SSDA法による画像の重ね合せ

尾上守夫，前田紀彦*，斉藤優*（東京大学生産技術研究所）

1. まえがき

画像の重ね合せは，マルチスペクトル画像のような複数画像の処理，異時刻の画像間の変化分検出，気象衛星画像における雲追跡や交通流画像における車輌追跡のような移動ベクトルの推定などにおいて必要な基本的画像処理の一つである。デイジタル画像処理においてこれは普通相関をとることによって行なわれている。2次元FFTの導入によって相関の演算時間は短縮されたとはいえ，記憶容量，演算時間がまだかなりかかる。しかも規格化して相関係数の形にしないと一致したときの最大値が判然としない場合が多い。

重ね合せのよさをみる最も簡単な方法は両画像の差をとることである。各画素毎の差の絶対値の和をここでは残差とよぶことにする。両画像が元来等しくて，重ね合せが完全ならば画面全体にわたって総計した残差は零になる。重ね合せがずれていれば勿論残差は正値をとる。実際には両画像の間に変形や雑音があるので重ね合せが完全な場合でも残差は零にはならないが，最小値になることは期待してよいであろう。したがって一方の画像をいろいろ移動させて残差が最小になる移動をもって重ね合せが達成されたと考える。この際重ね合せがずれていると，各画素について順次に加算していく際に残差が急激に増大する。この点に着目してBarnea等は残差があるしきい値を越えたら重ね合せがよくないものと判断して，加算を打切り次の移動にうつる方法を考案し，SSDA法（Sequential Similarity Detection Algorithm）と名付け，これを衛星写真の地形の重ね合せに適用して大巾に演算時間が短縮できることを示した。(1)

本論文の前半はSSDA法を気象衛星画像の雲追跡に適用した結果を述べている。SSDA法は重ね合せるべき両画像が大体等しいことを前提としているので，湧出，変形，消失などのある雲の追跡にどの程度有効であるか実用的な興味があるからである(2)

SSDA法の問題点の一つはしきい値を如何に決定するかである。これが過大だと演算時間が長くなり，過小だと重ね合せを見落すおそれがある。本論文の後半はこのしきい値の自動決定法をのべている。適用例としてはやはり雲追跡の場合をとりあげているが，それにかぎらずSSDA法の応用対象に一般的に使用できる。(3)

附録には画像ではないが，音声信号のピッチ抽出にSSDA法の考え方が有効に適用できることを指摘した。

2. SSDA法

記述の便宜のためにSSDA法の大要をこの節で紹介する。(1)

図1に示すように$L \times M$画素の窓画像をそれより大きい$L' \times M'$画素の調査範囲の中で上下左右に移動させ，次の残差が最小になるような窓画像の位置を求めて重ね合せが達成されたと見なす。

---

* 気象庁　この研究は東大生研で研修中に行ったものである。

$$E_r(i,j) = \sum_{n=1}^{r} \left| S_{ij}(l_n, m_n) - W(l_n, m_n) \right| \quad (1)$$

ここで

$$W(l, m) \qquad 1 \leqq l \leqq L, \quad 1 \leqq m \leqq M \quad (2)$$

は窓画像の画素(l, m)の値である。調査範囲内における窓画像の位置は左上隅の点の座標(i, j)で表すことにする。S_{ij}はその際窓画像におおわれる調査範囲の部分画像で、画素の座標は窓画像に一致させてある。(l_n, m_n)は窓画像の画素を任意にしかし重複しないように順次にひろっていったときの座標の系列である。残差E_rはひろった画素の数rとともに単調に増大していく。したがってあるしきい値を設けてE_rがそれを越した場合にはもはや最小値になることはないと判断して加算を打切り、次の(i, j)に移動する。

加算を打切らなければrは最高$(L \times M)$までいくので、しきい値の設定が適当であればSSDA法による演算時間の短縮はいちじるしいものがある。しきい値として最も簡単なものは図2に示すような一定しきい値Tである。図には三つの異なる窓画像の位置に対する加算曲線が記入してあるが、この中1，2はそれぞれTを切る点A，A'までで加算を打切ることができる。Tが小さいほど演算時間は短縮できるが、残差の統計の最小値より小さくするとすべての加算曲線が途中で打切られてしまう。この場合でも打切られる迄の加算回数の大小によって最小値を与える曲線がどれであるか推定できる。しかしこれは常に正しいとはかぎらない。図2でしきい値をT'としたときのように打切りの順位B''，B'と最終値の大小とは逆転することがあるからである。

図3のようにしきい値に傾斜をつければ急激に増加する加算曲線は早く打切られるので一定しきい値の場合よりも演算時間が短縮でき、しかも逆転の機会をへらすことができる。しかし絶無にすることはできない。傾斜しきい値としては重ね合せが完全なときの加算曲線の推定値に安全をみて若干余裕をもたせた値がよい。Barnea 等は重ね合せが完全なときの確率が $1/\lambda \cdot \exp(-x/\lambda)$ の形の負の指数分布をする場合を考えた。この際r画素加算したときの平均値は$r\lambda$，その時の標準偏差は$\sqrt{r}\lambda$になる。これに基いて傾斜しきい値として次の式を与えた。[1]

$$T = \lambda(r + K\sqrt{r}) \quad (3)$$

ここでKは安全率である。彼等はまた加算が打切られる確率がrによらず一定になるような傾斜しきい値を数値的に求めている。しかしその形状は(3)式で与えられるものとよく似ており、安全率を適当にえらべばほとんど同一と見なすことができる。

傾斜しきい値の欠点は加算回数が大きくなったところではむしろ一定しきい値より能率が悪くなることである。また両しきい値とも対象となる画像の性質が予め判っていないと旨く設定できないのが実用上最大の難点である。これらの問題の解決は本論文の後半にのべてある。

3．雲追跡

静止気象衛星は20～30分毎に地球表面の像を送ってくる。その中のかなり面積は雲によってしめられている。この雲の時間的変動を追跡して変位および速

度ベクトルを求めると風向、風速が推定できる。

雲追跡は初期には数枚の画像をフイルム・ループに収めてくり返し投影し、人手でベクトルの始点、終点を指定して計算機に入力している。[5] ディジタル画像処理を応用する場合は原理的には図4のような手法によっている。すなわち追跡の始点となる雲が存在する領域をえらび、それを窓画像として次の画面の上で対応のよさを判定しながら移動させ、重ね合せている。

領域の指定を自動的に行うには雲の有無に拘らず一律に経緯度で指定する方法(6)(7)、あるいは雲らしい特徴点が検出された領域のみ指定する方法(8)(9)などがあるが、実用的システムではディスプレイを見ながら人手で指定することが多いようである。(10)

対応の判定には以上の例ではいずれも相関を利用している。これは2次元FFTを利用してもなお記憶容量および演算時間が大きくなることはすでに述べた通りである。そこでSSDA法を適用することを検討した。SSDA法は画像の階調特性および雲の形状が画像間で大きく変化しないことが前提になる。階調特性の方は気象衛星の場合、画像間の時間間隔が短いのでほぼ一定とみなしてよいであろう。太陽光線の角度変化に伴う階調の変化は鏡面反射に相当する近傍以外では大したことはないし、また必要ならば補正することも可能である。雲の形状の変化は経緯度の投影による幾何学的ひずみとそれ自身の変形、湧出、消失によるものがある。前者はみている領域が狭い場合は無視できるし、また必要ならば補正可能である。後者は実際のデータについて調べてみる必要がある。

そこで実際の画像に対して2次元FFTによる相関法とSSDA法とを適用して演算時間の比較を行った。使用したデータはATS1による1971年8月15日20時32分および54分の画像の一部すなわち北太平洋の120 km^2 の範囲を写真に焼付けたものからメカニカル・スキャナーで階調64レベル、画素数128×128にディジタル化した。それを雲がみやすくなるように2値化して表示したものが図5，6である。ただし以下の演算は階調を保存したままで行っている。

対応の判定が主目的であるので領域の指定は経緯度により機械的に行った。すなわち図6の点線で示す16×16画素の窓画像49（7×7）個をえらんだ。各窓画像を中心とする32×32画素の範囲に対応する図5の部分を調査範囲にえらんだ。図5，6の黒線は奇数番目の窓画像に対する調査範囲を示している。偶数番目に対するものはそれと半駒ずれるが、見にくくなるので省略した。

表1は各窓画像に対する移動ベクトルを相関法とSSDA法とで求めた結果を比較し、その差を画素を単位として表したものである。67％は1画素以内に、86％は2画素以内に収まっている。表の中で枠で囲った部分は図5，6から明らかなように雲の全くない部分（右下）と全部雲でおおわれた部分（左上）であって、これを除けば全てが2画素以内に一致する。上記のような雲追跡に適しない領域は適当なしきい値を設けて、それをこす黒または白の画素数を数えることによって予め自動的に除くことも可能である。

移動ベクトルの真値が判らないのでこのような相対的比較にならざるを得ないが、相関法自体にも誤差があること、両法とも一画素の量子化誤差があることを考えれば両法とも移動ベクトルの精度に関しては同等であるといってよいであろう。なお人為的につくったデータのシミュレーションでは両方法とも全く同じ結果が得られた。

演算時間はFACOM　230－55を用いて相関法では一窓画像当り平均30秒かかったのに対してSSDA法では一定しきい値で2.8秒，傾斜しきい値で0.5秒と1桁以上短縮できた．

参考のために図7に示すような1次微分操作を予め原画像にほどこして縁辺を強調した上でSSDA法を適用し，それを前の相関法の結果と比較したものが表2である．これによると雲でおおわれた部分でも僅かな陰影をとらえて移動ベクトルが検出できる反面，その他の領域で誤差が大きくなるところも生じる．

Barnea等は粗い移動でまず最小値の候補となる領域をえらび，その中を細く移動するという2段階の方法を示唆している．ここでは移動のパターンとしてはHall等のパターンを採用した．[11]（ただし彼等は通常のテンプレート法を用いておりSSDA法にはふれていない．）すなわちまず8画素づつ粗く移動させて，そのときの最小値と2番目に小さな値を与える2点をえらぶ．つぎにそれらの点を中心として上下，左右に一画素づつ移動し，その中で最小値を与える点をとって今の一画素の移動をくりかえす．はじめの2点からのそれぞれのくりかえしが終った時点で小さい方をとってそこを最小値とみなす．SSDA法にこのパターンを組合した結果，一定しきい値で0.33秒という結果がえられた．この方法はここで用いたデータに対しては雲におおわれた除外領域以外では正しく動作した．しかし一般には真の最小値を見逃す可能性があるわけで，対象とする画像の性質がよく判っている場合に用いるべきであろう．

4．しきい値の自動決定

SSDA法の適用にあたって問題になるのはしきい値をいかに決定するかである．Barnea等の与えた曲線は対象とする画像の統計的性質が判らないと使えない．彼等はまたしきい値を適応的に変えることを示唆しているが，具体的な手順についてはふれていない．またWebberは最小2乗法で適合させた1次平面をひきさった後に，窓画像のsignal strength measureなる量を測定してその数倍をしきい値とする方法を提案しているが，計算はかなり煩雑である．[12]ここでは対象画像の統計的性質が判っていなくとも，自動的にしきい値を決定できる方法を報告する．

まず一定しきい値の場合について考える．最初はしきい値なしで最後（$n = L \cdot M$）まで加算させ，その時の残差を最初のしきい値とする．以後最後まで加算される毎に，その残差を新しいしきい値とする．このアルゴリズムを図8に例示する．加算曲線1，2，5は最後まで加算され，その時の残差が単調に減少する一定しきい値の系列T_0，T_1，T_2を与える．一方加算曲線3，4はしきい値T_1によって打切られている．このアルゴリズムの利点は常に真の最小値に達することが保証されている点にある．

傾斜しきい値ではこの利点は失われるが，演算時間はさらに短縮できる．前述のように最後まで加算することが何回かあれば，それによって平均値が推定できるので，Barnea等の頁の指数分布を仮定した（3）式が使用できる．すなわちある加算曲線が最後まで加算されて，そのときの残差がT_iになったら，次の傾斜しきい値T_i'を次式で与えるわけである．

$$T_i' = \frac{T_i}{L \cdot M}\left(r + K\sqrt{r}\right) \qquad (4)$$

このままではすでに述べたようにrが大きいところで能率が悪いので，$T_i' = T_i$

になった点に、図9に示すように一定しきい値 T_c に切換えるとよい。安全率Kは対象画像の性質によってきめなければならないが、ここで用いたデータに対しては2以上あれば十分であった。いうまでもなく安全率が小さい程演算時間は短縮されるが、誤動作するおそれも多くなるわけである。

以上の両アルゴリズムは予測と有効に組合せることができる。予測した点でまず加算をはじめれば、その残差は最小値でないにしても小さくなることが期待され、しきい値が一挙に引下げられるからである。

両アルゴリズムを前節の雲追跡に適用した結果を表3に示す。前節で用いた固定しきい値の値は何回かの実験によってほぼ最適値にえらんである。それと比較して自動設定の方は一定しきい値ではかなりまさり、傾斜しきい値では若干劣る。予測は移動ベクトルが隣の領域と同じになるように行ったが、いずれのアルゴリズムに対しても効果があることは明かである。傾斜しきい値で固定の場合は安全率が3以上ないと誤動作したが、自動設定の場合は2で十分であった。安全率を2にし、予測を用いれば自動設定も固定の最適の場合と同程度の演算時間になる。

5．結言

画像の重ね合せの有力な方法であるSSDA法を気象衛星画像の雲追跡に適用して、従来行われている相関法と同等の結果が、1桁以上短い演算時間で得られることを明かにした。

SSDA法を適用する際に一番問題になるしきい値を自動的に設定する方法を考案した。一定しきい値では対象画像の性質を予め知る必要はなく、しかも常に正しい結果が得られることが保証されている。傾斜しきい値ではこの保証は失われるが、演算時間はさらに短縮できる。両アルゴリズムともに予測と有効に組合せることができる。この自動設定はSSDA法の応用対象に一般的に使用できるものであるが、例として前述の雲追跡に適用して有効なことを示した。

文献

(1) D.I.Barnea and H.F.Silverman: A class of algorithm for fast digital image registration, IEEE Trans. Comput., vol. C-21, pp. 179-186, Feb. 1972.

(2) 尾上，前田：残差検定法による気象衛星画像の雲追跡，TV全大，11-7，1974．

(3) 尾上，斉藤：残差検定法による画像重ね合せにおけるしきい値の自動決定，信全大，977，1975．

(4) M.Onoe and M.Saito: Automatic threshold setting for the sequential similarity detection algorithm, IEEE Trans. Comput. (to be published)

(5) T.T.Fujita, R.Watanabe and T.Izawa: Formation and structure of equatorial anticyclones caused by large-scale cross equatorial flows determined by ATS-I photographs, J. Appl. Meteorol., vol. 8, pp. 649-667, Aug. 1969.

(6) J.A.Leese, C.S.Novak and B.B.Clark: An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation, ibid. , vol. 10, pp.118-132, Feb.1971.

(7) E.A.Smith and D.R.Phillips: Automated cloud tracking using precisely aligned digital ATS pictures, IEEE Trans. Comput., vol.C-21, pp.715-729, July, 1972.

(8) R.M.Endlich, D.E.Wolf,D.J.Hall and A.E.Brain: Use of a pattern recognition technique for determining cloud motions from sequence of satellite photographs, J. Appl. Meteorol., vol.10, pp. 105-117, Feb. 1971.

(9) 山本，他：気象衛星画像からの風ベクトル演算アルゴリズム，情報処理，vol.15, pp.10-17, Jan. 1974.

(10) E.Smith and D.Phillips: McIDAS cloud tracking system, Univ. of Wisconsin, Aug. 1973.

(11) D.J.Hall,R.M.Endlich,D.E.Wolf and A.E.Brain: Objective methods for registering landmarks and determining cloud motions from satellite data, IEEE Trans. Comput., vol.C-21,pp.768-776, July 1972.

(12) W.F.Webber: Techniques for image registration, Proc. Machine Processing of Remotely Sensed Data, IEEE Catalog 73, CHO 834-2GE, pp. 1B-1-1B-7, 1973.

附録　音声のピッチ抽出へのSSDA法の応用

音声認識において母音のピッチ抽出は最も基本的な操作の一つであり，実時間演算が可能な手法がのぞまれている．最近Moorer(A1)およびRoss等(A2)は次のようなアルゴリズムを提案している．

k個のサンプルからなる音声のセグメントをX_iと，それよりj点だけ遅延したセグメントX_{i-j}との次のY_jを定義する

$$Y_j = \sum_{i=1}^{k} | X_i - X_{i-j} | \qquad (A1)$$

jをいろいろにかえてY_jが最小になるときの値をピッチとみなす．

SSDA法的な考え方がこの場合に適用できることは明かであろう．すなわち適当なしきい値を考えて，Y_jがそれを越したならば加算を打切って次のjの値にうつればよい．この方法の今一つの利点はY_jの最大値がおさえられるためにRoss等のいっているような整数演算におけるオーバーフローの対策が不要になることである：

附録文献

(A1) J.A.Moorer: The optimum comb method of pitch period analysis of continuous digitized speech, IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. ASSP-22, pp.330-338, Oct. 1974.

(A2) M.J.Ross, H.L.Shaffer,A.Cohen,R.Freudbery and H.J.Manley: Average magnitude difference function pitch extractor, ibid. pp.353-362, Oct. 1974.

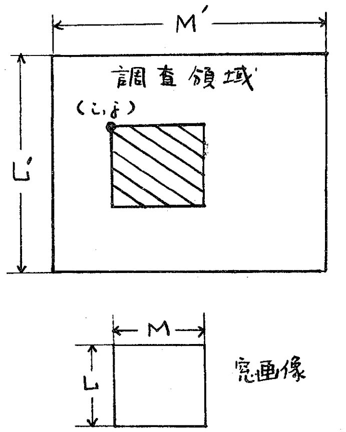

図1　窓画像と調査領域

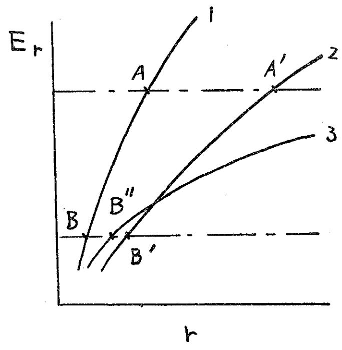

図2　一定しきい値

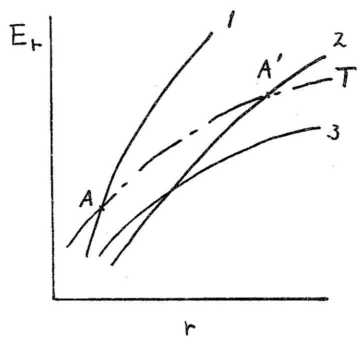

図3　傾斜しきい値

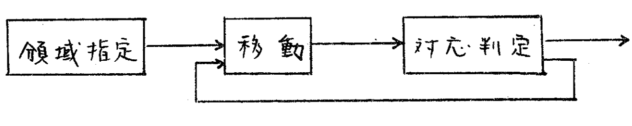

図4　雲追跡の手法

図5　ATS画像（1971.8.15.20.32）

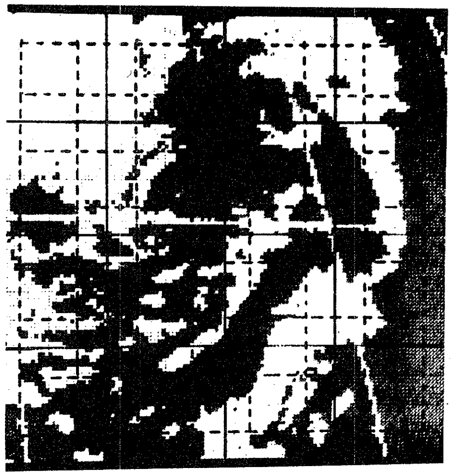

図6　ATS画像（1971.8.15.20.54）

A	B	C
D	E	F
G	H	I

$$E' = |A + B + C - G - H - I| + |A + D + G - C - F - I|$$

図7　1次微分操作

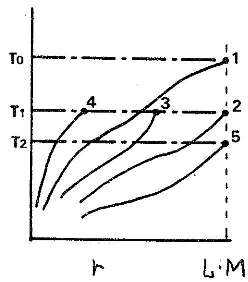

図8　一定しきい値の自動設定

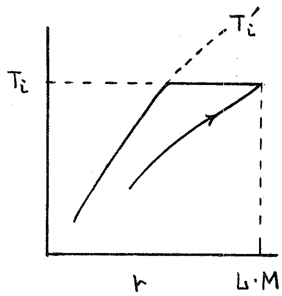

図9　傾斜しきい値の自動設定

x	x	2	2	0	2	2
x	o	2	2	0	0	1
2	x	1	x	1	0	0
0	0	2	0	0	0	0
1	1	0	0	0	2	1
1	0	0	1	0	0	x
0	0	1	0	0	0	x

表1　相関法とSSDA法との比較

（×は3以上）

0	2	0	2	1	0	2
1	x	1	x	0	x	0
0	0	0	x	0	0	0
x	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	2	x	0
0	0	1	1	0	0	x
0	0	0	1	0	0	x

表2　相関法と1次微分合のSSDA法との比較

アルゴリズム	しきい値		
	一定	傾斜	
		K = 2	K = 3
自動	2.30	0.65	0.83
（予測付）	1.94	0.57	0.73
固定	2.83	——	0.51

表3　演算時間の比較

（単位；秒）