

ノア画像を用いた朝鮮半島における高速幾何補正方法

Fast Geometric Correction Method in Korea using NOAA Images

藤原 和彦*、工藤 純一**

キーワード：NOAA衛星、幾何補正、朝鮮半島、テンプレートマッチング

1. はじめに

衛星を用いたリモートセンシングの利点は、非常に広範囲を観測できることである。しかし環境の変化を観測するためには、同一地点を長期間にわたって観測を続けることが重要である。気象衛星NOAAは、東北大学では過去15年をこえるデータを連続して蓄積しており、長期間にわたる環境の変化の観測に適している。

しかし、NOAAの画像は観測位置の精度があまり良くなく、同一地点の長期間にわたる観測を行うために、精度の高い幾何補正が必要となる。

本報告では、気象衛星NOAAに搭載されている、AVHRR画像の観測位置を高速に高精度で補正する幾何補正の方法を提案する。

2. 気象衛星NOAAの概要

気象衛星NOAAは、アメリカ海洋大気庁（NOAA：National Oceanic and Atmospheric Administration）によって運用されている第3世代の気象衛星シリーズである。気象衛星NOAAは常時2機の衛星が運用されており、世代交代のために2年おきに新しい衛星が打ち上げられる計画になっている。現在は、NOAA-16号、NOAA-17号の2機が運用されている。気象衛星NOAAの軌道は、真円に近い太陽同期極軌道であり、軌道高度は約870～833km、軌道傾斜角は98.9°および98.7°、周期は101.4分で、9日で回帰する[1]。この衛星は、雲分布や地表面の温度分布などの観測を目的とする改良型超高分解能放射計（Advanced Very High Resolution Radiometer：AVHRR）センサや、タイロス実用鉛直測定器（TIROS Operational Vertical Sounder：TOVS）と呼ばれる大気中の温度や湿度の鉛直分布を求めるための多チャンネル分光計などを搭載している。このうちAVHRRセンサは、約1.1kmの分解能で地表の状態を観測することができる[2]。

* 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

今回の研究に利用するAVHRRセンサについて詳しく述べる。AVHRRセンサには、表1に示した6つのチャンネルがある。チャンネル1、チャンネル2、チャンネル3Aは地表面からの反射を、チャンネル4、チャンネル5は地表面からの放射を観測している。表中のチャンネル3（NOAA-15号以降はチャンネル3B）は、地表面からの反射と放射の両方を観測している[3]。この6つのチャンネルのうち、チャンネル3Aとチャンネル3Bについては、状況によって切り替えて運用している。現在運用されている衛星では、NOAA-16号はチャンネル3Bのみを利用し、NOAA-17号は地表の明るさによってチャンネル3Aとチャンネル3Bを切り替えて利用している[4]。AVHRRセンサは観測幅が約2,800kmと広いことから、1つの衛星で同一地点を少なくとも1日2回は観測することができ、現在は2つの衛星で合計4回の観測が可能である。

表1：AVHRRセンサの観測波長帯域

チャンネル	観測波長帯 [μm]	観測項目
1	0.58~0.68	雲、雪、氷の領域
2	0.725~1.10	陸水領域、陸域植生
3*	3.55~3.93	表面温度、雲の領域
4	10.30~11.30	表面温度、雲の領域
5	11.50~12.50	表面温度、雲の領域

*NOAA-15号からチャンネル3A [μm] (1.58~1.64:短波長赤外)と時間帯により切り換えて使用

3. 幾何補正処理方法

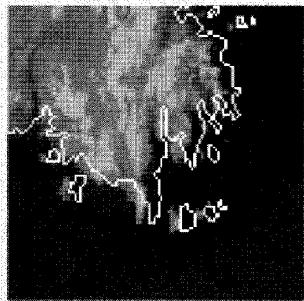
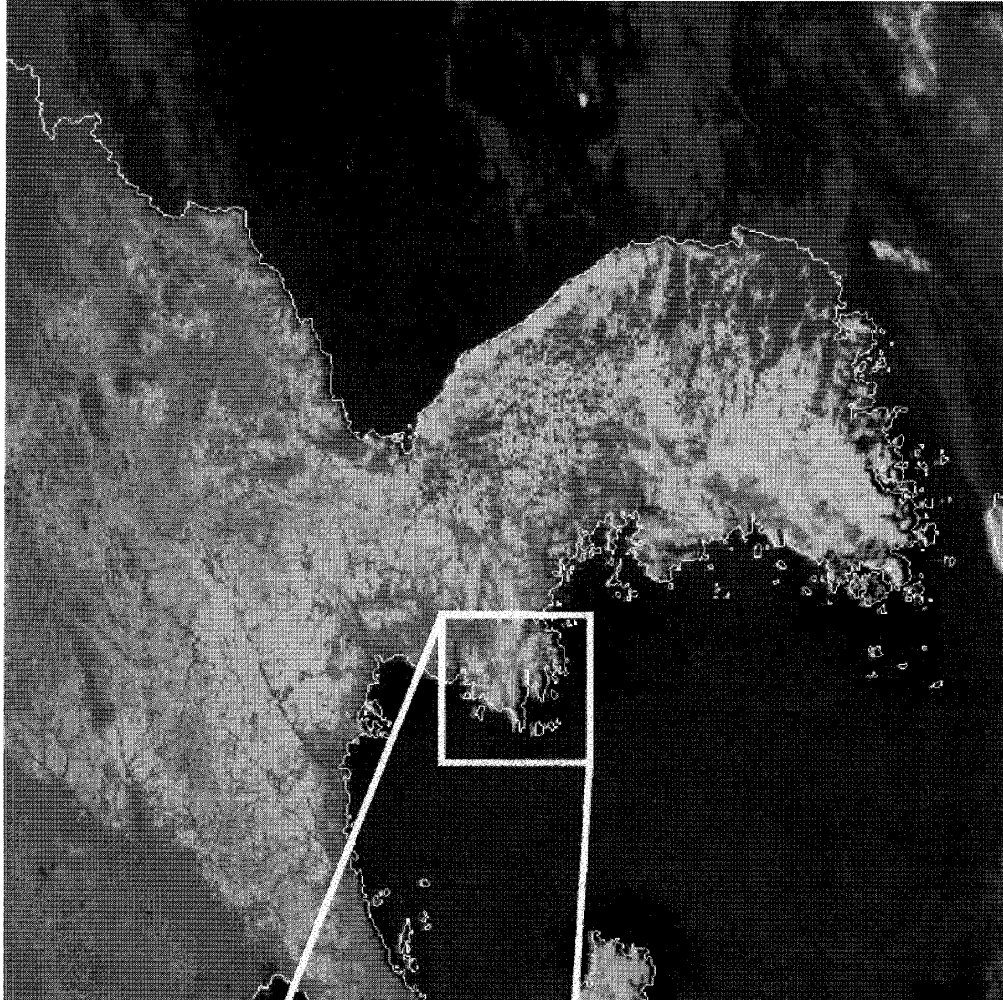
気象衛星NOAAでは、毎日公表される基準位置の情報から衛星の位置を推測することで、各画素の観測位置を推定する。しかし、基準位置の情報に誤差が含まれていたり、衛星の姿勢に関する情報がないため、推定される観測位置にずれが生じる（図1）。

同一地点を長期間にわたって観測する場合、各画素の観測位置が精度よく対応している必要がある。そこで、本研究では朝鮮半島周辺を対象として、AVHRR画像の幾何補正を行い、同一地点の観測を容易に行えるようにする。

幾何補正は図2に示す手順で行う。

●Step1 衛星天頂角によるデータの振り分け

AVHRR画像の分解能は、衛星直下付近で1.1kmである。しかし、衛星天頂角が大きくなるほど分解能は低くなり、衛星天頂角が最も大きくなる観測地点においては走査線方向の分解能は6.5kmと非常に悪くなる[5]。また、衛星天頂角が大きくなると、大気の影響による観測値の誤差が大きくなることも知られている[6]。しかし、AVHRR画像は、衛星天頂角が非常に小さい高分解能のデータのみを利用して同一地点の観測を行おうとすると、衛星の特性から9日に1シーンか2シーン程度しか利用できない[7]。



拡大図

図1：位置がずれている画像の例（1999年5月5日 NOAA-14号）

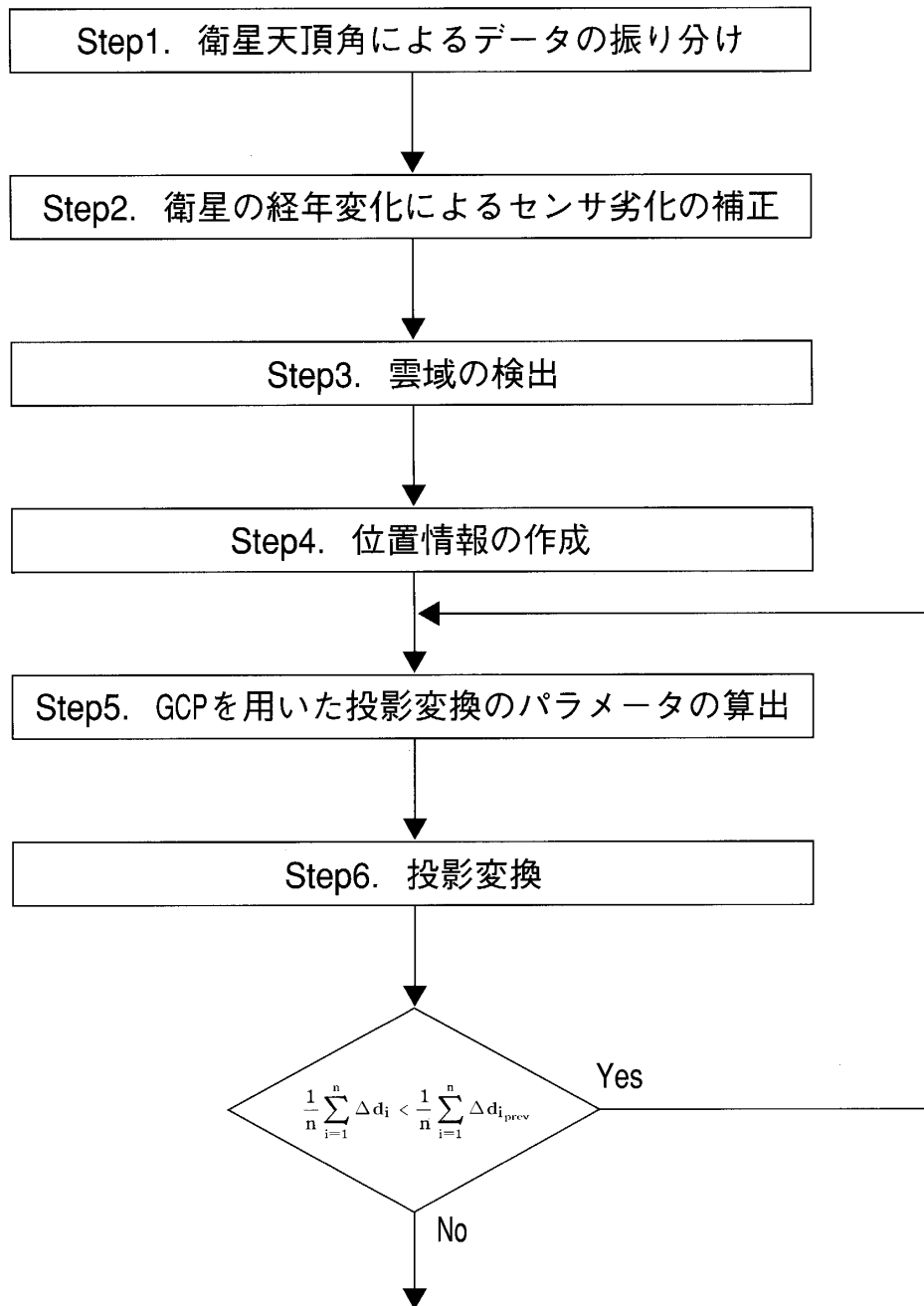


図 2：幾何補正処理の手順

そこで、本手法では大気の影響による誤差が小さく、また、分解能が約2 kmとあまり悪くならない、衛星天頂角45°以内のAVHRR画像を利用する。これにより、大気の影響による誤差をおさえることができ、分解能のばらつきを小さくする。

●Step2 衛星の経年変化によるセンサ劣化の補正

AVHRRセンサのうち、可視光および近赤外の波長帯を観測するセンサは、運用時間の経過に従ってセンサの精度が劣化する[7]。そのため、運用時間の経過によるセンサの劣化を補正した輝度値を用いて解析を行う必要がある。本手法では、NOAA-11号とNOAA-14号について、岩淵が提案した補正式を用いてセンサの劣化による輝度値の変化を補正する(式(1))。なお、NOAA-16号はまだ運用期間が短いことから、センサの劣化は生じていないものとする。

$$\alpha_{oi} = S_i (C_i - C_{oi}) \quad (i=1,2) \quad (1)$$

α_{o1} 、 α_{o2} は、 C_1 、 C_2 をチャンネル1、チャンネル2の観測値とした時の各チャンネルのアルベド値である。

各定数はNOAA-11号のとき、

$$\begin{aligned} S_1 &= 0.1042e^{0.45 \times 10^{-4} \times date} \\ S_2 &= 0.1132e^{0.3 \times 10^{-4} \times date} \\ C_{o1} &= 40.02(1 - 0.4 \times 10^{-5} \times date) \\ C_{o2} &= 40.03(1 - 0.66 \times 10^{-5} \times date) \end{aligned}$$

NOAA-14号のときは

$$\begin{aligned} S_1 &= 0.1165e^{0.65 \times 10^{-4} \times date} \\ S_2 &= 0.1437e^{0.22 \times 10^{-4} \times date} \\ C_{o1} &= 41.0 \\ C_{o2} &= 41.0 \end{aligned}$$

である。この処理により、データの観測時期による観測値のずれを補正し、運用開始直後と運用終了直前でも同じ処理を行うことができる。

また、太陽天頂角による観測値のずれを補正するため、式(2)によって正規化する。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\alpha_{o1}}{\cos \theta_0} \\ \alpha_2 &= \frac{\alpha_{o2}}{\cos \theta_0} \end{aligned} \quad (2)$$

●Step3 雲域の検出

幾何補正に用いるGCPとして横山ら[8]やPARADAら[9]は海岸線を用いている。GCPとして線を用いた場合、小さなずれや平行移動に近いずれの場合は良好な結果が得られるが、衛星画像で頻繁に発生する歪みのある画像に対しては精度よく対応させることが難しい。そこで、本手法ではGCPには海岸線を境界とした2値画像を用いる。面で比較する場合、線で比較する場合に比べて大きな歪みのある画像に対しても精度よく対応させることができる。

しかし、多くの観測データには雲が含まれており、雲を観測した地点では、地表が観測できていないため、海岸線および陸地を検出することができない。また、雲は常に動いており、地理的に決まった場所に存在するものではないため、幾何補正処理に対してはノイズと考えられる。しかし、雲を観測した地点であっても、光学的厚さの薄い雲の場合は雲の下にある地表を観測することができる場合がある。このことから、光学的厚さの厚い雲を観測した地点については幾何補正処理ではノイズとみなし除外し、光学的厚さの薄い雲については処理の対象とする。

そこで、本手法では、式(3)に示すような、太陽天頂角で正規化したチャンネル1、チャンネル3、チャンネル4、チャンネル5を用いたしきい値処理を用いる。ここでは、式(3)を満たす点を幾何補正処理に不要な雲として検出し、その領域に対して探索を行わないようにして処理の高速化を図る。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &> 30\% \\ \text{チャンネル3} - \text{チャンネル4} &\geq 10K \\ \text{チャンネル4} - \text{チャンネル5} &\geq 5K \end{aligned} \quad (3)$$

●Step4 位置情報の作成

ここでは、位置情報として用いる海岸線およびその近郊の陸地を抽出する。陸地を抽出するために、NDVI（正規化植生指数）[10]を用いる。

NDVIは、図3に示すように、チャンネル1とチャンネル2の植物に対する分光反射率の差を利用して式(4)で与えられる。

$$NDVI = \frac{\text{チャンネル2} - \text{チャンネル1}}{\text{チャンネル2} + \text{チャンネル1}} \quad (4)$$

NDVIは-1から1までの範囲の値をとる。植生が盛んな地点ではチャンネル2の分光反射率がチャンネル1の分光反射率と比べて非常に大きくなることから、NDVIは大きくなる。海や湖などではチャンネル2の分光反射率よりもチャンネル1の分光反射率が大きくなるため、負の小さな値となる。この特性を利用して、NDVI画像から式(5)を用いることで陸域と海域に分類する。陸域と海域に分類した2値画像を生成することで、比較的容易に探索を行うことが可能となる。

$$Value = \begin{cases} 1 (NDVI \geq 0) \\ 0 (NDVI < 0) \end{cases} \quad (5)$$

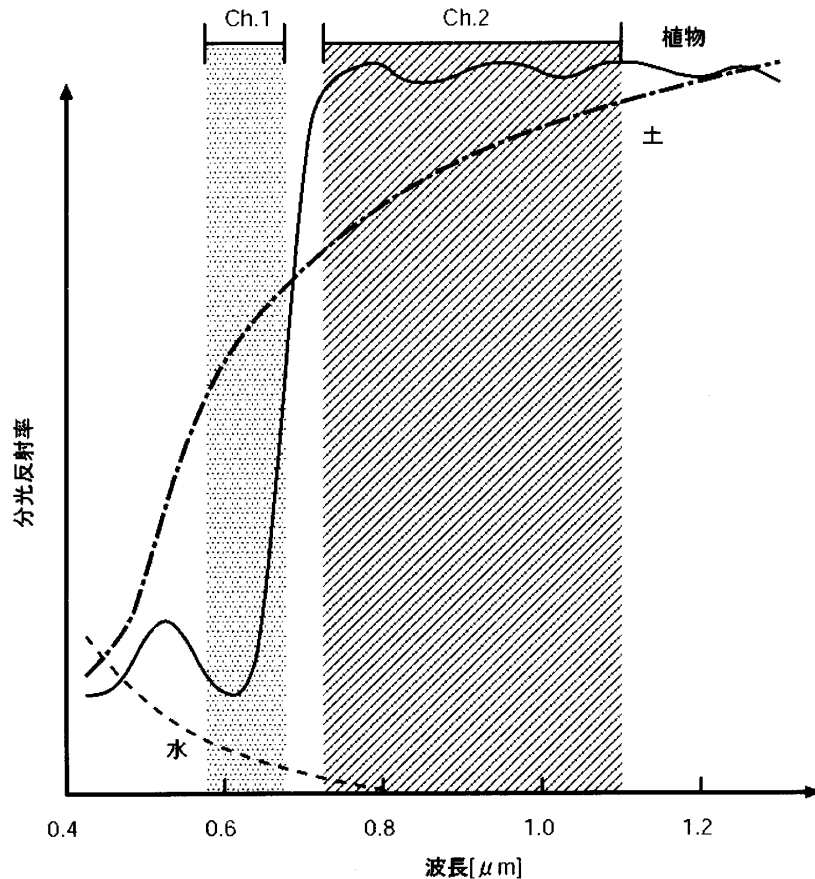


図3：チャンネル1、チャンネル2の波長帯における分光反射特性

●Step5 GCPを用いた変換パラメータの算出

ここでは、Step4で検出した海岸線のデータとGCPとの比較から、各GCPの地点における画像の移動ベクトルを求める。本手法では、移動ベクトルを求めるためにテンプレートマッチングを用いる。計算方法として、残差逐次検定法[11]を用いる。この方法は加算のみの演算で、多くの場合途中で計算を打ち切るため計算時間が大幅に短縮できる。尾上ら[12]は雲の移動追跡に応用して、相互相関係数による方法と比べて精度は同等、処理時間は1桁以上短縮という極めて良好な結果を得ている。

本手法では、図4に示すように、 $n \times n$ のGCPを用いる場合には $2n \times 2n$ の範囲を探索対象とする。探索範囲内において、Step4で作成した2値画像がGCPと最もよく一致する座標におけるテンプレート内の中心座標を求め、対象のGCPにおける移動ベクトル $\vec{d} = (\Delta x, \Delta y)$ を求める。

テンプレートマッチングに衛星画像を用いる場合、対象とする陸地や海岸線が雲などの影響で

観測できない場合があり、検出した陸地や海岸線が期待する形状になっていない場合が多い。そのため、探索結果で最もよく一致した座標が期待する地点を示していない場合がある。そこで、GCPと比較を行った際に、適合率が90%以上になったもののみを有効なGCPとして扱うこととする。これにより、陸地を正しく認識できていない地点のGCPによる幾何補正の精度の低下を抑える。

次に、有効なGCPごとの移動ベクトル \vec{d} から、最適な変換パラメータを求める。衛星画像の観測位置のずれは、主に観測した時刻の衛星の位置や向きずれによるものが大きい。その場合、画像のずれの補正は平行移動や回転では精度の高い幾何補正結果が得られない。そこで、今回は射影変換(式(6))を用いて画像のずれを補正することとする。

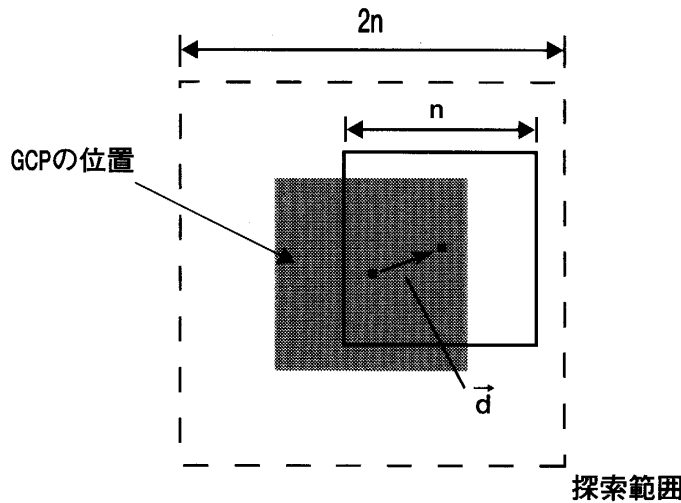


図4：テンプレートマッチングの概要

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{\alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3}{\alpha_7 x + \alpha_8 y + 1} \\
 v &= \frac{\alpha_4 x + \alpha_5 y + \alpha_6}{\alpha_7 x + \alpha_8 y + 1}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

パラメータは、最小2乗法により求める。u, vの各式に5つのパラメータがあることから、少なくとも5つ以上の有効なGCPがある場合に各パラメータを求めて幾何補正を行う。衛星天頂角や雲などの影響により有効なGCPが4つ以下であった場合は幾何補正処理ができないと判断し、処理を終了する。

●Step6 投影変換

求めたパラメータを用いて投影変換を行い、変換後の画像から、有効なGCPにおいて各々の適合率を求める。各GCPの適合率の平均が前回以下になるまでStep5以降を繰り返す。幾何補正の際の各画素の再配置は、衛星による観測値を尊重するために、最も近い座標の観測値をそのまま利用することとした。

4. 実験結果

提案方法による幾何補正を、NOAA-11号の受信を開始した1988年11月9日から2002年末までの期間で朝鮮半島周辺で実験を行った。対象期間における衛星の種類は図5に示すとおりである。なお、1994年9月16日から1995年2月2日までの期間は、衛星の切り替え時期とNOAA-13号のトラブルが重なり、受信データがないため、対象期間から除外する。

テンプレートマッチングに用いるGCPは、大きさをピクセルとし、図6に示す50個所とした。通常、テンプレートマッチングを行う際には、半島や湾など、特徴のある形状の地点を選択するのがよいとされている。しかし、今回は暗れている画像に限らず、多くの雲が観測されている画像も対象としている。そのため、できるだけ多くのGCPを用意することで雲が多い画像に対しても幾何補正を行うことができるようにしている。

また、幾何補正による変形を考慮し、上下左右に各100ピクセルの余白をとって処理を行った。

幾何補正の結果の一例を図7に示す。幾何補正処理後の画像における海岸線が、幾何補正処理前と比べて地図データとよく一致していることがわかる。

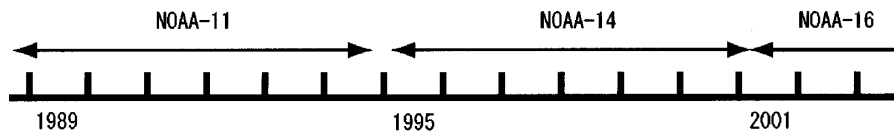


図5：解析期間と対象となる衛星の種類

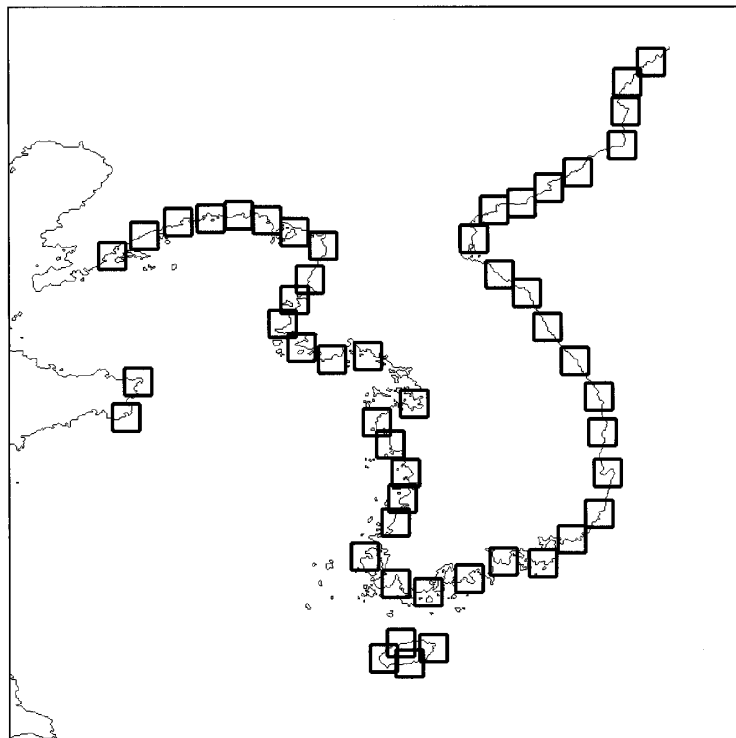


図6：実験に用いたGCPの位置

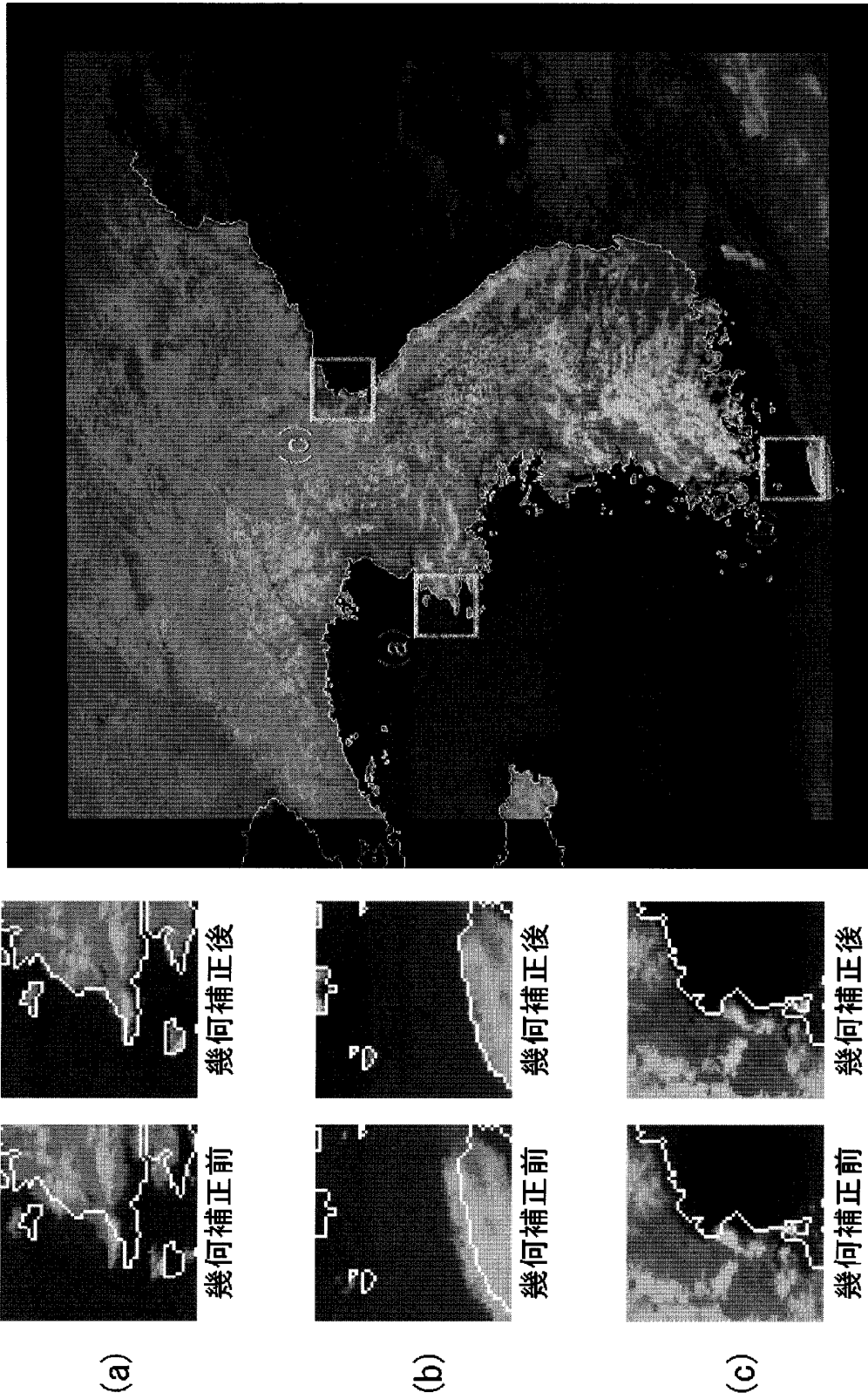


図7：幾何補正処理結果の例（1999年5月5日 NOAA-14号）

次に、雲の影響が少なく、幾何補正処理を行うことができたシーン数を表2に示す。

幾何補正の結果は、有効なGCPの地点においてテンプレートマッチングを行い、各GCPにおける地図データと衛星画像の距離を式(7)により求めて評価する。

$$\Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{7}$$

対象期間のうち、幾何補正処理を行うことができた全1348シーンにおいて、各シーンにおける有効なGCP数ごとに求めた Δd の平均値を図8に示す。

各シーンにおける Δd の平均の最小値は0.78ピクセル、最大値は2.47ピクセルであり、全シーンにおける Δd の平均値は1.67ピクセルとなった。

従来の幾何補正方法のうち、自動処理を行なっているPARADAらの方法[9]では、 Δd の平均は1.0~1.5AVHRRピクセルとなっている。これを川村ら[5]の示す衛星天頂角と分解能の関係から地表での距離に換算すると、衛星天頂角が45°以内の場合で約2 kmから約3 kmとなる。

これに対し、提案方法では1ピクセル1.1km四方に換算された画像に対し、 Δd の平均値が、最小で0.78ピクセル、最大で2.47ピクセルであり、地表の距離に換算すると約0.86kmから約2.72kmである。

このことから、提案方法による幾何補正は、従来の方法と比べて精度が向上していることがわかる。

表2：幾何補正を行ったシーン数

年	シーン数
1988	19
1989	88
1990	82
1991	93
1992	88
1993	90
1994	56
1995	105
1996	109
1997	101
1998	97
1999	118
2000	87
2001	92
2002	123
合計	1348

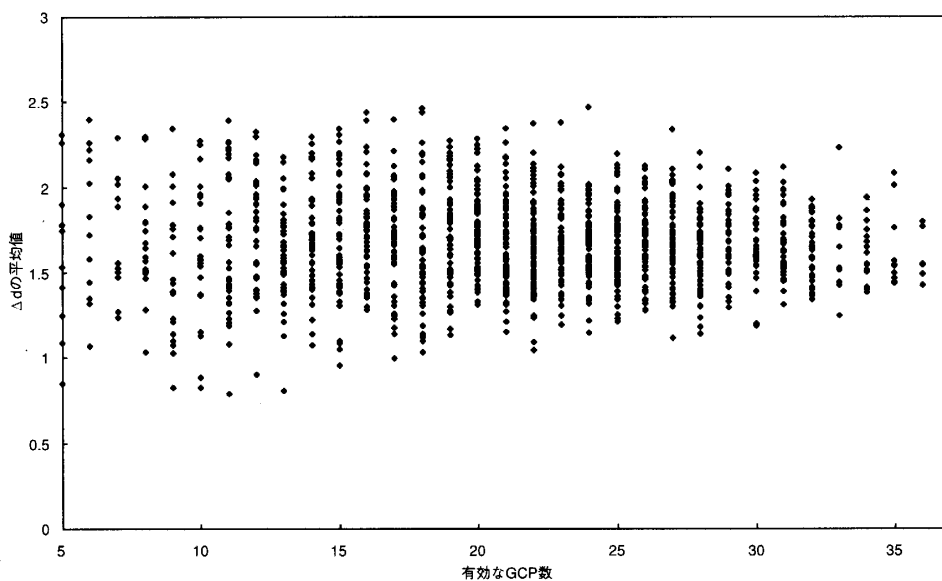


図8：有効GCP数ごとの各シーンにおけるの平均値

5. まとめ

本報告では、AVHRR画像における高速で高精度な幾何補正方法を提案した。また、提案方法は、従来の方法に比べて高精度で幾何補正を行えることを示した。

参考文献

- [1] 日本リモートセンシング研究会編, “図解リモートセンシング”, 日本測量協会, 1992.
- [2] K.B.Kidwell, “NOAA POLAR ORBITER DATA USERS GUIDE,” June 1995.
- [3] 堤捨男, “リモートセンシングに関連した赤外線応用技術”, FOP, Vol.2, No.58, pp.3-11,1983.
- [4] G. Goodrum, K.B.Kidwell, W.Winston, “NOAA KLM USER'S GUIDE,” September 2000.
- [5] HIROSHI KAWAMURA, FUTOKI SAKAIDA and SHOICHI KIZU, “The AVHRR Data Processing System in the Center for Atmospheric and Oceanic Studies in the Tohoku University,” TOHOKU GEOPHYSICAL JOURNAL(THE SCIENCE REPORTS OF THE TOHOKU UNIVERSITY, SERIES 5), Vol.34, No.3, 1993.
- [6] BRENT HOLBEN and ROBERT S.FRASER, “Red and near-infrared sensor response to off-nadir viewing,” Int. J. Remote Sensing, Vol.5, No.1, pp.145-160, 1984.
- [7] HIRONOBU IWABUCHI, “Calibration of the visible and near-infrared channels of NOAA-11 and -14 AVHRRs by using reflections from molecular atmosphere and stratus cloud,” Int. J. Remote Sensing, Vol.24, No.24, pp.5367-5378, 2003.
- [8] 横山隆三, 雷莉萍, Ts. Purevdorji, 丹波澄雄, “アジア地域の10日間AVHRRモザイク合成画像データセットの作成”, 写真測量とリモートセンシング, Vol.39, No.1, pp.33-38, 2000.
- [9] M.PARADA, A.MILLAN, A.LOBATO and A.HERMOSILLA, “Fast coastal algorithm for automatic geometric correction of AVHRR images,” Int. J. Remote Sensing, Vol.21, No.11, pp.2307-2312, 2000.
- [10] C.J.Tucker, C.O.Justice, S.D.Prince, “Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985,” Int. J. Remote Sensing, Vol.7, No.11, pp.1571-1581, 1986.
- [11] D.I.Barnea and H.F.Silverman, “A class of algorithms for fast digital image registration,” IEEE Trans. Comput., Vol.C-21, No.2, pp.179-186, 1972.
- [12] 尾上守夫, 前田紀彦, 斎藤優, “残差逐次検定法による画像の重ね合わせ”, 情報処理学会, Vol.17, No.7, pp.634-640, 1976.