度	680 km
撮影時刻	午前10時～11時頃

表2 IKONOS衛星のセンサ仕様

波長域	パンクロマチック		0.45~0.90μm
	マルチスペクトル	青	0.45~0.52μm
		緑	0.52~0.60μm
		赤	0.63~0.69μm
		近赤外	0.76~0.90μm
走査方向	東西方向、南北方向、その他直線的走査はすべて可能		
地上分解能 (GSD) (オフナディア角での値)	パンクロマチック	1.0 m	
	マルチスペクトル	4.0 m	

3. 提案手法の概要

3.1 PANとMSの関係

既存の手法の1つとして挙げられるIHS変換はPAN画像とMS画像の画素値について式(1)を仮定している。そして、RGB空間をIHS空間に変換し、PANと明度 $I (= \frac{R+G+B}{3})$ の値を置き換え、再びIHS空間をRGB空間に戻すことによって融合処理する手法である。

$$PAN \cong \frac{R+G+B}{3} \quad (1)$$

式(1)はR、G、BのそれぞれのスペクトルのレスポンスレベルがPANと同じであり、かつPANのレスポンスが可視光の領域のみにあるときに成り立つ。PANと $\frac{R+G+B}{3}$ の値を置き換えることによってPANの空間情報を反映させることができる。しかし、IKONOSのセンサはスペクトルレスポンスの特性が異なるためにIHS変換によって融合処理を行うとスペクトル情報を失い、そのために色調が変化するという問題がある。

IKONOSのセンサのスペクトルレスポンスを図1に示す [Teague 2001]。図1に示されているようにMSのレスポンスとPANのレスポンスのレベルは異なっている。BのバンドのスペクトルレスポンスのピークではPANと約5 dBの差があり、GのバンドのピークもPANのレベルより大きい。また、PANのレスポンスは近赤外以降の領域まで及んでいる。以上のことから、R、G、B、NIRのバンドの画素値とPANの画素値には式(2)の関係があると仮定できる。

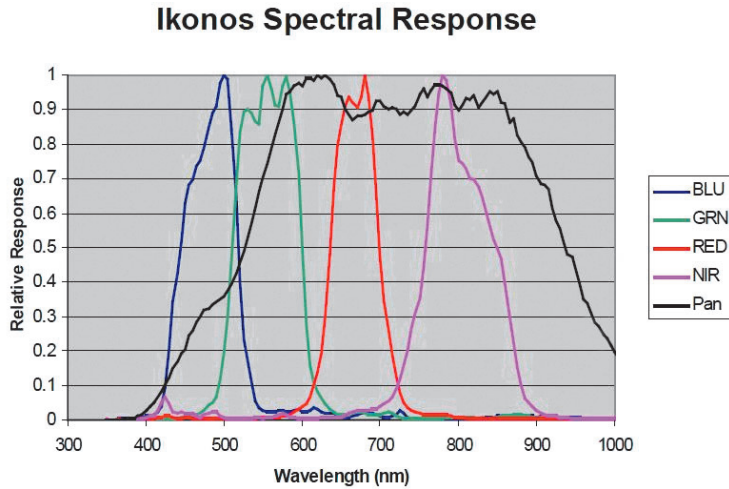


図1 IKONOSのスペクトルレスポンス（横軸：波長、縦軸：相対レスポンス）

$$PAN \cong \frac{R + a \times G + b \times B + NIR}{3} \quad (2)$$

式(2)において左辺の値の範囲は $0 \leq PAN \leq 255$ 、右辺の値の範囲は $0 \leq \frac{R + a \times G + b \times B + NIR}{3} \leq \frac{2 + a + b}{3} \times 255$ である (256階調の場合)。式(2)の左辺と右辺の範囲を一致させるために a と b について $a + b = 1$ とする。

3.2 エネルギー関数の定義

「各画素のR、G、B、NIRの画素値の重みつき和とPANの画素値との二乗誤差の和」をエネルギー関数Eとして定義し、そのエネルギー関数を最小にするように繰り返し画素値を更新していく。「各画素のR、G、B、NIRの画素値の重みつき和とPAN画像の画素値の二乗誤差の和」は

$$E = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{1}{3} (Rfi(i, j) + aGfi(i, j) + bBfi(i, j) + NIRfi(i, j)) - PAN(i, j) \right)^2 \quad (3)$$

と表すことができる。ここで $Rfi(i, j)$ 、 $Gfi(i, j)$ 、 $Bfi(i, j)$ 、 $NIRfi(i, j)$ ($0 \leq i \leq M-1$ 、 $0 \leq j \leq N-1$) は融合MS画像の座標 (i, j) の各バンドの画素値である。式(3)で定義するエネルギー関数を最小にすることによって

$$PAN(i, j) \cong \frac{Rfi(i, j) + a \times Gfi(i, j) + b \times Bfi(i, j) + NIRfi(i, j)}{3} \quad (4)$$

を満たす融合MS画像の画素値を求めることができる。

4. 提案アルゴリズム

提案手法は図2に示されるように4つのステップで構成される。まず、前処理としてMS画像の拡大を行う (STEP1)。次に融合MS画像の画素値を初期化し (STEP2)、エネルギー関数が最小になるように最急降下法を用いて繰り返し更新する (STEP3)。そして更新ごとに収束判定を行い (STEP4)、収束判定が真ならば処理を終了する。以下に各ステップの説明をする。

4.1 MS画像の拡大 (STEP1)

融合処理においてPAN画像の画素と同じ位置のMS画像の画素を1対1で対応させて処理を行うのでMS画像をPAN画像と同じサイズに拡大する (図3)。

IKONOSのPAN画像、MS画像はそれぞれ1 m 解像度、4 m 解像度なので、PAN画像サイズを M ピクセル $\times N$ ラインとすると、MS画像の画像サイズは $M/4$ ピクセル $\times N/4$ ラインとなる。このMS画像を M ピクセル $\times N$ ピクセルに拡大するために各バンドの各画素値 $R_{ms}(i,j)$ 、 $G_{ms}(i,j)$ 、 $B_{ms}(i,j)$ 、 $NIR_{ms}(i,j)$ ($0 \leq i \leq M/4-1$, $0 \leq j \leq N/4-1$) に対して、式 (5)–(8) を適用する。

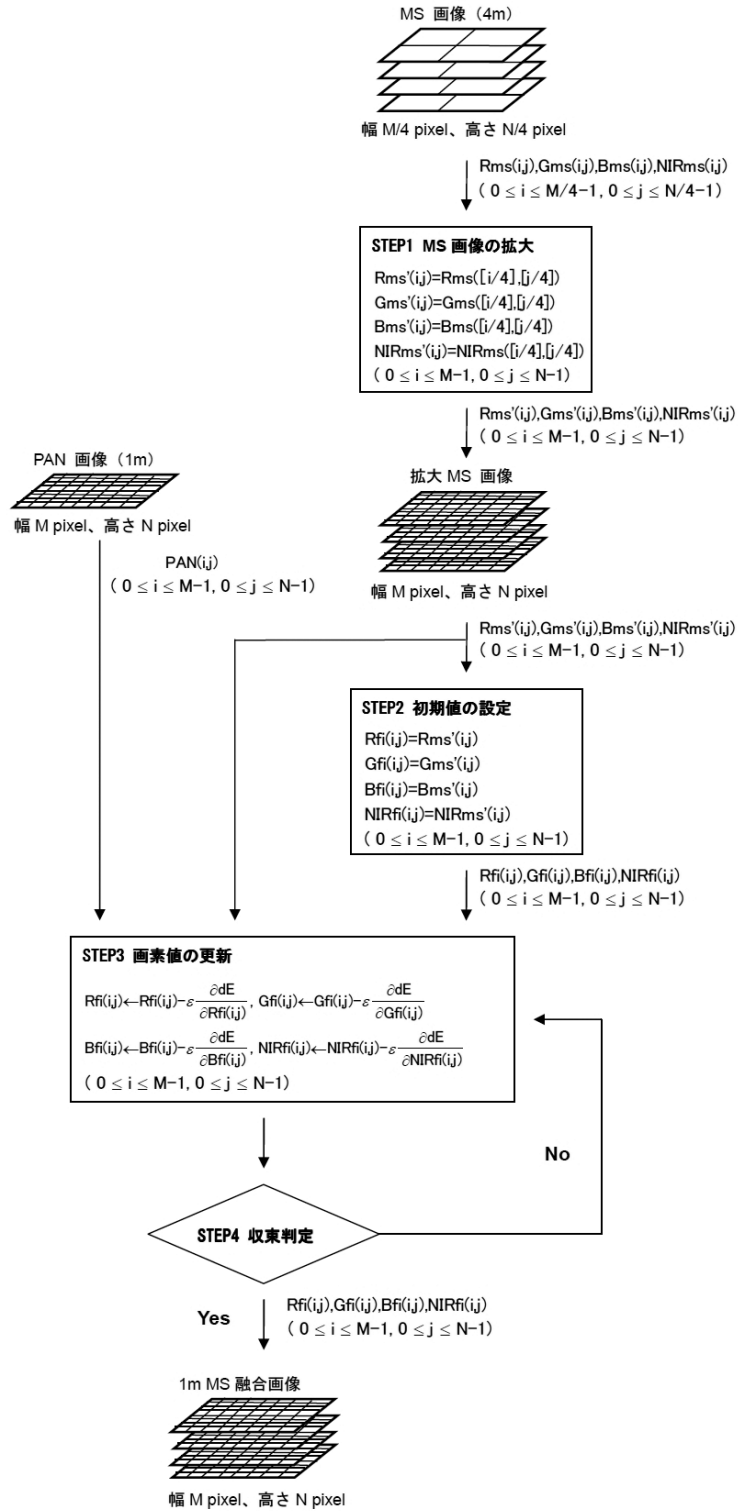


図2 提案手法のフローチャート

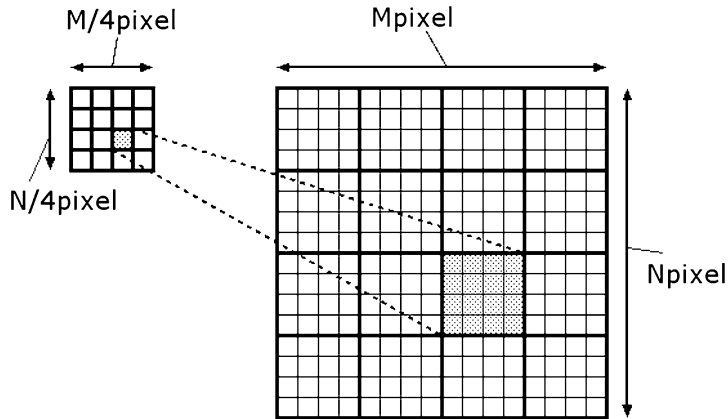


図3 MS画像の拡大（左が元のMS画像、右が拡大MS画像）

$$Rms'(i, j) = Rms([i / 4], [j / 4]) \quad (5)$$

$$Gms'(i, j) = Gms([i / 4], [j / 4]) \quad (6)$$

$$Bms'(i, j) = Bms([i / 4], [j / 4]) \quad (7)$$

$$NIRms'(i, j) = NIRms([i / 4], [j / 4]) \quad (8)$$

式 (5) - (8) から得られる $Rms'(i, j)$ 、 $Gms'(i, j)$ 、 $Bms'(i, j)$ 、 $NIRms'(i, j)$ ($0 \leq i \leq M/4-1$, $0 \leq j \leq N/4-1$) は拡大したMS画像（以降、拡大MS画像と記す）の各バンドの各画素値である。

4.2 初期値の設定 (STEP2)

融合処理において、融合MS画像の各画素値の初期化を行う。融合MS画像の各画素値 $Rfi(i, j)$ 、 $Gfi(i, j)$ 、 $Bfi(i, j)$ 、 $NIRfi(i, j)$ ($0 \leq i \leq M-1$, $0 \leq j \leq N-1$) を前節 (STEP1) で生成された拡大MS画像の各画素値にする。融合画像の任意の画素値 $Rms'(i, j)$ 、 $Gms'(i, j)$ 、 $Bms'(i, j)$ 、 $NIRms'(i, j)$ ($0 \leq i \leq M-1$, $0 \leq j \leq N-1$) に対し、次の式 (9) - (12) で表される処理を行えばよい。

$$Rfi(i, j) = Rms'(i, j) \quad (9)$$

$$Gfi(i, j) = Gms'(i, j) \quad (10)$$

$$Bfi(i, j) = Bms'(i, j) \quad (11)$$

$$NIRfi(i, j) = NIRms'(i, j) \quad (12)$$

式 (9) - (12) によって初期化された画素値は、次節で述べる更新規則を用いて、エネルギー関数が最小になるまで繰り返し更新される。

4.3 画素値の更新 (STEP3)

前節 (STEP2) で決めた初期値をもとに、各バンドの各画素値の更新を繰り返し行う。画素値の更新は式 (13)–(16) で表される。ただしは十分小さい正数である。

$$Rfi(i, j) \leftarrow Rfi(i, j) - \varepsilon_1 \frac{\partial E}{\partial Rfi(i, j)} \quad (13)$$

$$Gfi(i, j) \leftarrow Gfi(i, j) - \varepsilon_1 \frac{\partial E}{\partial Gfi(i, j)} \quad (14)$$

$$Bfi(i, j) \leftarrow Bfi(i, j) - \varepsilon_1 \frac{\partial E}{\partial Bfi(i, j)} \quad (15)$$

$$NIRfi(i, j) \leftarrow NIRfi(i, j) - \varepsilon_1 \frac{\partial E}{\partial NIRfi(i, j)} \quad (16)$$

4.4 収束判定 (STEP4)

前節 (STEP3) において画素値を更新した後、収束判定を行う。収束判定が真ならば、画素値の更新を終了し、収束判定が偽ならば、再びSTEP3の画素値の更新を行う。

収束判定式は、式 (17)–(20) である。ただし ε_2 は十分小さい正数である。

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\partial E}{\partial Rfi(i, j)} < \varepsilon_2 \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\partial E}{\partial Gfi(i, j)} < \varepsilon_2 \quad (18)$$

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\partial E}{\partial Bfi(i, j)} < \varepsilon_2 \quad (19)$$

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\partial E}{\partial NIRfi(i, j)} < \varepsilon_2 \quad (20)$$

4.5 ε_1 、 ε_2 の値の決定

式 (13)–(16) や式 (17)–(20) で ε_1 、 ε_2 を用いた。融合処理において ε_1 、 ε_2 に適切な値を設定しなければならない。 ε_1 、 ε_2 の値を以下のように決定した。

4.5.1 ε_1 の値

ε_1 に大きい値を与えると、画素値の更新 (STEP3) の際に画素値が負の値や255 (1画素が

8 bitの場合) より大きい値をとる可能性がある。一方、 ϵ_1 に小さい値を与えると、収束するまで行う更新の回数が多くなり、処理時間が長くなってしまう。そのために適当な ϵ_1 の値を与える必要がある。そこで ϵ_1 の値を変化させたときに更新ごとに各バンドの画素値の平均値がどのように変化するかを調べた(図4)。ここで a, b を共に0.5とした。図3を見ると ϵ_1 の値が0.01、0.1、1のときは比較的同じ値をとっているが、 ϵ_1 が10になると ϵ_1 が0.01、0.1、1のときと異なる値に収束している。

以上から ϵ_1 は1より小さい値を与えれば ϵ_1 が1以下の場合と比較的近い値に収束することがわかる。本稿では ϵ_1 を $\epsilon_1=0.5$ とした。

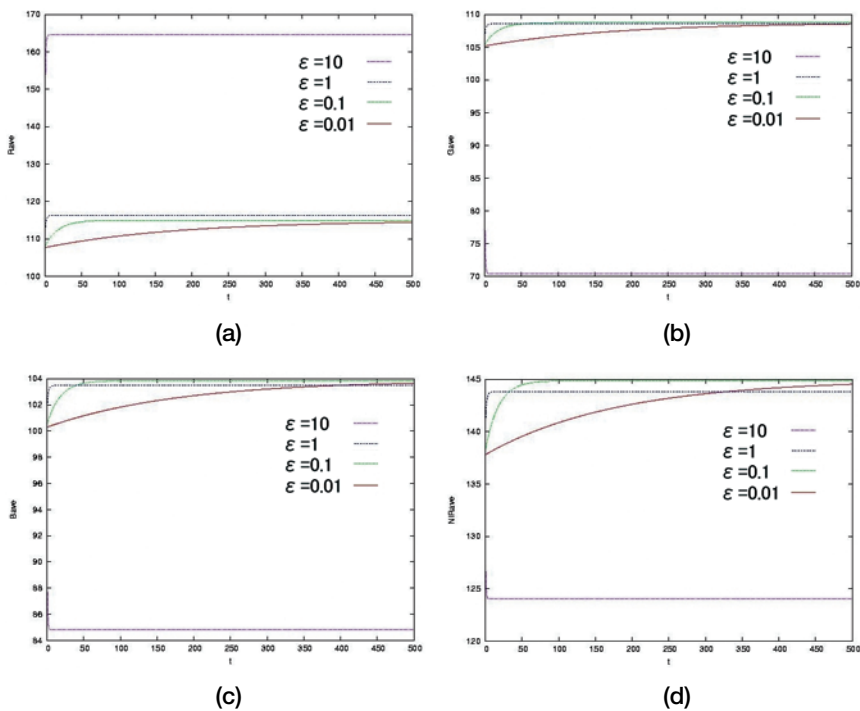


図4 更新回数tによる各バンドの画素値の平均値の変化の様子 (a=b=0.5、(a) R (b) G (c) B (d) NIR)

4.5.2 ϵ_2 の値

ϵ_2 は収束判定に用いられる値で十分小さい値を与えなければ、エネルギー関数が十分収束しない状態で処理が終了する可能性がある。ここでいう「十分収束する」とは「すべての画素値が変化しない状態まで収束する」を意味する。

収束したときに式(17)–(20)の各画素値を変数とする偏微分の値は平均で $\epsilon_2/(N \times M)$ より小さい値をとることになる。式(17)–(20)でその各偏微分に前項で設定した $\epsilon_1=0.5$ を掛けた値だけ画素値を変化させることになるので、1回の更新によって画素値の値は平均 $(0.5 \times \epsilon_2)/(N \times M)$

以下しか変わらない。評価で使用する画像のサイズは500ピクセル×500ラインなので、 $\varepsilon_2=10000$ とすれば画素値の変化は $(0.5 \times 10000) / (500 \times 500) = 0.02$ 以下となり、十分収束させることができる。

以上から本稿では $\varepsilon_2=10000$ とした。

5. 評価

本稿では、提案した画像融合処理アルゴリズムの評価を行うためにIKONOSにより観測された、北朝鮮の白頭山の画像を使用した (図 5 (a)-(c))。MS画像のサイズは125ピクセル×125ライン、PAN画像のサイズは500ピクセル×500ラインである。階調度は256 (1Byte) である。

5.1 パラメータの値による評価

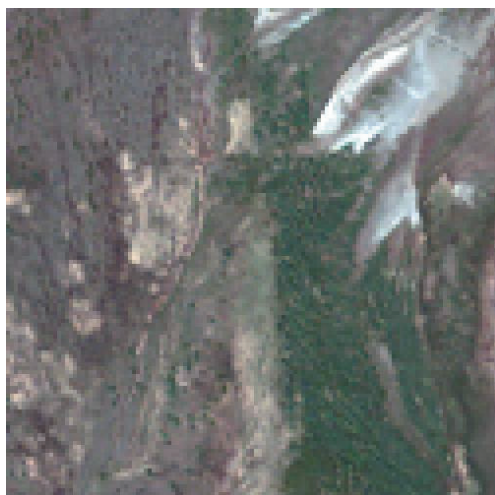
a 、 b の値を変えたときに、「元のMS画像と融合処理後のMS画像 (融合MS画像) の各バンド (R、G、B) の相関係数 r_R 、 r_G 、 r_B 」と「PANと融合MS画像の明度の相関係数 r_{PAN} 」を求め、比較した (表 3)。

表 3 から、 $a=0.9$ 、 $b=0.1$ のときに r_{PAN} が最大値をとっている。また、 r_R 、 r_G 、 r_B の平均 ave についても $a=0.9$ 、 $b=0.1$ のときに2番目に高い値をとっている (最大値は $a=1.0$ 、 $b=0.0$ のとき0.882)。すなわち、 $a=0.9$ 、 $b=0.1$ のとき、元のMS画像のスペクトル情報をできるだけ保持し、かつPAN画像の空間情報を最も反映した融合MS画像が生成されたことになる。 $a=0.9$ 、 $b=0.1$ のときに生成される融合画像を図 5 (d) に示す。

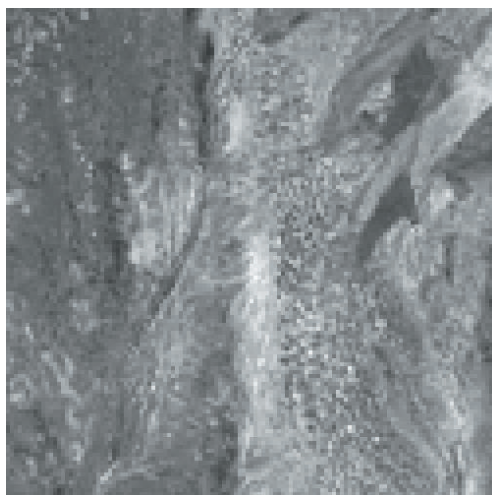
以上から $a=0.9$ 、 $b=0.1$ とパラメータを設定し、5.2節で既存の手法との比較を行う。

表3 重み a 、 b の値による「元のMS画像と融合MS画像のR、G、Bの相関係数」と「PANと融合MS画像の明度の相関係数」の比較 ($ave = \frac{r_R + r_G + r_B}{3}$)

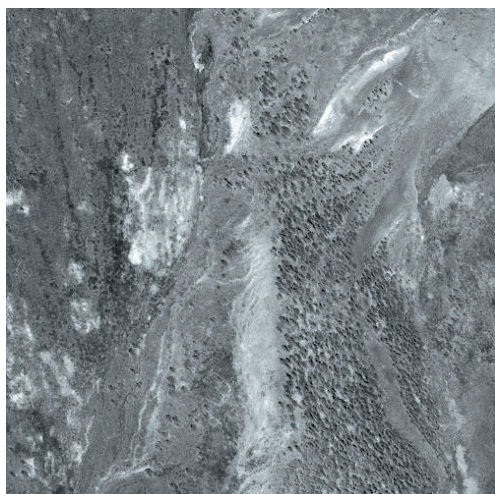
a	b	r_R	r_G	r_B	ave	r_{PAN}
0.0	1.0	0.798	1.000	0.821	0.873	0.780
0.2	0.8	0.767	0.990	0.862	0.873	0.828
0.4	0.6	0.751	0.958	0.915	0.874	0.865
0.6	0.4	0.755	0.910	0.965	0.876	0.887
0.8	0.2	0.779	0.863	0.993	0.878	0.896
0.9	0.1	0.795	0.845	0.998	0.879	0.897
1.0	0.0	0.815	0.832	1.000	0.882	0.895



(a)



(b)



(c)



(d)

図5 IKONOS画像（場所：北朝鮮、白頭山、日本スペースイメージング株式会社）(a) MSカラー画像（Band: R G B、4 m解像度）(b) NIR画像(Band: NIR、4 m解像度）(c) PAN画像（Band: PAN、1 m解像度）(d) 融合MS画像（a=0.9、b=0.1、Band:R G B、1 m解像度）

5.2 既存の手法との比較

提案手法の有効性を比較するために、IHS変換法、BT変換法、主成分分析法の既存の手法と提案手法の比較を行った。比較項目は、「元のMS画像と融合MS画像のR、G、Bの相関係数 r_R 、 r_G 、 r_B 」と「PANと融合MS画像の明度の相関係数 r_{PAN} 」である。表4に比較結果を示す。

表4 提案手法と既存の手法との比較 ($a=0.9$ 、 $b=0.1$ 、 $ave=\frac{r_R + r_G + r_B}{3}$)

	r_R	r_G	r_B	ave	r_{PAN}
IHS	0.604	0.571	0.565	0.580	0.998
BT	0.609	0.538	0.590	0.579	0.997
PCA	0.627	0.538	0.585	0.583	0.995
提案手法	0.795	0.845	0.998	0.879	0.897

表4から r_R 、 r_G 、 r_B と平均 ave のすべてについて提案手法が一番高い値をとっていることがわかる。これは既存の手法に比べて元のMS画像のスペクトル情報を失わないように融合処理が行われたことを示している。一方、 r_{PAN} は既存の手法より約0.1程度小さい値をとっている。しかし、 r_R 、 r_G 、 r_B の平均 ave の増加分と比較すると r_{PAN} の減少分は小さい。以上から、提案手法は空間情報をできるだけ失わないように、かつスペクトル歪みが小さくなるように融合処理できたと考えられる。

6. まとめ

本稿では従来からある融合画像生成処理アルゴリズムをIKONOS画像に適用する際の問題点を改善する新規アルゴリズムを提案した。まず、PANとR、G、B、NIRの重みつき和との二乗誤差で表されるエネルギー関数 E を定義し(式(3))、 E が最小になるまで繰り返し画素値を更新していく。収束したときに得られる各画素値から構成される画像が融合画像となる。

提案した融合画像処理アルゴリズムは従来法の問題点であったスペクトル歪みを改善した。PANとMSの関係式を保つように画素値を更新することにより、得られる融合MS画像と元のMS画像、PAN画像との最小二乗誤差を小さくし、かつ相関係数も既存の方法より大きい値を得ることができた。以上から最急降下法を用いた融合処理アルゴリズムはスペクトル歪みの少ない融合画像の生成を可能にした。今後は重みをR、G、B、NIRのすべてのバンドの画素値にかけて変化させた場合や重みの和の制約($a+b=1$)の無い場合についても評価を行っていく。

引用文献

高木幹雄、下田陽久 1991

『画像解析ハンドブック』、東京、東京大学出版会。

土屋清 1990

『リモートセンシング概論』、東京、朝倉書店。

日本スペースイメージング株式会社 2001

『IKONOS画像データサービス』、東京、日本スペースイメージング株式会社。

Chavez, P. S., Sides, S. C., and Anderson, J. A. 1991

Comparison of three difference methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.57.

Djamdj, J. P., Bijaoui, A., and Manieri, R. 1993

Geometrical registration of images: The multiresolution approach, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.59.

Haydn, R., Dalke, G. W., and Henkelet, J. 1982

Application of the IHS Color Transform to the Processing of Multisensor Data and Image Enhancement, *Proc. of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands*, Cairo, Egypt.

Joblore, G. H., and Greenberg, D. 1983

Color Spaces for Computer Graphics, Massachusetts, America, Addison-Wesley Publishing Company.

Kathleen, E., and Philip, A. D. 1989

The use of intensity-hue-saturation transformation for producing color shaded relief images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.55.

Mallat, S. G. 1989

A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, *I.E.E.E. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.11, pp.674-693.

Poul, C., and Van Genderen J. L. 1998

Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.19, No.5.

Raines, G. L. 1977

Digital Color Analysis of Color-Ratio Composite Landsat Scenes, *Proc. Intl. Symp. Remote Sensing of Environment*, Environmental Research Inst., Michigan, America.

Ranchine, T., and Wald, L. 1993

The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.14.

Smith, A. R. 1978

Color Gamut Transform Pairs, Computer Graphics.

Teague, Z. 2001

Ikonos pan-sharpened products evaluation, *Proc. High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop*; available from http://ldcm.gsfc.nasa.gov/library/HSRCIW01/PanSharp_ProductsEval_Teague.pdf; accessed 3 August 2005.

Zhang, Y. 2002

A new automatic approach for effectively fusing Landsat 7 as well as IKONOS images, *IEEE/IGARSS '02*, Toronto, Canada, June 24-28.

Zhang, Y. 2002

Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite images as well as LANDSAT 7 images and initial solutions, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing(IAPRS)*, Vol.34, Part4, GeoSpatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, Canada.