

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560809

研究課題名 (和文) 山岳地域における衛星画像の大気及び地形効果の補正に関する研究

研究課題名 (英文) Study of Atmospheric and Topographic Effects

on Satellite Imagery over Mountainous Areas

研究代表者

飯倉 善和 (IIKURA YOSHIKAZU)

弘前大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30109897

研究成果の概要 (和文)：光学センサで取得された衛星画像から、大気および地形の影響を補正するために必要となる要素技術として、(1) 衛星画像の精密な幾何補正とその評価方法、(2) ヘイズや巻雲など水平方向の大気変動を補正する簡便な方法、(3) 天空光や照返し光による影響を画素ごとに求める厳密な陰影補正方法と、それに基づいた太陽高度が高い場合の簡略化法などを開発した。

研究成果の概要 (英文)：

In order to extract useful information from satellite imagery obtained by optical sensors, we developed following methods: (1) precise geometric correction using system information and simulated illumination image, (2) correction of atmospheric effects due to spatial deviation such as haze and cirrus cloud, (3) precise illumination correction based on physical models and its simplification for practical use.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：リモートセンシング、地理情報システム

1. 研究開始当初の背景

空間分解能が 30m の光学センサである TM を搭載したランドサット 4 号の打ち上げから、すでに 30 年以上にわたって地表面を観測した衛星画像データが蓄積されている。現存植生図の作成や地域環境の変化の解析などへの利用が期待されているが、測定値に含まれる系統誤差の補正が十分行われていな

いため、十分に活用されずにいた。この原因の一つは、精密幾何補正 (オルソ補正を含む) が適用された衛星画像やそのための標準的な方法が、一般の研究者に提供されていなかったことである。

この問題に対して、申請者は平成 14～15 年度の科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) 「衛星画像の精密補正と土地被覆分類の体系化

に関する研究」を実施し、(1)最適化法による精密幾何補正、(2)修正コサイン法による大気・地形効果補正法、(3)モザイク的な空間構造を持つ土地被覆の分類を提案した。

これらの方法を衛星画像に適用したところ、以下のような課題があることが認識されてきた。

(1) 最適化法による精密幾何補正

最適化法は数値標高モデルと太陽の位置から計算できる直達日射照度を参照画像として、衛星画像の幾何変換におけるシーンセンタの位置ズレを求める方法である。ポインティング角を有する衛星画像では、厳密なモデルとデータに基づくオルソ補正が必要とされるのに対して、最適化法では近似的な取り扱いを行っていた。また、シミュレーション画像で考慮されない参照画像で海や雲などが誤差要因となっていた。

(2) 大気・地形効果補正法

修正コサイン法では、以下の式で表される画像のカウント値(DN)をベースにした簡便な相対補正式である。

$$DN' = (DN - B) / (\cos \beta + C)$$

太陽高度が高い季節の画像に対しては、二つの定数(BとCの値)を調整することにより、地形の影響が緩和された画像が得られる。しかし、太陽高度の低い画像やより精密な補正が必要となる状況においては、物理モデルに基づいてこれらの係数を決定する必要がある。物理モデルでは、天空光や照返し光の影響を推定する必要があるが、計算が膨大な量となるため、厳密な計算は行われていなかった。

また、光学センサによる測定では快晴の画像を得ることが非常に難しいため、薄い巻雲やヘイズを含んだ画像の処理も必要となる。これまで、平坦地における補正方法は提案されていたが、起伏のある地形においてはパストラディアンスの鉛直方向の変化も考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は光学センサで取得された衛星画像の利用価値を高めるために以下の要素技術を開発することである。

(1) 衛星画像の精密な幾何補正

一般に提供される衛星データからオルソ補正を含む精密幾何補正画像を作成するアルゴリズムとその評価方法を確立する。

(2) ヘイズや巻雲などの影響の補正

定量的に解析が可能な光学センサによる衛星画像を確保するために、ヘイズや巻雲などの処理方法を開発する。

(3) 天空光や照返し光による影響を画素ごとに求める厳密な陰影補正方法と、それに基づいた太陽高度が高い場合の簡略化法など

を開発する。

3. 研究の方法

(1) 利用する衛星画像と対象地域

本研究では、ランドサットTMだけではなく、1999年に打ち上げられたランドサット7号に搭載されたETM+、1999年に打ち上げられたアメリカのテラに搭載された我が国のASTER、2006年に打ち上げられた我が国の衛星ALOS(だいち)に搭載されたAVNIR-2を用いる。また、ブナの原生林が広がっていることで世界遺産に指定されている白神山地を対象地域としてデータベースを作成し、本研究に利用する。

(2) 利用する数値地図データ

2006年に施行された空間情報利用促進法により、我が国の基盤地図がインターネットを通して無料で利用できるようになった。本研究では、精密幾何補正や地形効果補正に基盤地図情報10mメッシュ(標高)を利用する。また、幾何補正の精度をチェックするために、基盤地図情報(縮尺レベル25000)および環境省発行の現存植生図を利用する。

(3) 利用するソフトウェア

衛星画像の処理は主に対話型のデータ処理環境であるIDL(Interactive Data Language)を利用して独自に開発したプログラムを用いる。ただし、計算が膨大となる照返し光の影響などは、フォートランを用いてプログラムを開発する。大気・地形効果補正のために必要となるパストラディアンスや透過率の計算には、フランスリール大学で開発された6Sを利用する。幾何補正のチェックや現存植生図と処理した衛星画像との比較を行うために、オープンソースの地理情報システムであるGRASSやQGISを利用する。

4. 研究成果

(1) 精密な幾何補正とその評価方法

① 厳密なオルソ補正式の導出

衛星画像が中心投影画像であることから生じる起伏による位置ズレ ΔX を図1に模式的に示した。地点PおよびP'における入射角を θ_1 と θ_2 すれば $\Delta X = R\Delta\phi = R(\theta_2 - \theta_1)$ とあらわせる。入射角 θ_1 を求めるには次の関係に着目する。

$$X = R(\theta_1 - \theta) = R\phi \quad (1)$$

$$\sin \theta_1 = (R+H)\sin\theta / (R+h) \quad (2)$$

二つの式から、以下の(3)式が導ける。

$$\sin \theta_1 = \sqrt{\frac{(R+H)^2 \sin^2 \phi}{\{(R+H)\cos\phi - (R+h)\}^2 + (R+H)^2 \sin^2 \phi}}$$

また、次の式も成立する。

$$\sin \theta_2 = (R+h)\sin\theta_1 / R \quad (4)$$

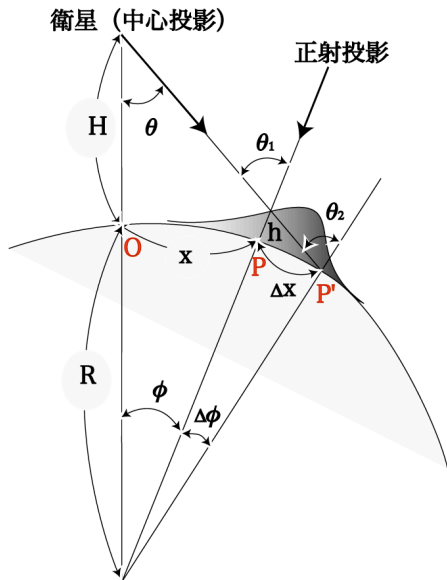


図1 衛星画像に現れる起伏による位置ズレ

したがって X がわかれば ϕ がわかり、(3)式から θ_1 がわかる。 θ_1 がわかれば(4)式により θ_2 が計算できるから、位置ズレ ΔX が求まる。

以上は光の屈折は考慮していないが、地球を球体と考えた場合の厳密な位置ズレの計算式である。

②. 最適化法による精度評価法の改善

最適化法では出力画像の格子点における地図座標 (UTM 座標 x, y) から入力画像の画像座標 (p, l) を求めるのに、システム情報を用いた幾何変換(5)式を利用する。

$$p - p_0 + \delta p = (\cos \alpha \cdot (x - x_0) - \sin \alpha \cdot (y - y_0)) / \Delta$$

$$l - l_0 = (-\sin \alpha \cdot (x - x_0) - \cos \alpha \cdot (y - y_0)) / \Delta$$

図2にAVNIR-2のレベル1B2Rデータ(フルシーン)を示す。図3に国土地理院の数

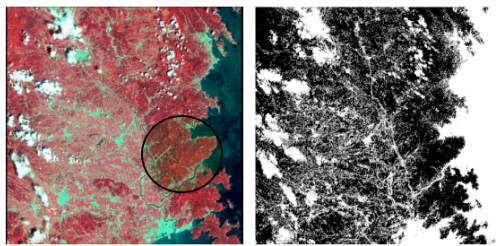


図2 利用した衛星画像と対象地域およびマスク画像
(2007.8.15 撮影/北上川河口付近)

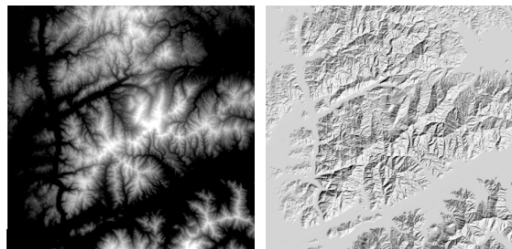


図3 数値標高モデルと陰影のシミュレーション画像

値地図 50m メッシュ (標高) から作成した数値標高モデル (世界測地系/UTM 座標/楕円体高さ) と衛星のシステム情報として与えられた太陽の高度と方位から計算した陰影画像を示す。

(5)式を用いて衛星画像の幾何変換を行い、変換後の画像と陰影画像の面相関係数を評価関数としてシーンセンターの地図座標 (x_0, y_0) を調整する。これまでは画像のすべてのデータを利用して相関係数を計算していたが、水域、雲、雲の影、都市域などが入ると相関係数が小さくなり、位置ズレの精度にも影響することが懸念された。そこでこれらを除去するため、初めに植生指数 (バンド4とバンド3のDNの比) を計算し、一定の値 (以上の画素のみを用いることにした。図2の右側のマスク画像に植生指数が1.5以下の画素を白く示した。相関係数が最大となる (x_0, y_0) を求め、システム情報からのズレを誤差と考えた。

さらに相対誤差と場所や高さなどに依存する系統的な誤差をチェックするために対象領域を16の小領域に分割し、それぞれに対して最適化法を用いて、位置ズレを推定した。その結果を以下に示す。利用したのは起伏による陰影が明瞭に現れているバンド4のデータである。

- δx : 平均的なズレ: 98.9m
標準偏差: 8.8m
- δy : 平均的なズレ: -31.1m
標準偏差: 4.7m

図4には相対誤差を表示した。ほとんどの地点で誤差が10m以内(四角の箱)に収まっている。際立った系統的な誤差は見られない。

(2) 水平方向の大気変動の補正

光学センサによって取得された衛星画像には、図5に示すように地表で反射された光(天空光や照返し光を含む)に加えて、大気による散乱光であるパスラディアンズ(光

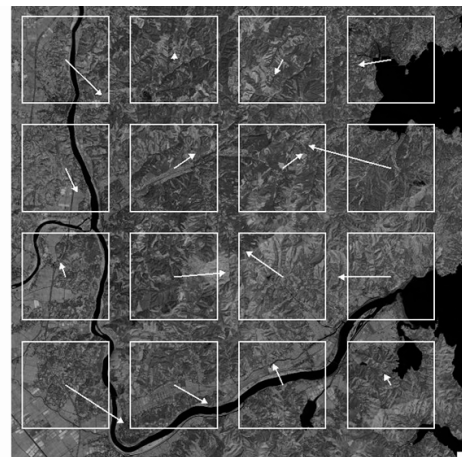


図4 幾何補正後の衛星画像(バンド4)と相対誤差

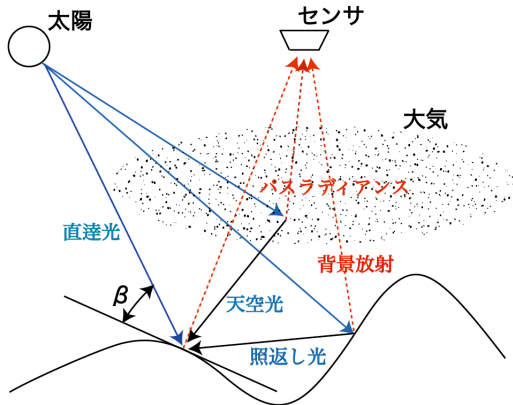


図5 衛星で検知する光の経路

路輝度)の影響が含まれている。大気が一様で安定している場合でも、パスラディアンスの影響は標高に依存し、可視バンドでは無視できない。ヘイズや巻雲などがある場合には、さらに水平方向の変動を考慮する必要がある。著者は大気の影響を受けにくい複数の赤外バンドを利用して、可視バンドにおける大気の影響を補正する方法を提案し、ランドサット TM に適用した。この方法は近赤外で同じ放射輝度をもつ画素は、大気の影響がなければ可視でも同じ放射輝度を持つはずであるという仮定に基づいた方法である。

本研究では、さらに「だいち」AVNIR-2のように、赤外バンドが一つしかない場合、赤外バンドの代わりに太陽入射角 β の余弦 $\cos \beta$ や植生図を利用することを提案した。

図6に示すように大気の影響がなければ同じ放射輝度を持つ画素の分類クラスの画素値 DN (可視バンド) は、パスラディアンスの影響で、標高 h_0 が高くなるほど小さくなる。基準とする標高 X_0 でのクリアな大気における画素値 Y_0 を用いれば、画素ごとに大気の影響度が計算できる。

$$S = (DN - Y_0) / (h - X_0) \quad (6)$$

ところで、大気の影響は画素単位ではなく、空間的な広がりをもって緩やかに変化する。ただし、ヘイズなどが局所的に表れる場合には、その変化は不連続になる。そこで中央値を用いた空間フィルタを作用させて

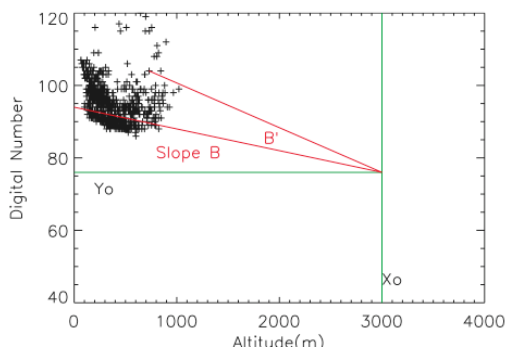
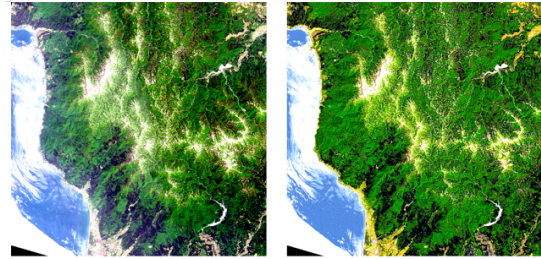


図6 鉛直方向に現れる大気の影響の解析



(a) original (b) after atmospheric correction

図7 大気補正前後の AVNIR-2 カラー合成画像

大気の地域影響度 S' とする。

画素ごとに地域影響度 S' から、標高に対応する補正量をもとめ、画素値を以下のように補正する。

$$DN' = DN - S'(h - X_0) \quad (7)$$

基準となる標高と画素値は 6s によるシミュレーションから推定した S 値を(7)式に代入して画素ごとに標高 3000m における値を求め、クリアな領域の割合に応じてヒストグラムから DN を推定した。また、分類クラスの作成には、バンド 4 (30 クラス) と $\cos \beta$ (30 クラス) の積集合を利用した。

図7に補正した結果のカラー合成を示す。

(3) 厳密な陰影補正方法とその簡便化

①. 天空光の異方性を考慮した補正式

衛星センサで検知される放射輝度 L_s は、対象地点への放射照度 I_0 、パスラディアンズ L_p および背景放射照度 L_b を用いて、次のように定式化することが出来る。

$$L_s = T_s \rho (I_0 / \pi) + L_p + L_b \quad (8)$$

ρ は地上物体の反射率、 T_s は対象から衛星までの透過率、 s はセンサー天頂角を表わす。

放射照度 I_0 は太陽からの直達光、天空光 E_d 、および周囲の地表面からの照返光 E_t からなる。

$$I_0 = E_o T_\theta \cos \beta + E_d + E_t \quad (9)$$

ここで T_θ は太陽から対象物までの透過率、 θ は太陽天頂角、 β は太陽の直達光と地表面の法線ベクトルのなす角度 (太陽入射角)、 E_o は大気圏外における太陽放射照度である。物理モデル(8)、(9)から反射率 ρ は次のように求められる。

$$\rho = \pi(L_s - L_p - L_b) / T_s (E_o T_\theta \cos \beta + E_d + E_t) \quad (10)$$

この式と簡便な補正式

$$DN' = (DN - B) / (\cos \beta + C) \quad (11)$$

を単純に比較すると2つのパラメータは以下のようにあらわされる (a, b は校正係数)。

$$B = a + b \times (L_p + L_b) \quad (12a)$$

$$C = (E_d + E_t) / E_o T_\theta \quad (12b)$$

天空光はその地点から空がどの程度広がって見えるか(天空視野要素 V_d)に依存する。 $6S$ で計算できる平坦地における天空光を E_d^h

とし、天空光に等方性を仮定すれば、起伏のある地点では $E_d = E_d^h \times V_d$ となる。照返し光 E_r は、その地点から見える地表面の放射輝度に依存するため、視野域を把握しなければならない。近似計算では斜面の平均的な放射輝度 L_d と地形構成要素 C_t が利用される。

これらの式を用いればパラメータ C は次のように表される。

$$C = (E_d V_d + \pi L_i C_t) / E_o T_\theta = C_1 V_d + C_2 C_t \quad (13)$$

C_1 と C_2 は放射伝達モデルから計算できる。後述するように実際のランドサット TM 画像に即して、これらの値を計算してみるとパラメータ C がすべてのバンドで 0.1 を超える値となった。とくに可視バンドでは天空光による寄与だけで 0.2 を越えた。しかし、統計的な分析ではこれほど強い天空光の影響を捉えることができなかった。

これは天空光における非等方的な成分の寄与を無視したためではないかと思われた。Hay によれば天空光は以下のように表される。

$$E_d = E_d^h \{ T_\theta' \cos \beta + (1 - T_\theta' \cos \theta) V_d \} \quad (14)$$

すなわち、太陽の方角からくる天空光が空気分子やエアロゾルによる光の散乱の角度依存性により他の方向に比べて無視できないほど大きくなる。非等方的な成分を考慮するとパラメータ C は以下のように分解される。

$$C = \{ E_d^h (1 - T_\theta' \cos \theta) V_d + \pi L_i C_t \} / (E_o T_\theta + E_d^h T_\theta')$$

(13) 式と比較すれば、 C の値とくに C_1 の値が小さくなることがわかる。

②. 夏のブナ林での補正パラメータの推定

1989年6月10日撮影のランドサット4号のTMデータを利用し白神山地（世界自然遺産地域）含む領域を数値標高モデルと精密に重なるように切り出した。

この地域の大部分を占めるブナ林に対して6Sにより大気パラメータを計算した結果

	band 2	band 3	band4	band5
ρ	0.032	0.018	0.408	0.198
Ls	35.0	19.4	108.1	10.5
Lp	22.1	12.8	5.4	0.5
Lb	2.6	1.2	16.5	1.3
Lx	10.3	5.4	86.3	8.7
Ex	1084.6	976.2	670.2	141.7
Ed	308.2	242.6	145.3	24.8
Ee	5.1	1.9	21.4	1.4
T_θ	0.689	0.729	0.740	0.759
Ts	0.719	0.755	0.765	0.783

	band 2	band 3	band4	band5
B	23.38	18.84	28.73	20.20
C	0.0687	0.0542	0.0880	0.0519
$C_1 * V_d$	0.0645	0.0517	0.0415	0.0300
$C_2 * C_t$	0.0043	0.0025	0.0465	0.0219

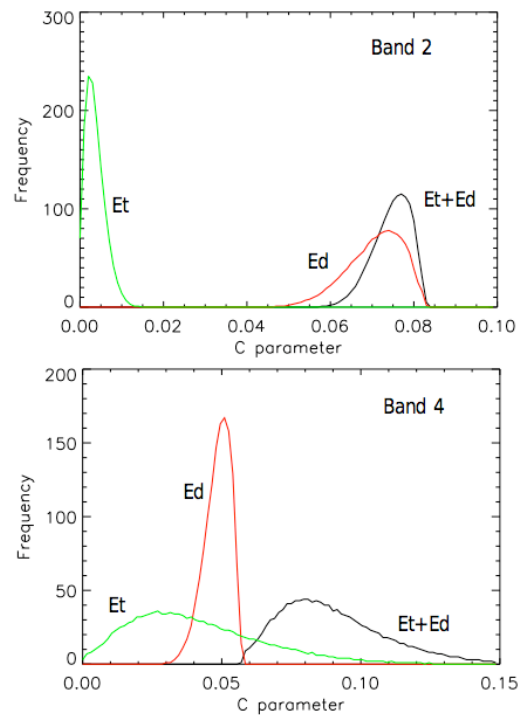


図8 パラメータ C のヒストグラム

を Table 1 に示す (一部のバンドのみを示す)。大気は中緯度夏のモデル、エアロゾルは海洋性、視程を 30km に設定した。分光反射率は 6S で平坦値の放射輝度が一致する値となるように設定した。

これらの値を用いて補正パラメータを計算した結果を Table 2 に示す。IDL で開発した照返し光の計算アルゴリズムを Fortran に移植して用いたところ、従来より処理速度が 10 倍以上向上し、約一日で結果を得ることができた。

図 8 に補正パラメータの空間変動をヒストグラムで示す。可視バンド (band 2) では天空光と照返し光の変動が相殺し合ってパラメータ C の変動が小さな値となっている。近赤外バンド (band 4) では照返し光の変動が天空光の変動よりもかなり大きく、全体の変動もそれに引きずられている。

③. 日陰のデータの解析

天空光や照返し光をより定量的に取り扱うため太陽の直達光がない画素を抽出して解析した。1998年11月2日撮影のランドサット5号の標準処理データを用いた

前節と同様に 6S を用いて大気パラメータを推定した結果を Table 5 に示す。バンド3とバンド5の反射率が夏に比べて高く、バンド4が低い。

日陰のデータには $\cos \beta < 0$ に加えてキャストシャドウとなる画素も加えた。ただし、内挿、天空光の非等方成分、背景放射などの影響が現れることを予想して、日陰の領域の周辺からの距離 (Sindex) と放射輝度の関係

	band 2	band 3	band4	band5
ρ	0.042	0.160	0.172	0.430
Ls	24.317	42.032	29.703	14.021
Lp	14.913	8.343	3.376	0.286
Lb	1.875	6.039	4.222	1.838
Lx	7.529	27.65	22.105	11.896
Ex	515.6	488.0	361.1	78.8
Ed	261.0	211.2	133.8	23.2
Ee	3.7	9.8	5.4	1.8
T θ	0.524	0.582	0.638	0.675
Ts	0.710	0.751	0.788	0.812

	band 2	band 3	band4	band5
DEM	-0.1170	-0.1710	-0.1670	0.1580
Et	0.0310	0.1150	0.3470	0.3750
Vd	0.0160	-0.0200	-0.1220	-0.1760
S index	-0.0400	-0.0460	-0.0740	-0.1770

	band 2	band 3	band4	band5
λ	10.70	15.90	-1.00	-5.00
DEM	-0.34	-1.29	0.06	-0.34
Et	0.06	0.05	0.12	0.55
Vd	2.04	6.78	7.92	18.22
S index	-0.01	-0.04	-0.05	-0.51
R	0.181	0.245	0.445	0.454

を解析した。距離が大きくなるほど小さくなる傾向がすべてのバンドに見られた。特に距離2までは顕著であった。距離2以上のデータを用いてDNと標高、天空光、天空視野要素との相関を計算した結果をTable 6に示す。パスラディアンズの標高依存性や照返し光の影響は予想通りであるが、天空視野とは負の相関（特に近赤外バンドで強い）となっている。これは、天空光に比べて補完する値を持つ照返し光の変動が大きいためである。

Table 7には重回帰分析の結果（切片 λ 、偏相関係数および重回帰Rを示した。Vdの偏相関係数も正の値をとっており、ほぼ矛盾のない結果となっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① 飯倉善和、リモートセンシング質問箱「第6回 可視・近赤外域の衛星画像の特質と補正」日本リモートセンシング学会誌、28(5)、455-460、2008 査読無
- ② Yoshikazu Iikura, Efficient Reduction of Landsat TM Memory Effect Using Differential State Equation, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 45(12), 4119-4126, 2007 査読有
- ③ 及川宗、飯倉善和、衛星画像を用いた白神山地における山崩れの地形的要因に関する研究、白神研究、4、14-23、2007、査読無
- ④ 飯倉善和、ランドサットTM画像を用いた山岳地帯にかかる雲の高度の推定法、日本リモートセンシング学会誌、27(1)、24-32、2007、査読有

〔学会発表〕（計4件）

- ① 飯倉善和、起伏のある地形での実用的な衛星画像の大气・地形効果補正、日本リモートセンシング学会学術講演会、名古屋大学豊田講堂、November, 26, 2009
- ② 飯倉善和、「だいち」の光学センサーの幾何的な精度の評価、日本写真測量学会秋季学術講演会、東北大学片平さくらホール、November, 28, 2008
- ③ Yoshikazu Iikura, Precise evaluation of topographic effects in satellite imagery for illumination correction, IGARSS'2008 Boston, USA, July 9, 2008
- ④ Yoshikazu Iikura, Satellite image processing for landcover classification with tessellated spatial structure model, IGARSS'2007 Varcelona, Spain July 24, 2007

〔図書〕（計1件）

- ① 飯倉善和、共立出版、IDLと3次元画像処理入門、2007、153

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計1件）

名称：ランドサットTM画像の精密幾何補正方法および衛星画像の精密幾何補正方法

発明者：飯倉善和

権利者：科学技術振興機構

種類：特許

番号：第4005336号

取得年月日：2007年8月31日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯倉 善和 (IIKURA YOSHIKAZU)

弘前大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30109897