

画像位置合わせの精度向上（その1） 半球歪補正情報決定プログラムの開発

A Newly-developed Technique of Image Mapping: Distortion Data Determination based on the Earth Edge Detection from Infrared Half Disc Image

木川 誠一郎*
Seiichiro Kigawa

Abstract

Image mapping is to make each pixel of VISSR image data correspond to its position on the earth. Image mapping is absolutely necessary to use VISSR image data. In order to improve the accuracy of the image mapping, the Meteorological Satellite Center developed a fine tuning technique of the image mapping, called Distortion Data Determination, based on the earth edge detection from infrared full disc image (Takahashi: 1981). This technique, however, can only apply to full disc image and therefore can not reflect its correction to WEFAX because of the broadcast time schedule. Moreover, the accuracy of the image mapping estimated from landmark matching data shows a seasonal variation (Kigawa: 1990). To solve these problems, a fine tuning technique of image mapping using earth edge data of the northern hemisphere was newly developed. The accuracy of the newly-developed technique estimated from landmark matching data is 140μ radian and less. It will be possible to revise this newly-developed technique with visible earth edge data.

1. はじめに

画像位置合わせとは、VISSR 画像データの各画素と地球上の緯経度との対応づけをすることである。画像位置合わせは、キャリブレーションとともに VISSR 画像データを利用する上で必要不可欠であり、画像位置合わせの精度向上は各プロダクトの品質向上につながる。

現在、気象衛星センターでは、画像位置合わせの精度を向上させるために、アースエッジ検出法による画像位置合わせ（歪補正情報決定処理）を行っている。しかし、この歪補正情報決定処理は全球のアースエッジデータを必要とするため、北半球の画像のみでは処理できない。そのため、速報性が要求される WEFAX や雲画像情報図などのプロダクトに歪補正の結果を反映できないという問題が存在する。また、アースエッジ検出法による画像位置合わせの精度に季節変化があることがわかっており、精度上の問題も存在する（木

川：1990）。

これらの問題点を改善するために、北半球の画像のみを用いた処理法の開発と画像位置合わせの精度向上の2つの目的で調査を行い、新しいアルゴリズムを開発した。この結果、座標変換誤差140マイクロラジアン（赤外1ライン）以内の精度が達成できた。このアルゴリズムを運用に組み込むことにより、すべてのプロダクトに歪補正の結果を反映できる。

2. アースエッジ検出法による画像位置合わせの必要性

VISSR 画像データのライン・ピクセルの座標系と、地球の緯度・経度の座標系との位置的対応をとるためには、衛星の軌道情報、姿勢情報および衛星固有の定数（座標変換定数）が必要で、これらを座標変換情報（画像位置合わせの情報）と呼ぶ。この座標変換情報の精度を更に向上させるために、アースエッジ検出法による画像位置合わせ（歪補正情報決定処理）を行い、この座標変換情報を修正している（根笹：1989）。

* 気象衛星センターシステム管理課
Meteorological Satellite Center

1977年に打ち上げられたGMSは、スピン軸と衛星機械軸のずれ(ティルト)が大きく、そのティルトの短時間の小変動は画像位置合わせに悪影響を与えた。このため、座標変換誤差を赤外画像で1ライン以内(可視画像で4ライン以内)にするという当初の目標の達成が困難になった。

座標変換精度を向上させるために、アースエッジ検出法による画像位置合わせが考え出された(高橋:1981)。これは、赤外VISSR画像からアースエッジ(地球の縁)を検出して、VISSR画像内の地球画像の位置を知ることにより、座標変換情報を修正して座標変換誤差を小さくする処理である。このアースエッジ検出法による画像位置合わせの導入により、座標変換誤差赤外1ライン以内の精度が達成された。

GMS-2以降の衛星ではティルトは改善され、GMS-4では約0.08度と小さくなり、ティルトの短時間の小変動も十分小さくなっている(白川他:1990)。しかし、今でもアースエッジ検出法による画像位置合わせの必要性は変わっていない。これは、座標変換情報の姿勢予測値の精度が十分でないためである。赤外画像からのランドマーク抽出処理技術が確立されていないため、姿勢情報を作成する姿勢決定予測処理では、昼間の可視画像のランドマーク抽出データのみを使用して姿勢決定予測を行っている。このため、夜間の画像データに対する姿勢予測値の精度の低下は避けられない。また、衛星制御による姿勢の変化、衛星内部の温度変化やVISSR観測時のミラー動作等によるティルトの変化などによっても姿勢予測値の精度が悪くなることがある。このような姿勢予測値の精度の悪化によって座標変換誤差が大きくなることを防ぐために、アースエッジ検出法による画像位置合わせが使用されており、今後も必要である。

3. 現在のアースエッジ検出法による画像位置合わせの問題点

現在のアースエッジ検出法による画像位置合わせ(歪補正情報決定処理)は、北極から南極までの全球のアースエッジデータを必要とする。そのため、北半球観測の画像のみでの処理ができないので、速報性が必要なWEFAXや雲画像情報図などに歪補正の結果を反映できない。

一方、ランドマーク抽出データを用いて、アースエッジ検出法による画像位置合わせの精度の評価を行ったところ、座標変換の誤差に季節的な変化が認められ

た。この原因は、南北両極付近の大気状態の季節変化に対し、画像位置合わせ処理のアルゴリズムが十分に対応していないためであることがわかった(木川:1990)。

これらの問題を解決するために、北半球のアースエッジデータだけを使用し、大気状態の変化の影響を受けない新しい画像位置合わせのアルゴリズムの開発を行う必要があった。

4. 半球画像を用いた歪補正情報決定アルゴリズムの開発

北半球のアースエッジデータのみを使用した歪補正情報決定アルゴリズムの開発に対して、画像位置合わせの精度が現行の歪補正情報決定アルゴリズムと同等またはそれ以上に改善されることが要求される。また将来的に、空間分解能の良い可視アースエッジデータを併用して画像位置合わせの精度向上が可能なアルゴリズムであることが望ましい。これは、台風短時間観測による台風詳細風計算、雪氷域、地表面での全天日射量等の可視画像データを用いたプロダクト等の増加により、画像位置合わせのより一層の精度向上が求められた時に対処できるようにするためである。

これらの要求条件を満たす半球歪補正情報決定アルゴリズムを、現行の歪補正情報決定アルゴリズムをもとにして作成した。

4. 1 アルゴリズムの概要

北半球のアースエッジデータのみを使用した歪補正情報決定アルゴリズムを簡単に説明する。この半球歪補正決定アルゴリズムは北半球の赤外アースエッジデータから地球画像の東西の中心線の式と地球画像の南北中心ラインを決定し、この情報をもとに座標変換情報のVISSR取り付けミスアライメント量を修正する。この南北中心ラインを決定するとき、VISSR画像上のアースエッジを連ねた線が円であれば、その円の一部から簡単な式を用いて南北中心ラインを決定することができる。しかし、実際のアースエッジを連ねた線は円からずれている。このずれは、ティルトによる画像の歪、地球が完全な球でないこと、大気状態が緯度によって異なること、そして観測中の衛星の高度や姿勢の変化の影響である。そこで、観測したアースエッジに対し、このずれを補正することで簡単な式を用いて南北中心ラインを決定することが可能になる。

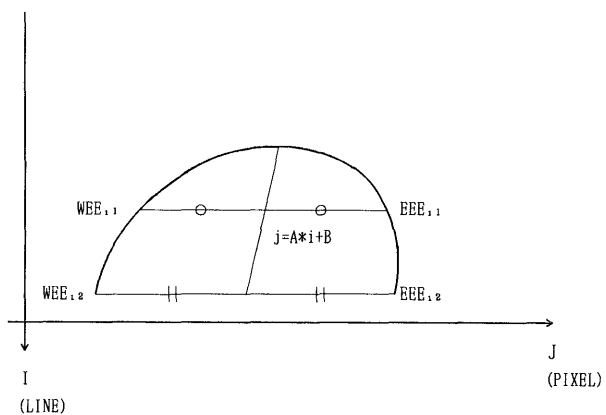


Fig.1 Schematic diagram showing the determination of east-west center line of the earth image in the image frame.

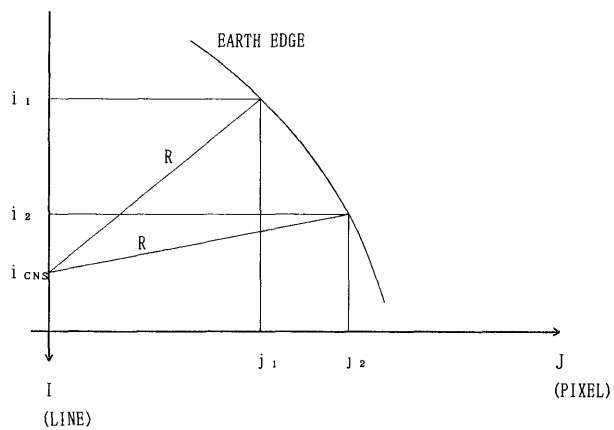


Fig.2 Schematic diagram showing the determination of north-south center line of the earth image in the image frame.

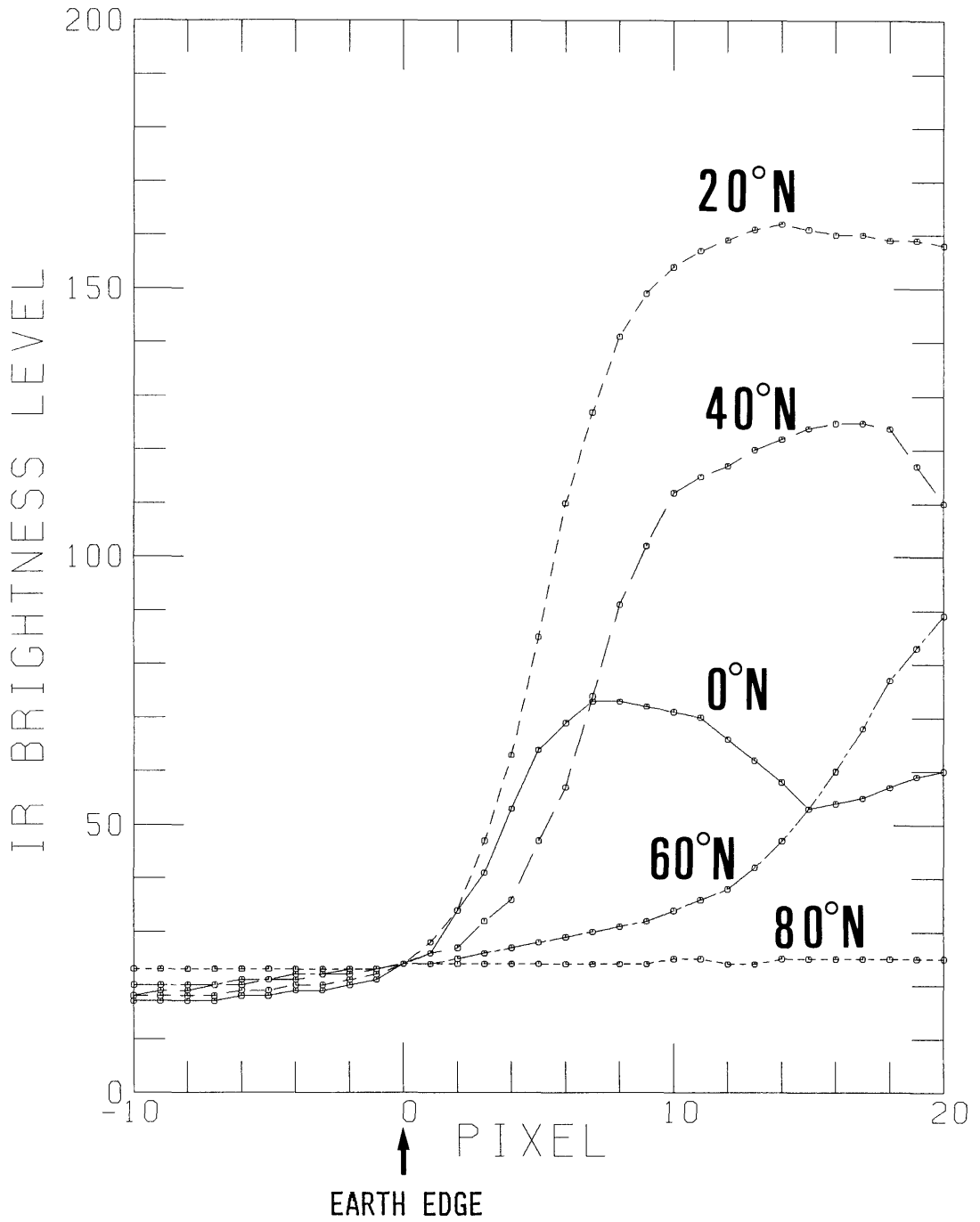


Fig.3 Example of variation of IR brightness level near earth edge. At high latitude, IR brightness varies a little.

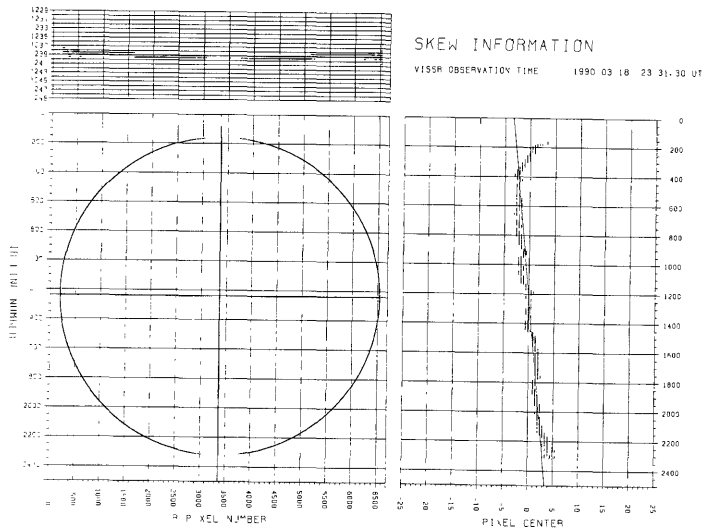


Fig.4 Example of variation of the center of east and west earth edge. At high latitude, the center is variable with line.

4. 2 スピンレートと観測開始時刻の決定

ラインごとのスキャン時刻からスピンレートと観測開始時刻を決定し、座標変換情報のスピンレートと観測開始時刻を修正する。

4. 3 東西中心線の式の決定

VISSR 赤外画像の i ラインの西アースエッジピクセルを WEE_i 、東アースエッジピクセルを EEE_i とすると、東西アースエッジの中心は、

$$CWE_i = (WEE_i + EEE_i) / 2 \quad \text{式 (1)}$$

となる (Fig. 1)。北極付近 (北緯約70度以上) を除く北半球の各ラインについて東西アースエッジの中心を求め、地球画像の東西中心線の式

$$j = A \cdot i + B \quad \text{式 (2)}$$

の係数 A 、 B を最小自乗法により求める。この時、残差の大きいアースエッジデータは棄却する。

4. 4 アースエッジデータの補正

フィルトの影響による VISSR 画像の歪を除去し、南北中心ラインの決定が容易になるようにアースエッジデータを補正する。補正後の i ラインの西アースエッジピクセル WE_i 、東アースエッジピクセル EE_i を次式より求める。

$$WE_i = WEE_i - (A \cdot i + B)$$

$$EE_i = EEE_i - (A \cdot i + B) \quad \text{式 (3)}$$

ここで、 A 、 B は前項で求めた東西中心線の式の係数である。

その他、南北中心ラインを簡単な式で決定できるように次のような補正を加える。

① 地球形状補正

地球は完全な球ではないので、地球を球と仮定した時の仮想上のアースエッジ位置への補正 (変換) を行う。地球を回転楕円体に近似すると、観測されたアースエッジに対する補正量は最大で280マイクロラジアン程度である。

② 衛星の高度や姿勢の変化による地球画像の歪の補正

軌道・姿勢情報から算出した地球画像の南北幅 (地球画像の北端から南端までの画素数) と東西幅 (地球画像の東端から西端までの画素数) を用いて、観測中の衛星の高度や姿勢の変化による地球画像の歪を補正する。

③ 大気状態の緯度変化の補正

緯度によって大気温度分布、水蒸気量、圏界面高度等が異なることによるアースエッジ位置への影響を補正する。補正量は経験的に決めている。この補正を用いることにより、大気状態に起因す

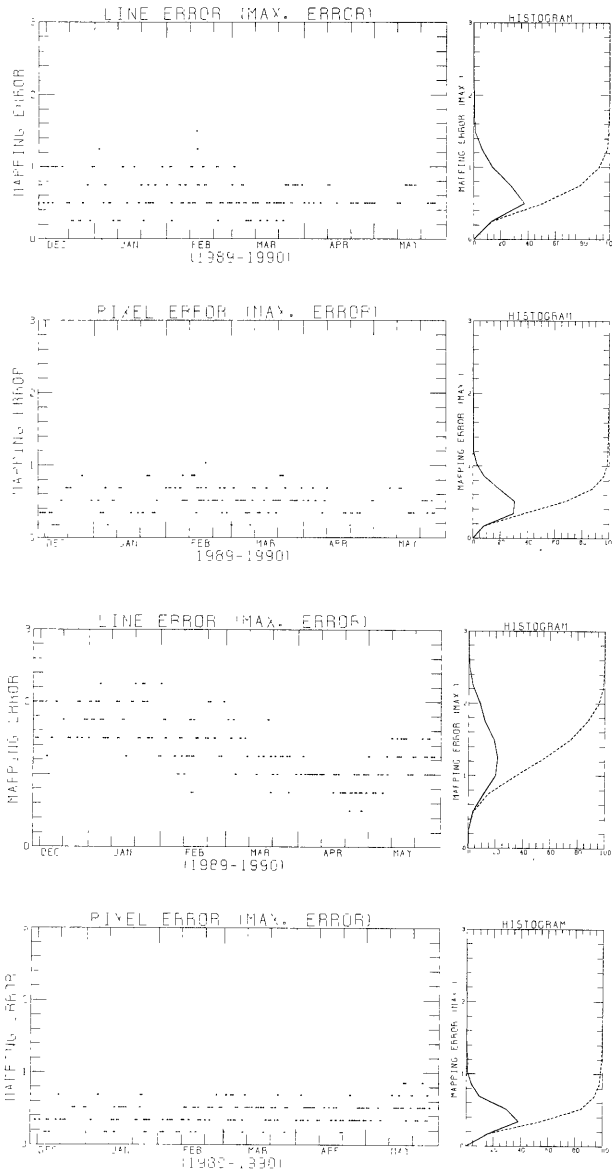


Fig.5 Maximum of image mapping error.

(a) newly-developed technique

(b) Distortion Data Determination (Operation)

Image mapping error = $| OLM - CLM |$

Where

OLM: observed landmark position (line, pixel) on VISSR image.

CLM: landmark position (line, pixel) which is calculated from image mapping data using earth edge data of the northern hemisphere. Right part shows its histogram (solid line) and accumulated histogram (dotted line).

The unit of ordinate is $140 \mu\text{radian}$.

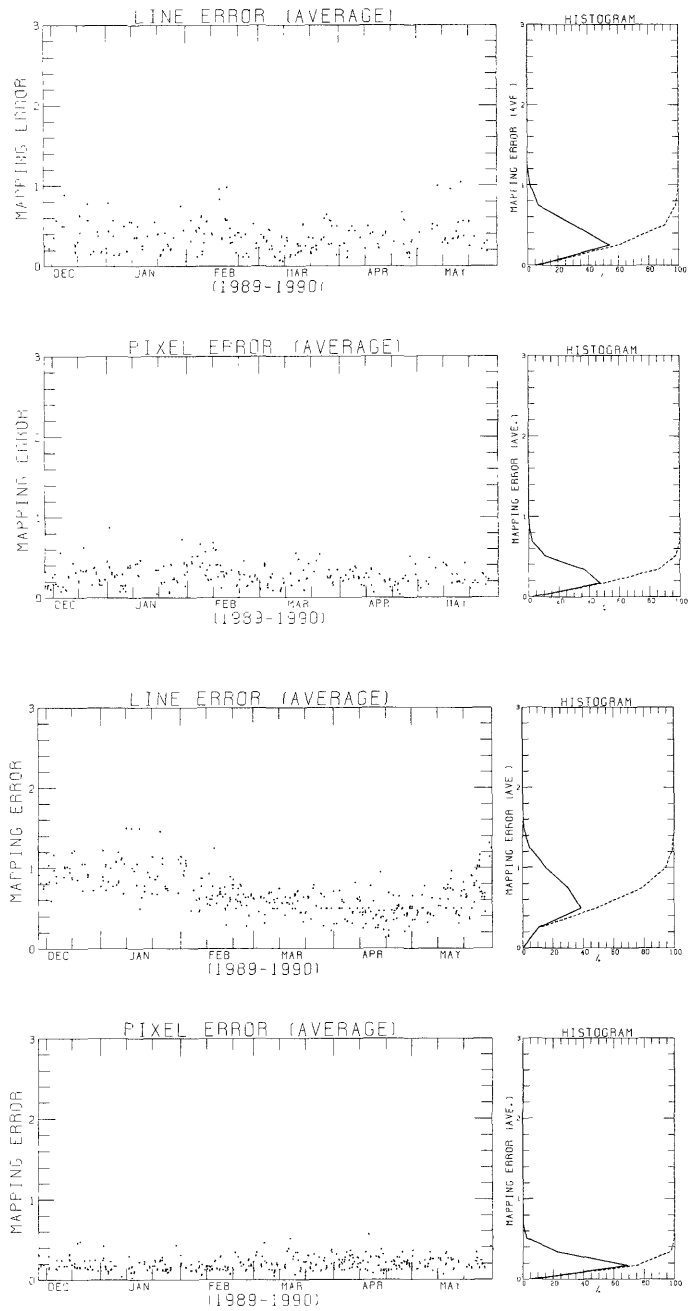


Fig.6 Average of image mapping error. (a) newly-developed technique (b) Distortion Data Determination (Operation) The unit of ordinate is $140 \mu\text{radian}$.

る画像位置合わせの精度の季節変化を小さくすることが可能になる。

4. 5 ノイズの除去

西アースエッジピクセル WE_i と東アースエッジピクセル EE_i をライン i について、それぞれ最小自乗法を用いて多項式近似を行い、残差の大きいアースエッジデータを除去する。

4. 6 地球画像の南北中心ラインの決定

以下の処理により、アースエッジを円の一部と見なすことができる。従って、ライン i_1 のアースエッジを j_1 、ライン i_2 のアースエッジを j_2 とすると、地球画像の南北の中心ライン i_{CNS} は次式より求まる (Fig. 2)。

$$i_{CNS} = i_2 - \left[-\frac{(A_{ELM})^2}{(A_{LINE})^2} \frac{j_2^2 - j_1^2}{i_2 - i_1} + (i_2 - i_1) \right] \cdot 0.5 \quad \text{式(4)}$$

ここで、 A_{LINE} はライン方向ステッピング角、 A_{ELM} はピクセル方向サンプリング角である。西アースエッジ、東アースエッジのそれぞれについて、 i_1 、 i_2 を変化させて i_{CNS} を求め、その平均値を最終的な地球画像の南北中心ラインとする。

この方法は、北極から南極までの東西アースエッジのうち、その一部があれば地球画像の南北中心ラインを求めることが可能なので、北半球のアースエッジデータのみで南北中心ラインを求めることが可能である。これまでの試験では、400ライン程度（北半球の半分）のアースエッジデータがあれば、十分な精度で南北中心ラインを決定できることがわかっている。また、可視アースエッジデータを用いた南北中心ラインの決定が可能になるので、空間分解能の良い可視アースエッジデータの併用による精度向上が期待できる。さらに、この方法を応用すれば空間分解能の良い可視アースエッジデータを用いた東西中心線の再決定も可能である。

4. 7 ミスアライメントの修正

以上の方法で求めた地球画像の東西中心線と南北中心ラインの交点（地球画像の中心）をアースエッジから決定した SSP (Sub-Satellite-Point) とする。これと軌道情報から算出した SSP からミスアライメント修正量を求め、座標変換情報の VISSR 取り付けミスアライメント量を修正する。VISSR 取り付けミスアライメント量は本来、衛星固有の定数であるが、ミスアライメント量を修正することにより座標変換誤差を小

さくすることが可能である（高橋：1981）。

4. 8 主な変更点

現行の歪補正情報決定のアルゴリズムとの特徴的な違いを説明する。

①ステッピング角を修正しないことについて

GMS-4ではティルトは小さく、その短時間の小変動も十分小さい。そこで、ランドマーク抽出データと歪補正情報を用いた予備的な調査を行った結果、ステッピング角の日変化等の変動は認められなかった。また、ティルトの短時間の変動等を考慮できる姿勢モデルを今後開発する予定なので、ステッピング角の修正は行わないことにした。

②大気の影響について

Fig. 3 はアースエッジ付近の赤外輝度レベルの変化の一例である。横軸の単位はピクセル、縦軸は赤外輝度レベルである。高緯度になるに従ってグラフの傾きが小さくなり、赤外輝度レベルの変化が小さくなっていることを示している。アースエッジは赤外輝度レベルの24レベルをしきい値として求めているので、輝度レベルの変化が小さい高緯度のラインでは、アースエッジの位置が変化しやすいく。

Fig. 4 は東西アースエッジの中心を求めた一例である。横軸の単位はピクセル、縦軸の単位はラインである。地球画像の北端、南端付近は東西アースエッジの中心の変化が大きい。これらのことから、大気の影響を受けやすい高緯度のアースエッジデータは使用しないようにした。

5. 試験結果と評価

半球歪補正情報決定プログラムによる画像位置合わせの精度の評価をランドマーク抽出データを用いて行った。評価の方法は、可視ランドマーク抽出処理から得られる VISSR 画像上のランドマーク位置と、半球歪補正情報決定プログラムによる画像位置合わせ後の座標変換情報から算出したランドマーク位置を比較し、座標変換（画像位置合わせ）の誤差を求める。

Fig. 5、6 にその結果を示す。ランドマーク抽出処理で得た各ランドマークについて、それぞれ VISSR 画像上のランドマーク位置と座標変換情報で算出したランドマーク位置との差の絶対値を求める。Fig. 5 (a) は、この差の1画像内の最大値を縦軸にとり、横軸に観測時刻をとったもので、縦軸の単位は140マイクロラジアン（赤外1ラインに相当）である。また、

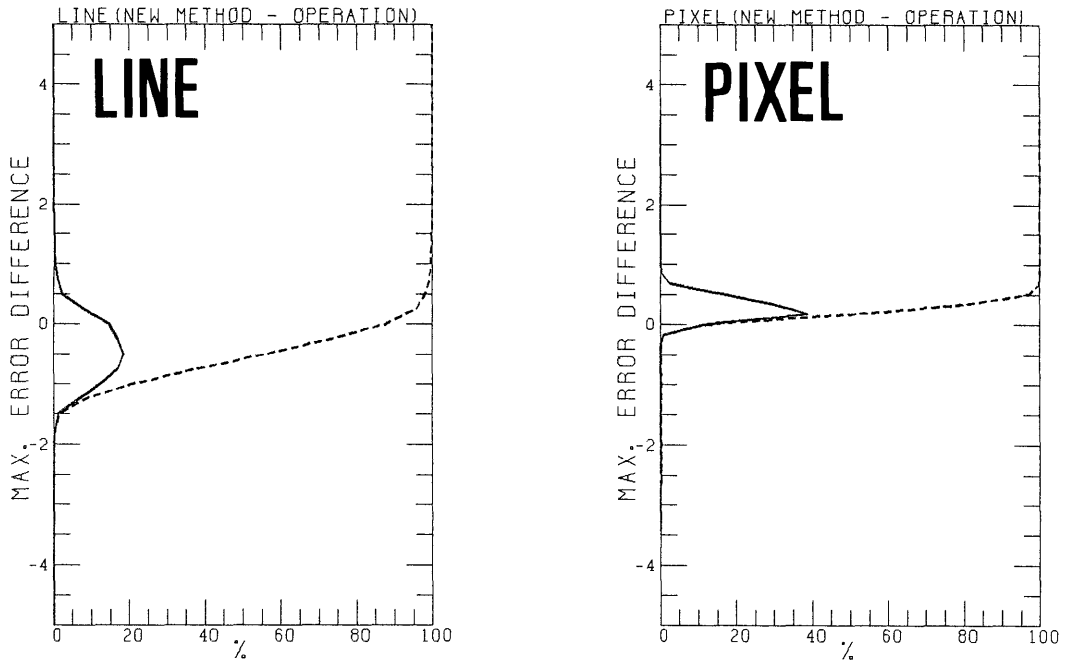


Fig.7 Comparison of maximum of image mapping error between newly developed technique (NEW METHOD) and Distortion Data Determination (OPERATION). Solid line shows the histogram and dotted line shows accumulated histogram. In case that maximum error difference is zero and less, NEW METHOD is better than OPERATION. The unit of ordinate is $140 \mu\text{radian}$.

この差の1画像内の平均値を Fig. 6 (a) に示す。最大値で見ると、ライン方向、ピクセル方向とも座標変換誤差の季節変化は見られない。図の右の部分は、その度数分布で、実線が度数分布、点線が累積度数分布である。ライン方向、ピクセル方向とも、試験を実施した事例(667画像)の90%以上で、ランドマーク位置の差の最大値が140マイクロラジアン以内になっている。雲の影響によるランドマーク抽出誤差を考慮すれば、座標変換誤差は140マイクロラジアン以内であると言える。この試験は大気状態の緯度変化の補正を季節によらず一定にして実施したが、座標変換誤差に季節変化は認められなかった。これは、半球歪補正情報決定プログラムが大気の影響を受けやすい北極付近のアースエッジデータを使用していないためと考えられる。

比較のために、Fig. 5 (b) と Fig. 6 (b) に、現行の歪補正情報決定プログラムの精度の評価を半球歪補正情報決定プログラムと同じ事例、同じ方法で行っ

た結果を示す。最大値で見ると、ライン方向のランドマーク位置の差(座標変換誤差)が大きく、140マイクロラジアン(赤外1ライン)以内を満たしているのは、総事例の約35%だけである。Fig. 7は、半球歪補正情報決定プログラムと現行の歪補正情報決定プログラムの座標変換誤差を比較したものである。各事例(画像)について、両者のランドマーク位置の差の最大値を比較し、その差の度数分布を示している。半球歪補正情報決定プログラムによる最大値から現行の歪補正情報決定プログラムによる最大値を引いた値なので、0以下の事例は半球の方が現行より画像位置合わせの精度が良いか同じ精度ということになる。ライン方向に関しては、90%の事例で半球の方が精度が良いが、ピクセル方向は半球の方が精度が良いのは約10%の事例だけである。ピクセル方向の精度が悪いのは、現行の全球のアースエッジデータから決定した東西中心線に比べ、半球では東西中心線の式の係数の精度が悪くなる

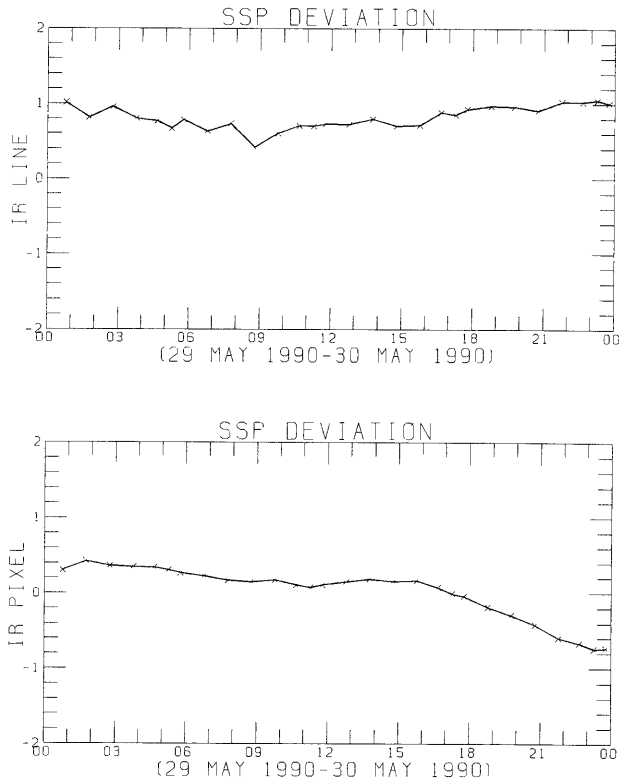


Fig.8 Comparison of SSP (line, pixel) between newly developed technique (NEW METHOD) and Distortion Data Determination (OPERATION).

ためと考えられる。

画像位置合わせの精度が画像ごとに異なると、風計算等の時系列の画像を使用したプロダクトに悪影響を及ぼす。現行の歪補正情報決定プログラムでは、連続した画像の画像位置合わせの精度は安定しているので、現行の歪補正情報決定プログラムの結果と半球歪補正情報決定プログラムの結果を比較することにより、画像位置合わせの精度の変動を間接的に調べることができる。Fig. 8は、半球歪補正情報決定プログラムで決定した SSP と現行の歪補正情報決定プログラムで決定した SSP との差である。この結果を見る限り、連続した画像の画像位置合わせの精度の変動はないと言える。今後、夜間の画像も含めたランドマーク抽出による詳細な調査が必要である。

以上、試験結果をまとめると、ライン方向、ピクセル方向とも試験を実施した事例の90%以上で座標変換

誤差が140マイクロラジアン以内になった。現行の歪補正情報決定プログラムとの比較では、ライン方向は精度が改善されたが、ピクセル方向は逆に悪くなった。連続した画像の画像位置合わせの精度の変動は見られなかった。

半球歪補正情報決定プログラムは、運用への使用に十分な140マイクロラジアン以内の精度をもっており、精度の変動も小さい。これらの試験結果から、半球歪補正情報決定プログラムは運用に使用できる精度を持っていると判断できる。

6. 今後の課題

試験結果から、半球歪補正情報決定プログラムの運用への使用が可能であることが確認された。今後、運用に使用するには、プログラムの効率化、最適化を計るとともに、計算機のスケジュール調整や画像位置合

わせの精度モニター・評価等のサポートを行うプログラムを整備することが必要である。これらの作業を早急に行い、出来るだけ早く運用に使用したいと考えている。

さらに、画像位置合わせの精度向上のために、可視アースエッジデータを併用することによる精度向上の検討や、赤外画像からのランドマーク抽出処理技術の確立、衛星制御による姿勢の変化の正確な予測、衛星内部の温度変化や VISSR 観測時のミラー動作等によるティルトの変化も考慮した姿勢モデルの開発等により姿勢予測値の精度を向上させることが今後の課題である。

7. 終わりに

北半球のアースエッジデータのみを使用し、大気状態の変化の影響を考慮した画像位置合わせ処理を開発した。ランドマーク抽出データを用いた精度評価の結果、座標変換誤差はライン、ピクセル方向とも140マイクロラジアン以内を十分達成でき、ピクセル方向以外は現行の歪補正情報決定プログラムと同程度以上の精度を持っていることがわかった。これらの試験結果から、半球歪補正情報決定プログラムを運用に使用することが基本的に可能であることが確認された。このプログラムは、可視アースエッジデータを併用できる発展性を持っているので、将来、より一層の精度向上が期待できる。

謝 辞

有益な議論と草稿の校閲に対して、気象衛星センター能美武功データ処理部長、解析課麻生正先任技術専門官、内藤成規調査官、システム管理課根笹光生技術専門官、竹内義明技術主任、佐々木政幸技官に謝意を表す。

参考文献

- 木川誠一郎 1990：アースエッジ検出法による画像位置合わせに及ぼす南北両極の大気の影響について。気象衛星センター技術報告、第21号、11-17。
- 白川嘉茂、佐々木政幸 1990：GMS-4・VISSR の特徴について。気象衛星センター技術報告、第21号、1-10。
- 高橋大和 1981：アースエッジ検出法による VISSR 画像の位置合わせについて。気象衛星センター技術報告、第3号、55-68。

根笹光生 1989：画像位置合わせ。気象衛星センター技術報告特別号(1989) II、データ処理編、39-43。