

極軌道衛星 (TIROS-N) における HIRS/2 と AVHRR 画像の位置合せについて

A Method for Matching the HIRS/2 and AVHRR Pictures of TIROS-N Satellites

青木 忠生

Tadao Aoki

Abstract

The diameter of a field of view of HIRS/2 on TIROS-N satellites is about 17 km at nadir. This makes difficult to locate a field of view of HIRS/2 precisely on the ground by such a method as land mark matching. In this work we show a method for matching the two pictures of AVHRR and HIRS/2 on board TIROS-N satellites. The absolute location of HIRS/2 spots on the ground is indirectly determined from the location of AVHRR picture on the ground, which is determined by the land mark matching method.

The above method for matching the AVHRR and HIRS/2 pictures also enables us to determine the cloud amount within a HIRS/2 spot because a spot of HIRS/2 contains 300 to 450 AVHRR spots.

It has been shown by a simulation study that with the use of the present method the pictures of AVHRR and HIRS/2 can be collocated within one spot of AVHRR.

1. はじめに

極軌道衛星 TIROS-N シリーズは大気探測用の測器を4種類ほど搭載しており、大気の垂直温度分布、水蒸気分布、地表温度、オゾン量、雲頂高度、雲量などを測定することができる。HIRS/2 (High Resolution infrared Radiometer Sounder の2世代目) はこれらを測定するための中心となる測器である。HIRS/2 の視野の地表での大きさは直下で 17 km、走査線の端では 58 km くらいである。したがって、静止衛星の場合のようにランドマークとのマッチングによってその視野の位置を決めようとしてもその精度はあまり期待できない。

極軌道衛星は三軸安定型でその姿勢精度は 0.12° (直下点で 1.7 km くらい) 程度である。したがって、通常はまず軌道を計算し、姿勢を正しいとして走査角度から視野の位置を求めている。しかし、毎日送られてくる軌道決定のための種々のパラメーターを調べてみるとその値は 5~7 日間に一回程度の割合で大きく変化している。したがって、我々が GTS 回線でその情報を得るのは 1~2 日後であるためその間の軌道計算に大きな誤差が生ずる可能性がある。さらに、1979年の11月には TIROS-N 号の姿勢が大きくくずれて、走査線の端では最大 90 km くらいの誤差が生じたというようなこともあった。

このようなことを考えると、視野の位置の決定法として何か別な、それもランドマークマッチングのように絶対的な方法があった方がよいということになる。AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) の直下での視野の大きさは 1.1 km くらいなのでランドマークマッチングの手法でその画像の位置は正確に決めることができる。したがって、もし、AVHRR と HIRS/2 の画像の相対的な位置関係が知れば HIRS/2 の視野の位置も正確に知ることができる。

ここでは HIRS/2 の第 8 チャネル (中心波数は大気窓と呼ばれる 900 cm^{-1} くらいのところにある) と AVHRR の第 4 チャネル (中心波数はやはり 900 cm^{-1} くらい) がほぼ同じ波数特性をもっていることに着目して、両者の画像の間のマッチングをとる方法を述べる。

AVHRR と HIRS/2 のマッチングをとることの効用は実はもう一つある。AVHRR の視野は HIRS/2 に比べ小さいので HIRS/2 の一つの視野に AVHRR のそれはほぼ 300~450 個くらい含まれる。したがって、もし、両者のマッチングがとれれば、AVHRR のどの視野が HIRS/2 のどの視野に含まれるかということが分るので HIRS/2 の視野中の雲量を決定することができる。雲量が知れると HIRS/2 の各チャネルの晴天放射量を従来の方法に比べて非常に高精度で決定することが

でき (Aoki, 1980), したがって, 垂直温度, 水蒸気分
 率等の精度も向上することが期待できる。ここで述べる
 AVHRR と HIRS/2 のマッチングの方法は実は, むし
 ろこの目的のために当初開発されたものである。

AVHRR の各視野がどの HIRS/2 の視野に含まれる
 かという問題はもし, 両者の走査鏡の回転軸が完全に一
 致して, 衛星の姿勢が正しく保たれている場合にはそれ
 ほど難かしいものではない。仮りに, 今, 軌道方向と衛
 星直下を含む面内で, AVHRR と HIRS/2 の回転軸
 が 0.07° ほどズレていたとすると地上では AVHRR 1 ラ
 イン分のズレとなる。TIROS-N シリーズの衛星はも
 と AVHRR 画像で HIRS/2 各視野の雲量を知ろう
 というような目的を考えて作られていないから, 両測器
 の回転鏡の一致についても上のような高精度を期待でき
 ない。まして姿勢については既に述べた通りである。と
 はいっても, AVHRR と HIRS/2 の走査鏡の回転軸が
 著しくズレるといことは考えにくいから, ズレの量は
 正常な位置から微小な量であるという前提で理論を組み
 立てていくことにする。

2. HIRS-AVHRR 画像マッチングのアルゴリズム

2.1 ある HIRS の視野に含まれる AVHRR の画素番
 号の計算法

まず, すでに述べたように AVHRR の視野は HIRS
 /2 のそれに比して非常に小さいのでここでは適宜, 画
 素とかピクセルという表現を使うことにする。又 HIRS
 /2 は HIRS と簡単に書くことにする。

HIRS は衛星の進行方向に向かって左から右に 99° の角
 度範囲を6.4秒に1回の割合で走査する。1回の走査で
 観測を行う視野の数は56個である。一方, AVHRR は
 1/6秒に1回のスピードで高速回転する回転鏡によつて
 画像を取得する測器で, 取得範囲は地球の縁を各回転毎
 に検出して次の撮像時間を決めるという方法でコントロ
 ールしている。画像取得範囲は 110.8 度と HIRS より少
 し広く, 得られる画素数も2048個と多い。撮像方向は
 HIRS とは逆に右から左であり, 実はこのことが今こ
 こで扱う問題を複雑にしている。HIRS, AVHRR の各撮
 像特性を Table 1 にまとめてある。

Table 1 The characteristics of AVHRR and HIRS/2 scanning.

	HIRS/2	AVHRR
Scan time(sec)	6.4	1/6
Optical FOV(degree)	1.25	0.00745
Step angle(degree)	1.8	0.0541
Cros-track scan(degree)	± 49.5	± 55.4
Channel number	20	4(5)
Ground FOV(nadir)(km)	17.4	1.1

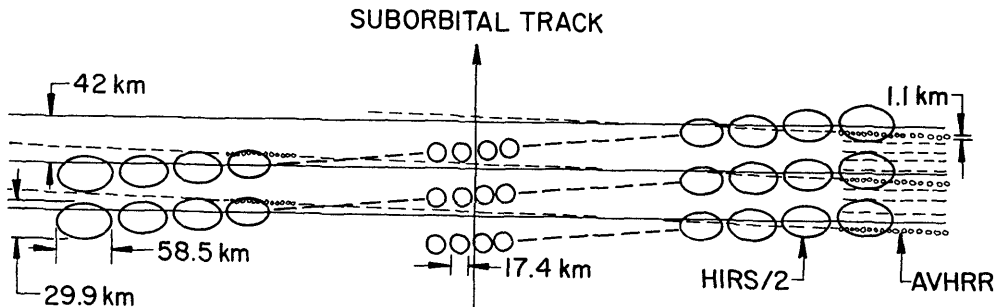


Fig. 1 Scan patterns of HIRS/2 (larger ellipses) and AVHRR (smaller ellipses).

さてこのような HIRS, AVHRR の画像を模式的に描くと Fig. 1 のようになる。我々の課題は、ある AVHRR の画素の何番目から何番目までが、HIRS のどの視野に含まれるかを知ることである。以後、HIRS の視野に含まれる AVHRR 画素の最初と最後の番号をそれぞれ N_A, N_B と書くことにする。すべての AVHRR ラインに対してこのような N_A, N_B を求めるのはいかにも大変なようだが次のような近似で問題を簡単化できる。

HIRS の1回の走査に 6.4 秒、AVHRR は 1/6 秒を要するから、HIRS 1 ラインの間に AVHRR はほぼ 38~39 本のラインを得る。ここではとりあえず、ライン、ピクセル方向の画像のズレはないものとして話を進める。するとこの 39 本の AVHRR ラインが交差する可能性のある HIRS ラインは、Fig. 1 の場合、現在走査中のラインとその前及び、次のラインである。すると、この 39 本の AVHRR ラインについて 3×56 個の HIRS 視野に対する N_A, N_B をあらかじめ知っておけば、次の 6.4 秒は同じパターンのくり返しと考えればよい。6.4 秒は 1/6 秒では割り切れないので厳密には同じパターンのくり返しとはならないが、AVHRR のライン間隔は HIRS のそれに比して十分狭いので、少しずらして同じパター

ンのくり返しと近似してもそれほど大きな誤差にはならない。すると、 N_A, N_B は 39 本ある AVHRR のライン、HIRS のライン、及び HIRS の視野毎の関数として与えればよい。交差する HIRS のライン数は Fig. 1 の場合 3 本であるが、交差角によっては 1 本、あるいは、5, 7 本という場合もあり得る。しかし、ここでは AVHRR と HIRS の取り付け角はそれほど大きな誤差はないものとして、一応 5 本以上交差することはないとして考えることにする。すると、 N_A, N_B は $N_A(I_A, I_H, J_H), N_B(I_A, I_H, J_H)$ ($I_A=1, \dots, 39, I_H=1, \dots, 5, J_H=1, \dots, 56$) という風に AVHRR の相対的ライン番号 I_A (1~39), HIRS の相対的ライン番号 I_H (1~5), HIRS の視野番号 J_H (1~56) の関数として与えられ、次の 6.4 秒の N_A, N_B もこのような相対番号によって知ることができる。

さて、これまではライン、ピクセル方向の画像のズレは考えないできたが、AVHRR と HIRS の取り付け位置が悪いと、単に交差角のズレ以外に、Fig. 2 に示すようにライン、ピクセル方向にもズレが生ずる。Fig. 2 はある一定時間内に取得される HIRS, AVHRR の画像範囲を模式的に描いたもので、 $H_1H_2H_3H_4$ は HIRS の A_1

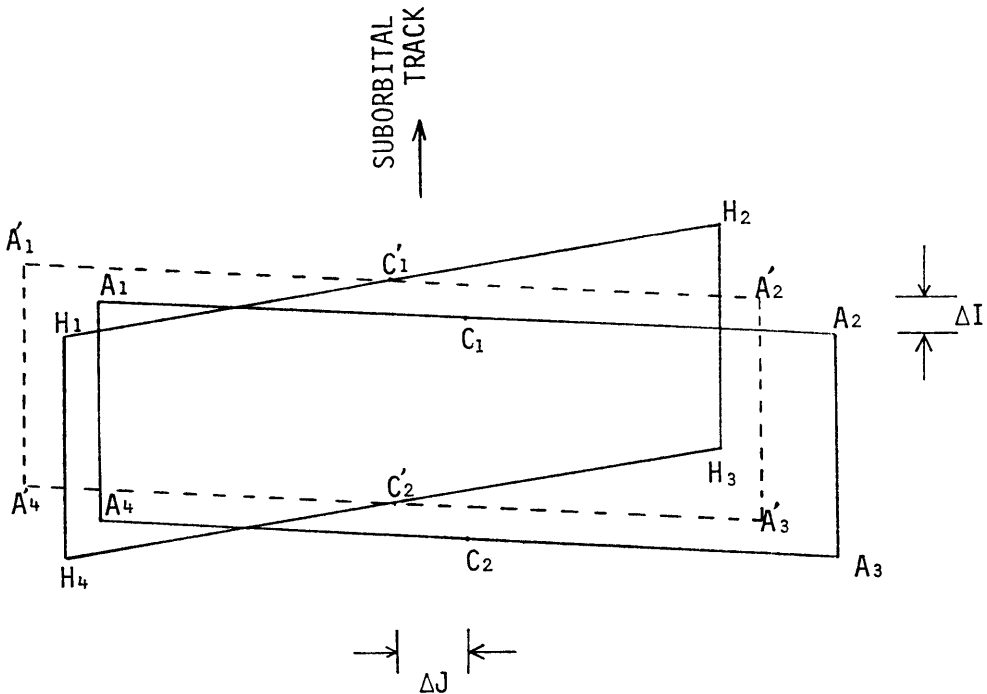


Fig. 2 An illustration of the shifted scan areas of AVHRR ($A_1A_2A_3A_4$) relative to that of HIRS/2 ($H_1H_2H_3H_4$). Unshifted scan area of AVHRR is also shown by $A'_1A'_2A'_3A'_4$.

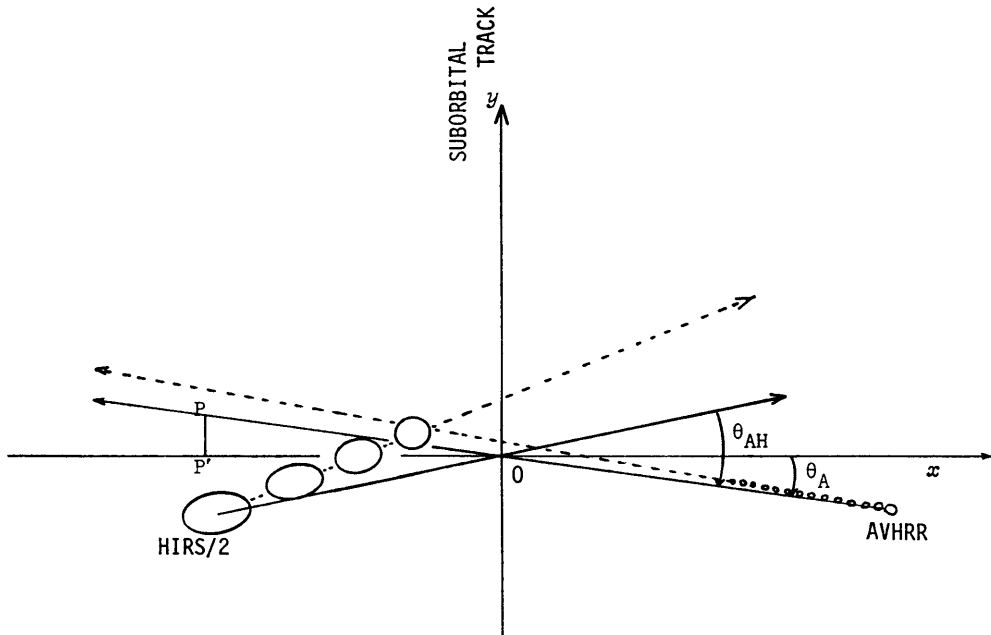


Fig. 3 An illustration of scan patterns of HIRS/2 and AVHRR for the incoincident rotational axes of scan mirror.

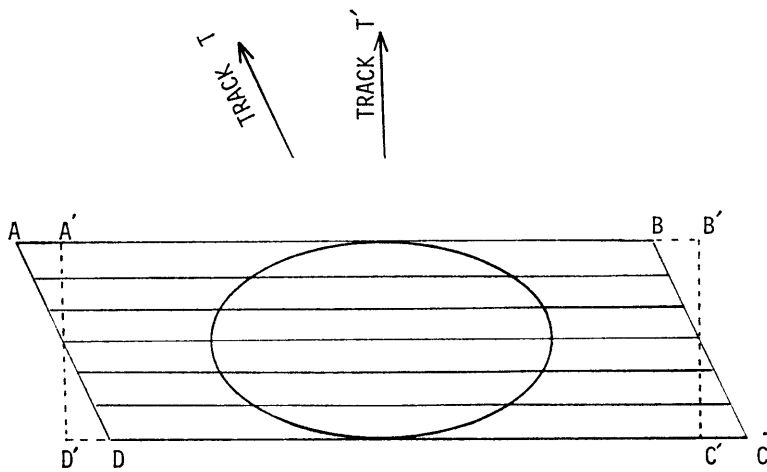


Fig. 4 An illustration of scan pattern of AVHRR relative to a spot of HIRS/2 for two values of θ_A .

$A_2A_3A_4$ は AVHRR の画像範囲をそれぞれ示している。両者の画像の中心線は各々 $C_1'C_2'$ 及び C_1C_2 である。我々が先ほど調べた N_A, N_B はライン、ピクセル方向のズレ（このズレをそれぞれ図に示すように $\Delta I, \Delta J$ としよう）がない場合のことであった（すなわち図の $A_1'A_2', A_3'A_4'$ で、 $A_1A_2A_3A_4$ を平行移動して中心線を一致させた画像に対するもの）。もし、このズレがあまり大き

くないとすれば、 $A_1A_2A_3A_4$ に対する N_A, N_B としては、 I_A として $I_A - \Delta I$ を代入して $A_1'A_2'A_3'A_4'$ での N_A, N_B の値を求め、さらに、これを $N_A + \Delta J, N_B + \Delta J$ としたものをえばよいことがわかる（AVHRR は右から左に走査するので、 N_A, N_B は右から左に番号を付けてある）。

このように N_A, N_B はライン、ピクセル方向のズレは

ないとして、ある交差角について計算しておけばよいことになる。以下この N_A, N_B を求める方法について述べる。今衛星が静止したままでスキャンしたとき、そのスキャンラインが Fig. 3 の実線のようなになったとしよう。このとき AVHRR ラインの x 軸からのズレを θ_A 、HIRS のラインと AVHRR ラインのズレを θ_{AH} とする。ここで x は衛星の進行方向（これを y 軸にとる）に直角な方向である。このような静止時のスキャンラインに対して、衛星が動き出した場合のスキャンラインは図の点線のようなになる。 θ_A は衛星の進行方向に対する AVHRR スキャン軸のズレであるが、これがどうして HIRS と AVHRR の相対的位置対応を示す量であるところの N_A, N_B に関与するかを Fig. 4 によって示した。図は2つの θ_A について AVHRR の画像パターンがどうなるかを示したものである。1つは $ABCD$ 、もう1つは $A'B'C'D'$ の画像が得られる。重要なことは HIRS の視野（楕円）はある瞬間（この図では中間の AVHRR ラインが得られた時刻）に得られたのに対し、AVHRR ラインはこの中間のラインを除いてその後、あるいはその前の、異なった時刻にスキャンしていることで、これがこのような画像の歪の効果を生んでいる。

さて、静止しているときの AVHRR のスキャンライン上の点 P から x 軸までの距離 PP' 、すなわち、 P 点の y 座標を調べる。Fig. 5 において O' は衛星、 P は Fig. 3

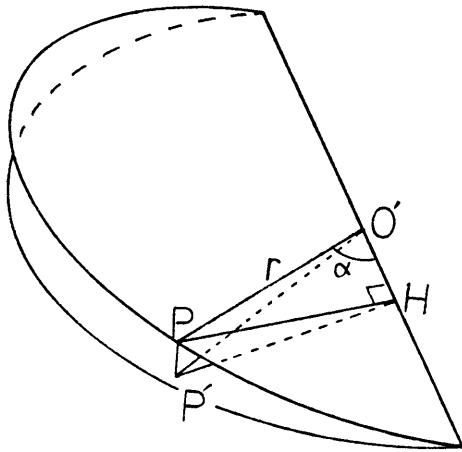


Fig. 5 The relation of the distance PP' to α and θ_A .

の P で PO' の距離を r とする。上の円板は Fig. 3 における AVHRR のスキャン面、下のそれは x 軸を含む面である。2つの円板のなす角は θ_A である。 P 点のスキャン角を α とし PH を P から両円板の交線におろした垂線、又 PP' を P から下の円板におろした垂線とする

と (P' は Fig. 3 の P' に対応する)

$$PH = r \sin \alpha$$

又、角 $PHP' = \theta_A$ だから

$$P'H = PH \cos \theta_A = r \sin \alpha \cos \theta_A$$

よって

$$\begin{aligned} PP' &= \sqrt{(PH)^2 - (P'H)^2} \\ &= r \sin \alpha \sin \theta_A \end{aligned} \quad (1)$$

ここで r の値を求めておく。地球半径を R_e 、衛星の高度を h とすると Fig. 6 より

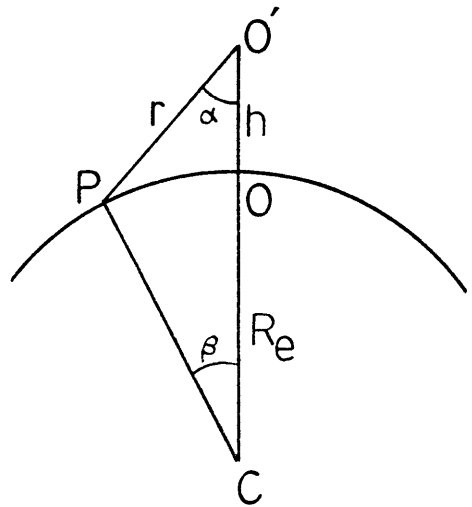


Fig. 6 The relation between the distance and the scan angle α .

$$R_e \cos \beta + r \cos \alpha = R_e + h$$

$$R_e \sin \beta = r \sin \alpha$$

の2式が成り立つことが分る。これより

$$\begin{aligned} r &= (R_e + h) \cos \alpha \\ &\quad - [(R_e + h)^2 \cos^2 \alpha - (2R_e + h)h]^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

として求まる。

さて衛星が動いていると P 点の y 座標はさらに $v \delta_A (N-1)$

だけ増す。ここで v は衛星の対地速度、 δ_A は AVHRR の各画素の時間間隔、 N は P 点に対応する AVHRR の画素番号である。今 Fig. 3 における座標の原点として HIRS のスキャンが開始するときの衛星の直下点をとることにしよう。又、これと同時にスキャンを開始する

AVHRR ラインを1番目の AVHRR ラインとする。

すると、一般に I_A 番目の AVHRR ラインにおける N 番目の画素の y 座標は

$$y_A = r \sin \alpha \sin \theta_A + v \delta_A (N-1) + T_{AV} (I_A - 1) \quad (3)$$

となる。ここで T_A は AVHRR のラインとラインの時間間隔で 1/6 秒である。又、スキャン角 α をピクセル番号 N で表わすと

$$\alpha = -\gamma_A + \Delta_A (N-1) \quad (4)$$

ここで γ_A は AVHRR のスパン角で 55.4° 又、 Δ_A は AVHRR 画素のステップ角 ($=0.054^\circ$) である。

全く同様にして HIRS の各視野の中心の y 座標が次式のようにして求まる。

$$y_H = r \sin \alpha \sin \theta_H + v \delta_H (J_H - 1) + T_H v I_H \quad (5)$$

ここで δ_H は HIRS 各視野の時間間隔、又 I_H は HIRS の相対的ライン番号で Fig. 3 のラインは 0 番目、それ以前のラインは $-1, -2, \dots$ 、又、それ以後のは $+1, +2, \dots$ とする。 J_H は HIRS の視野番号で 1 から 56 までである。 T_H は HIRS ラインの時間間隔で 6.4 秒である。又、 θ_H は

$$\theta_H = \theta_A - \theta_{AH} \quad (6)$$

ここで θ_{AH} は Fig. 3 のように静止時の HIRS ラインから AVHRR ラインまで時計回りに計った角度である。同様に θ_A も x 軸から時計回りに計った AVHRR ラインの角度である。

HIRS の J_H 番目の視野のスキャン角は

$$\alpha = \gamma_H - \Delta_H (J_H - 1) \quad (7)$$

で与えられる。ここで γ_H はスパン角 ($=44.5^\circ$)、 Δ_H はステップ角 ($=1.8^\circ$)。このときの視野は地上で Fig. 7 で示すような楕円となり短軸の半径 b は

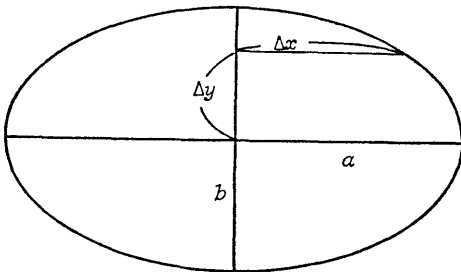


Fig. 7 An illustration to show the number of pixel of an AVHRR line that deviates by Δy from major axis of HIRS /2 sp ot.

$$b = r \tan \frac{\gamma_H}{2} \quad (8)$$

ここで γ_H は HIRS の視野角である。

さて長軸の半径を a としよう。今 AVHRR と HIRS の取り付け角のズレ θ_{AH} は非常に小さいとすると AVHRR ラインはほぼこの長軸方向に平行である。長軸に一致した AVHRR ラインについては

$$n_0 = \frac{\gamma_H}{\Delta_A} \quad (9)$$

個の AVHRR 画素がこの HIRS 視野の中に含まれる。これは視野に依らない定数である。長軸から Δy だけ離れた AVHRR ラインについては

$$n = \frac{\Delta x}{a} n_0 \quad (10)$$

個含まれる。ここで $\Delta x/a$ は楕円の式より次式で求まる

$$\frac{\Delta x}{a} = \left[1 - \frac{(\Delta y)^2}{b^2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

さて、以上ですべての HIRS の視野、及び AVHRR 相対ライン番号についての N_A, N_B を求める計算式ができた。すなわち、 I_H 番目の相対 HIRS ライン番号の J_H 番目の視野に含まれる I_A 番目の相対 AVHRR ライン上の画素の N_A, N_B は、まず、(7)によって HIRS 視野の中心のスキャン角 α を求めこれよりこの α に一致する AVHRR の画素番号 N を(4)より求める。次に(3)及び(5)から y_A, y_H を求め

$$\Delta y = |y_A - y_H| \quad (12)$$

を計算する。(1)と(10)より n を求めれば N_A, N_B は

$$\left. \begin{aligned} N_A &= N - \frac{n}{2} \\ N_B &= N + \frac{n}{2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

として得られる。もちろん $|\Delta y| > b$ のときはこの HIRS 視野とその AVHRR ラインは交差ししないことを示している。

なお、 N_A, N_B は I_H, J_H, I_A の関数であるとともに θ_{AH}, θ_A 及び、衛星の対地速度 v の関数であったことに注意すると

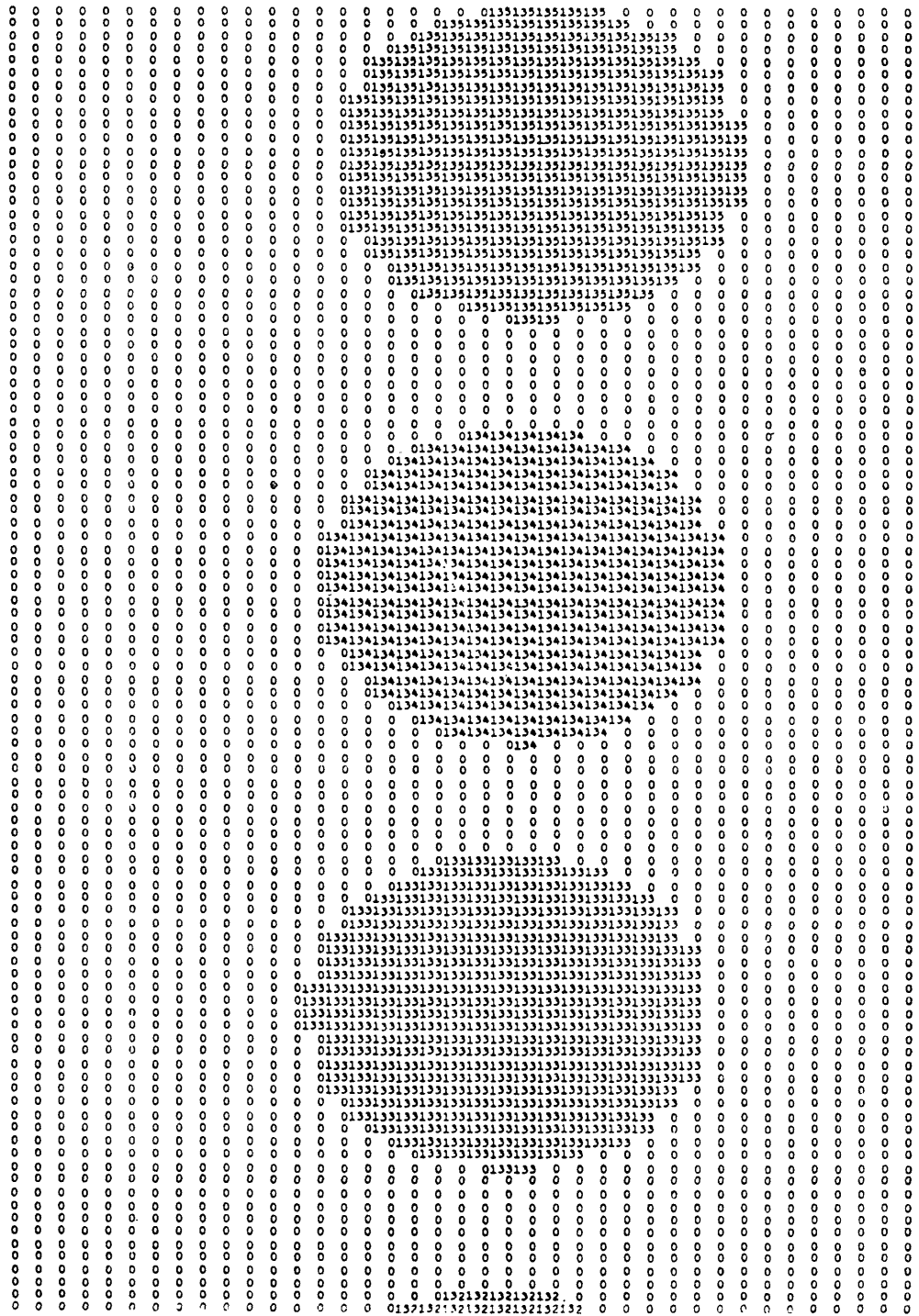


Fig. 8a An illustration of the calculated collocation of AVHRR pixels and the 34, 35 and 36th spots of HIRS/2. A case for $\theta_{AH} = \theta_A = 0$. The pixels between N_A and N_B are represented by the numerical numbers 34, 35, 36 or 134, 135, 136 and the other are by 0.

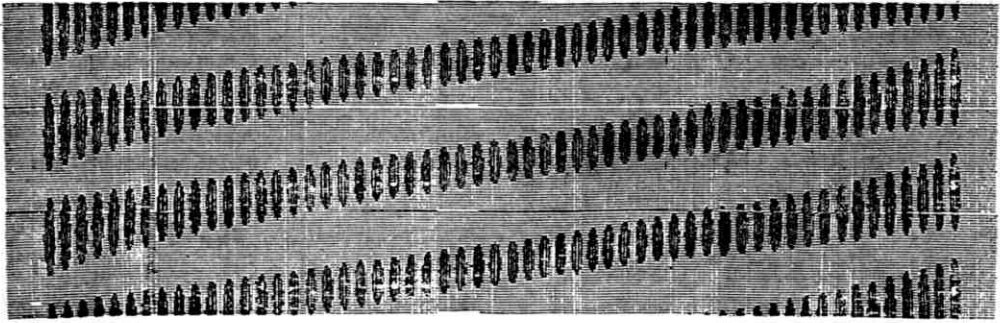


Fig. 9 Illustration of the scan pattern to show the effect of θ_{AH} and θ_A . A case for $\theta_{AH} = \theta_A = 0.5$ degree. This is a figure reduced from a computer list such as Fig. 8 except that the every other pixels of AVHRR are eliminated.

$$\begin{aligned} N_A &= N_A(I_H, J_H, I_A, \theta_{AH}, \theta_A, v) \\ N_B &= N_B(I_H, J_H, I_A, \theta_{AH}, \theta_A, v) \end{aligned} \quad (14)$$

である。Fig. 8a, bはこのようにして N_A, N_B を計算し、楕円の内部だけを、その HIRS の視野番号を入れて、AVHRR の画素を計算機出力したものである。a 図はスキャンラインの中心付近、b 図は端の部分である。図は画素番号を座標軸にとっているのにライン方向に引き伸ばされた楕円になっているが、実際のはむしろ画素方向に引き伸ばされたものになっている。Fig. 9 は Fig. 8 において AVHRR の画素を数個おきに間引いて出力したリストを縮小に縮小を重ねて得た全 HIRS

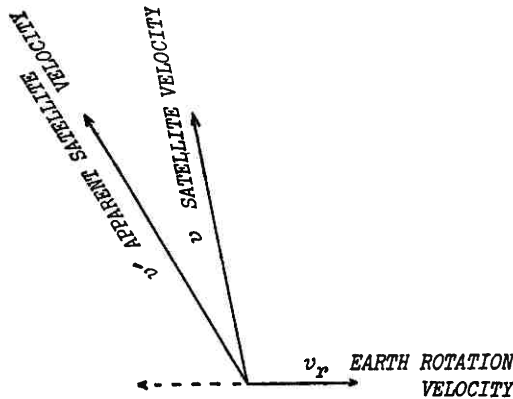


Fig. 10 Illustration of the effects of the earth rotation on the velocity of the satellite relative to the earth surface.

の視野と AVHRR ラインを示したものである。この図も Fig. 8 と同じく楕円の間延びの方向が実際とは逆になっている (Fig. 1 を横方向から圧縮したものに相当する)。

ここで我々はまだ θ_{AH}, θ_A についてその値を知っていない。次節ではこの θ_{AH}, θ_A とライン、ピクセルのズレ $\Delta I, \Delta J$ を求める方法について述べる。

その前に地球自転の効果について触れておく。地球自転の効果を検討に入れるということは、Fig. 10 で示すように、衛星の見かけの対地速度ベクトルが変化したものと考えればよい。対地速度は地球の自転がないときは、地球がほぼ球形、衛星の軌道もほぼ円形であることからほぼ一定なのであるが、自転を考えると自転速度が緯度によって変化するため、自転の効果は緯度毎、及び、北上、南下毎に異なったものになる。

さて、今我々が考察しようとするのは、 N_A, N_B , すなわち、AVHRR と HIRS の相対的位置関係の計算に及ぼす自転の影響である。したがって、もし、その HIRS の視野とその AVHRR のスキャンライン (AVHRR の1本の走査線を得るのに要する時間は約0.05秒だからこの間の自転効果は無視できる) の撮像時刻が一致しておれば地球自転の影響はない。自転の効果は撮像時刻の一致していない HIRS 視野と AVHRR ラインに対して効く。今、画像ズレがない場合を考えてみると、各 HIRS の視野にとって、その視野の楕円の長軸付近を通る AVHRR ラインがその視野とほぼ同時刻に撮像されたものである。

Fig. 4 を見れば分かるように衛星の進行方向の変化は θ_A が変化したことであるから、 N_A, N_B の立場から見ると、自転速度が変わることは(3)式や(6)式の v が $|v|$ から $|v'|$ に又、 θ_A が速度方向の変化分だけ変化したことに相当する。

このように N_A, N_B の値は自転効果を考えると各緯度帯によって、又、衛星軌道の南下、北上によっても異なることになる。しかし、実際の計算において N_A, N_B の値のテーブルを緯度別、及び、南下、北上別に持つこ

とは計算機の負荷が大きくなる。そこで自転効果を見視した場合、すなわち、 θ_A と ν を一定とした場合その誤差がどのくらいになるかを調べてみる。簡単のため $\theta_{AH} = 0$ の場合を考えてみよう。Fig. 4 から、自転効果を見視したとき、 N_A, N_B に対する最大のズレは、楕円の長軸から最も遠い AVHRR ラインで、その距離は図の AA' (又は BB'……等) である。今自転効果の最も大きい赤道上で考えると、赤道上での自転速度は 0.464 km/sec. , 楕円の長軸から直線 AB までは、衛星直下で、時間にして 1.5 秒程度 (Fig. 8a, b 又は Fig. 9 を参照) だから、AA' は 0.696 km, 又、AVHRR の画素の間隔が 0.78 km だから AA' はせいぜい 1 ピクセル分の差にしかならない。なお、HIRS のスキャンラインの端の方では AA' は 1.5 秒より大きくなるが、その代り、画素間隔も大きくなるので、画素番号のズレとしては似たようなものである。

なお、上の議論では、衛星のみかけの速度の増加については言及していないが、自転速度が衛星速度に比べ桁小さい上、方向が直角に近いため、その効果は小さい。

2.3 AVHRR と HIRS の画像のズレ量 ($\Delta I, \Delta J, \theta_{AH}, \theta_A$) の決定

AVHRR の第 4 チャンネルと HIRS の第 8 チャンネルのフィルター特性は非常に似ていて、前者の方のフィルター幅が後者より広いというだけで、中心波数は 2 つとも 900 cm^{-1} くらいのいわゆる大気窓にある。Fig. 11 は

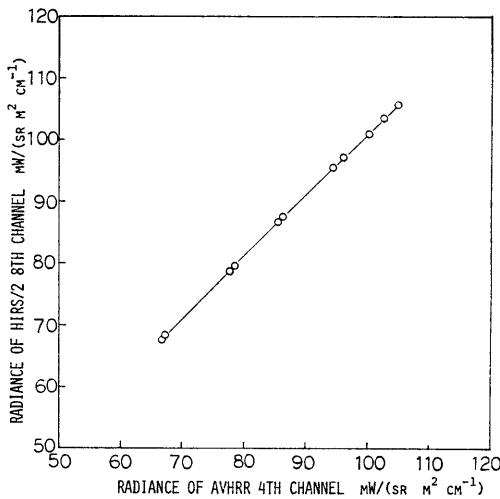


Fig. 11 The theoretical relationship between the radiances of AVHRR 4th channel and HIRS/2 8th channel.

雲のない晴天域において計算した両者の放射強度の関係をプロットしたものである。両者の相関は非常によいこ

とが分る。

さて、前節における N_A, N_B が与えられると AVHRR 第 4 チャンネルの各 HIRS 視野の中の平均輝度 \bar{R}_A を計算することができる。AVHRR の視野と視野の間には隙間があるが、含まれる AVHRR の画素の数は 300~450 個と非常に多いので、 \bar{R}_A は HIRS 第 8 チャンネルの輝度 R_H とは Fig. 11 で見たように良い相関があるはずである。しかし、もし N_A, N_B が正しく与えられていないときには、そして、とくに、視野中に雲があるときには、 \bar{R}_A は R_H と著しく異なったものになるであろう。このことは逆に言うと、 R_H の値と最も相関が良くなるように、 N_A, N_B すなわち、 $\Delta I, \Delta J, \theta_{AH}, \theta_A$ の値を決めてやれば、それが HIRS と AVHRR の画像ズレを示すことになるということである。このような考察からここでは次のような量を最小にするものとしてズレを決定することにする。すなわち

$$\sigma = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L [\bar{R}_A(l) - R_H(l)]^2 \tag{15}$$

を最小にするような $\Delta I, \Delta J, \theta_{AH}, \theta_A$ をズレ量として求めることにする。 l は HIRS の視野番号を示し、 L はマッチングに使う HIRS の視野の個数である。

まず、取り扱いの簡単化のために次のように変数を置き換える。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \Delta I \\ X_2 &= \Delta J \\ X_3 &= \theta_{AH} \\ X_4 &= \theta_A \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

\bar{R}_A は N_A, N_B の関数、すなわち、 $X_i (i=1, \dots, 4)$ の関数である。これを X のある初期推定値 X° のまわりに展開して

$$\bar{R}_A(X_1 \dots X_4; l) = \bar{R}_A^\circ(X_1^\circ, \dots, X_4^\circ; l) + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \bar{R}_A}{\partial x_i} x_i \tag{17}$$

と近似しよう。ここで x_i は

$$X_i = X_i^\circ + x_i \tag{18}$$

である。

σ が最小ということは σ の x_i による微分が 0 であるということから

$$\frac{\partial \bar{R}_A}{\partial x_m} = 2 \sum_l \left[R_A(X^\circ; l) + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \bar{R}_A}{\partial x_i} x_i - R_H(l) \right] \frac{\partial \bar{R}_A}{\partial x_m} = 0, m=1, \dots, 4 \quad (19)$$

を得る。これを整理すると。

$$y_m = \sum_l k_{mi} x_i \quad (20)$$

と書ける。ここで

$$\left. \begin{aligned} y_m &= \sum_l [R_H(l) - \bar{R}_A(X^\circ; l)] \frac{\partial \bar{R}_A(X^\circ; l)}{\partial x_m} \\ k_{mi} &= \sum_l \frac{\partial \bar{R}_A(X^\circ; l)}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{R}_A(X^\circ; l)}{\partial x_m} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

\bar{R}_A の微分は次式で与えるようにしよう。

って不安定になることがよく知られている。その理由は y_m や k_{mi} に観測誤差や計算誤差が含まれるからである。この問題を解決するには、求める解 x_i に対して適当な制限を加えることである。ここでは、求める解 X とその初期推定値（ここではゼロ）の差（すなわち x ）の自乗和を最小にするという制限を加えると Twomey (1965) より

$$x = k^t (k k^t + \gamma)^{-1} y \quad (23)$$

という解が得られる。ここで(20)式の k_{mi} や x_i , y_m は、それぞれ、 k , x , y のようにマトリックス及びベクトル表現に変えてある。 γ は実際には経験的に与える定数である。ここでは経験的に

$$\gamma = 10^{-4} \sigma \quad (24)$$

$$\frac{\partial \bar{R}_A}{\partial x_i} = [\bar{R}_A(X_1^\circ, \dots, X_i^\circ + \delta_i, \dots, X_4^\circ; l) - \bar{R}_A(X_1^\circ, \dots, X_i^\circ; l)] / \delta_i \quad (22)$$

δ_i は各 i 毎に適当に与えるものとする。

このようにして、 y_m も k_{mi} も既知の量となる。未知数 x_i は4つ、(20)式も $m=1, \dots, 4$ と4つあるから、 x_i は解ける。しかし、このようにして直接連立方程式を解いて得た解は、とくに未知数の数が増えるにしたが

で与えた。

さらにここではこのようにして求めた $X_i = X_i^\circ + x_i$ を新たな初期値として、くり返えし新しい X_i を求め、適当な収束条件を満たすまで計算をくり返えした。収束条件は以下で与えた。

$$\frac{|\sigma^{(n)} - \sigma^{(n-1)}|}{\sigma^{(n-1)}} < 10^{-3} \quad (25)$$

	ΔJ	ΔI	θ_{AH}	θ_A	n	R_H
example 1	3.0 2.959	3.0 3.186	-0.3 -0.281	-2.0 -2.296	23	$R_H = 0.9 \bar{R}_A$
example 2	-4.0 -3.790	3.0 3.145	0.2 0.232	6.0 1.519	5	"
example 3	-4.0 -4.046	3.0 2.908	0.2 0.196	6.0 0.802	39	$R_H = 1.02 \bar{R}_A$
example 4	-5.0 -4.892	-5.0 -5.537	-0.1 -0.083	3.5 3.546	9	"
example 5	3.0 3.058	-2.0 -2.630	-0.3 -0.290	-2.0 -4.216	12	"
example 6	-4.0 -4.042	3.0 2.890	0.3 0.296	5.0 5.309	25	"

Table 2 The comparison between the given (upper row) and the retrieved (lower row) values for ΔJ , ΔI , θ_{AH} and θ_A in the simulation study. The number of the iteration n is also shown.

ここで $\sigma^{(n)}$ は第 n 回目のくり返ししで得られた σ である。

3. シミュレーションによる本方式の検証

X_i , ($i=1, 4$), すなわち, ΔI , ΔJ , θ_{AH} , θ_A に適当な値を与え, \bar{R}_A を計算し, これを使って“観測値” R_H を作り, 改めてこれまで述べた方式によって, 与えられた X_i が正確に求まるかどうかを試してみた。ある I_A ライン, J_A ピクセル番目の AVHRR の輝度としては次のような値を与えた。

$$R_A(I_A, J_A) = 100[\sin(0.02\pi I_A)\sin(0.01\pi J_A) \\ \sin(0.003\pi J_A)\sin(0.01\pi J_A) + 1] \quad (26)$$

次に, 与えられた θ_{AH} , θ_A によって N_A , N_B を求め, さらに与えられた ΔI , ΔJ で N_A , N_B を補正し, 各 HIRS の視野に対する平均の \bar{R}_A を計算し, R_H を $R_H=0.9\bar{R}_A$ 又は $R_H=1.02\bar{R}_A$ によって与えた。このようにして得た HIRS の“観測値” R_H に(26)式で与えられた AVHRR の“観測画像”を一致させるわけである。初期値 X_i はすべてゼロを与えて計算した。このようにして得られた解の値, 収束までのくり返し回数等を Table 2 に示した表に見るように, 得られた結果は非常に良い精度で, 最初に与えた X_i の値を復元している。

先に述べたように地球自転を無視すれば1ピクセル分くらいの誤差は生じ得るわけで, 元々, そのくらいの精度の方法について議論しているわけであるから, Table 2 に示された結果は十分といてよいであろう。この中

で θ_A の精度があまりよくなく, θ_A に対する感度が悪いことを示している。しかし, このことは, 我々が最終的に必要としている N_A , N_B の精度が悪いことを意味しているわけではない。地球自転効果のところ述べたように, θ_A の値が少々狂ったところで N_A , N_B の値には大きな影響はないからである(だからこそ Table 2 に見るよりにこの方法が θ_A に対して感度が悪いわけである)。

4. まとめ

TIROS-N 衛星シリーズに搭載されている AVHRR 第4チャンネルと HIRS の第8チャンネルのフィルター特性が非常によく似ているという性質を利用し, 両者の画像の相対的位置関係を決定する方法を開発した。これにより AVHRR の一つ一つの画素がどの HIRS の視野に含まれるかが分り, 各視野の位置を正確に知る道が開かれた。同時に, これは HIRS の各視野の中の雲量を知ることができることを意味し, HIRS の晴天放射決定の精度が大きく改善されることになる。

References

- Aoki, T. (1980): A statistical method to retrieve the clear radiance from cloud-contaminated radiances. J. Meteor. Soc. Japan, 58, 58—66.
- Twomey, S., (1965): The application of numerical filtering to the solution of integral equations encountered in indirect sensing measurements. J. Franklin Inst., 279, 95—109.