



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	最近のレーダ研究の一例 : オプティカルフローによるレーダ動画からの速度ベクトル場の算出
Author(s)	大井, 正行
Citation	北海道大学電子科学研究所技術部技術研究報告集, 3, 61-66
Issue Date	1996-03-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1463
Type	departmental bulletin paper
File Information	KJ00000697045.pdf



最近のレーダ研究の一例

—オプティカルフローによるレーダ動画からの速度ベクトル場の算出—

1. まえがき

速度ベクトル場検出法は主に、計測、コンピュータビジョン、動画像圧縮そして気象学等の分野で適用されている。このうち気象学では、気象衛星によって得られた雲の動画像から、雲の運動速度を求めることを目的とした例がある。

筆者はこれまで、時間の隔てた2枚のレーダ画像を利用して、マッチング法により雲や流氷の速度ベクトルを求めてきた。しかしながら、マッチング法は画像の濃淡分布に対応付けが可能なだけの特徴が無ければ、おうおうにして部分的に偽対応(ミスマッチ)の箇所が生じ、満足した結果は得られなかった。このため他の方法を模索していたところである。

山口大学工学部電気・電子学科の三池秀敏研究グループは、代表的オプティカルフロー検出法として知られるグラディエント法を独自の思考で研究を進めている。筆者はこの研究グループと共同でグラディエント法を適用してレーダ動画像(エコー強度)から雲の速度ベクトル場を求めた。

本報告では、グラディエント法の基本式の導出、拘束条件、計算機上での実現について説明し、最後にレーダの動画像に適用して、雲の速度ベクトル場を算出したので、その結果について述べる。

2. 気象レーダデータの解析における雲の速度ベクトル場算出の意義

気象レーダ観測によるデータ解析の際に、もしもエコー強度画像(PPI:Plan Position Indication)から雲の速度ベクトル場が得られるならば、これの利用価値は大きい。例えば、気象観測の際に1台のドップラーレーダでは単に降水粒子の動径方向成分を測定できるだけであり、原理的にはドップラー観測によって風速ベクトルは得ることができない。このため、一般的には適当な仮定(観測範囲の走査円内で水平風速および降水粒子の平均落下速度が一定)を置き、また適当なアンテナ走査を行うことによって平均の水平速度成分を算出している。したがって、もしこの仮定の際に、画像空間の比較的狭い領域ごとの速度ベクトルが得られているならば、ドップラー観測によって得られたデータの解析精度は著しく向上する。またドップラーの機能を持たない一般のレーダにおいても、観測データの利用価値は飛躍的に増大

するものと思われる。

3. レーダ観測による PPI(降雨エコー)動画像データの収集

PPI 動画像データ収集のために行ったレーダ観測は、前線を伴った低気圧の通過時で降雨の場合であった。観測期間は 1995年7月31日 08:00から約1時間、場所は石狩川河口付近で行った。レーダの動画像データを得る目的から、レーダ空中線の観測モードおよび仰角はそれぞれ PPI(15rpm) および 1.0度、また観測レンジは半径 64km、1枚の画像データ収集の時間間隔は 1分とした。

標本化され連続した動画像データは、1枚毎に極座標から直交座標 $129 \times 129 \text{pixel} (1 \times 1 \text{pixel} = 1 \text{km}^2)$ に変換して、最終データとした。

4. グラディエント法によるオプティカルフロー

グラディエント法は、動画像の濃淡分布の時間・空間に関する偏微分係数と速度ベクトルを結びつける式を導き、その式に基づいて速度ベクトル場を求める方法である。

ここで述べるグラディエント法は、従来からの方法のように濃淡パターンの対応付けの考え方からではなく時空間相関法の考えに従い、画像平面上に固定された観測領域での濃淡値の総和の時間変化に注目し、これまでのグラディエント法で用いられた基本式よりも広範な目的に対応可能な、速度ベクトル場検出の基本となる式を提案したものである。さらにこの基本式に速度ベクトル場の定常性と濃淡値の生成・消滅量の時間軸方向に沿った仮定が付け加えられている。これ等、基本式の導出、制約条件および計算機での実現を本文末の Appendix に記す。

5. 算出結果と考察

レーダの PPI 動画像に適用したグラディエント法は、1 pixel/Frame 以下の比較的遅い現象に有効であると云われている。利用した PPI 動画像データは 1分に1枚、空間解像度は 129×129 画素、フレーム数は 30枚であり、濃度値は 256段階に量子化されている。また一般的に、生のレーダ・ビデオ信号は離散的な要素が大きく、これを瞬時値の状態で量子化したままのデータでは利用できない。そこで量子化した直後に距離および水

平方位毎に各々任意の距離間隔および方位角で積分して平均化している。

利用した動画像の中から、最初の1枚目と最後の30枚目を第1図(A),(B)に示した。この両画像による30分間の変化を局所領域で見た場合、濃淡値の生成・消滅の変化は見出せるが、移動については殆んど見出すことが出来ない。このことは実際に観測の際にも、PPI画面を短時間で局所的に見ると、雲エコーの移動はその形を保って移動していると言うよりは、むしろ生成・消滅を繰り返しながら移動しているように見えるのと同じである。しかし、PPI画面を比較的広い領域で時間をおいて見ると、明らかに西から東に向けて移動していることが判る。いわゆるシステム・リラティブな動きである。故に、現実には1図(A),(B)から人間の目で速度ベクトルを認識するのは極めて困難である。

第2図は、第1図(A)~(B)の動画像データを濃淡値の生成・消滅を考慮したグラディエント法による降雨雲の移動ベクトル場の算出結果である。図は30分間、定常状態が続いている(移動しない)と言う仮定の下での1分間の降雨雲の動きを示している。

観測時の気象状況から見て、速度、方向についてもほぼ妥当な動きを示していることが判る。しかし、この図の結果が真の対応を示して居るか否かは現段階では結論すべきではなく、今後の定量的

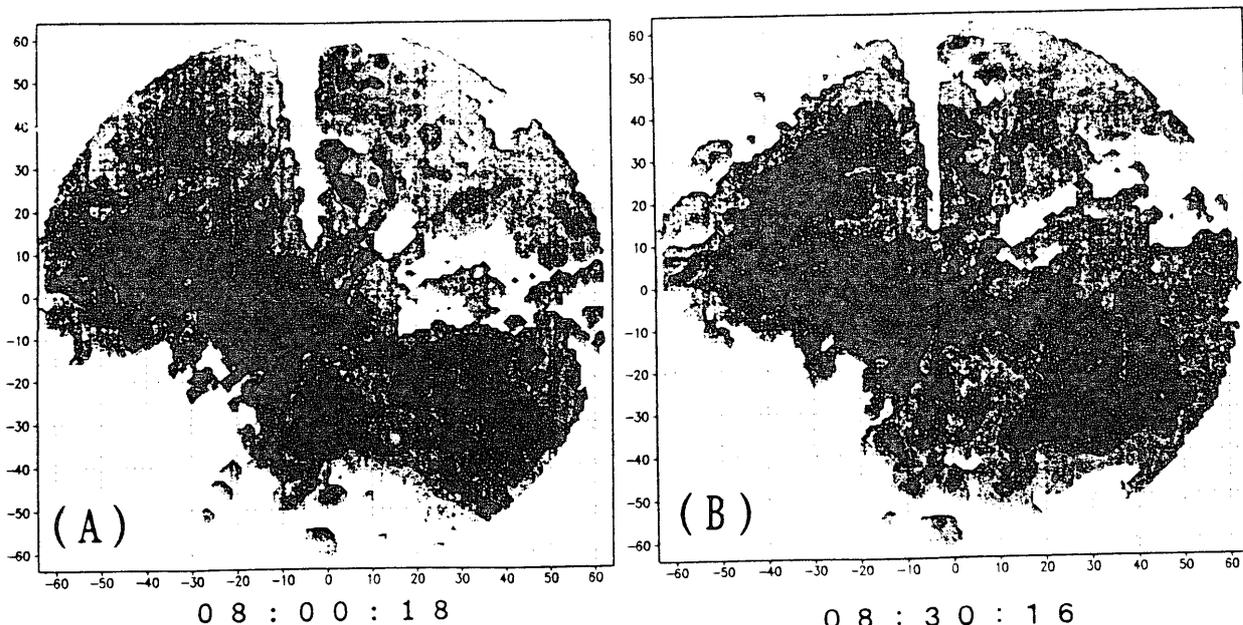
な検証を必要とする。

6. まとめ

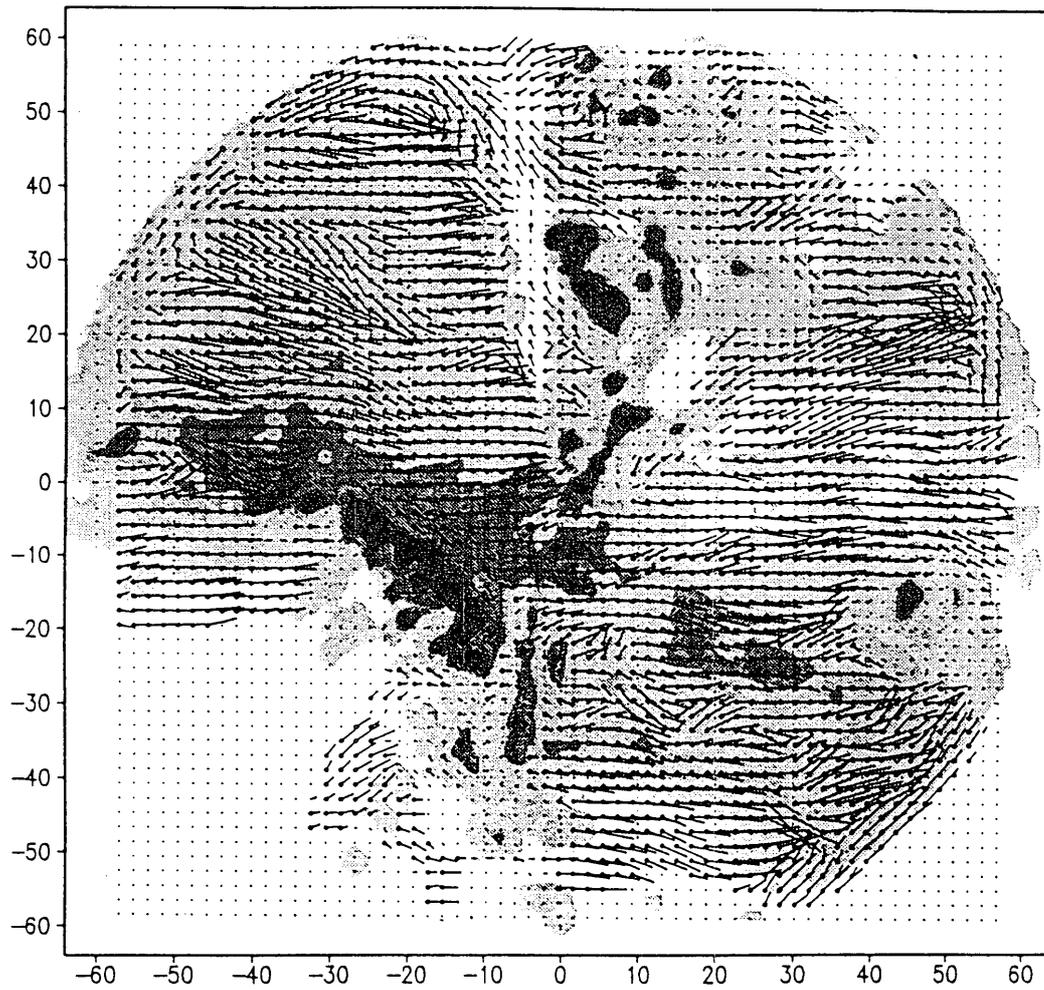
レーダを短時間観測して降雨雲の動画像データを得て、これを代表的オブティカルフロー検出法として知られるグラディエント法を適用して雲の速度ベクトル場を求めた。このグラディエント法は、山口大学工学部三池研究グループが提案したものである。検出結果は、速度および方向についてもほぼ妥当な結果を得た。故に本検出法はレーダ動画像にも適用できるものと思われる。今後は、2台のドップラーレーダの観測結果による定量的な検証と流氷レーダへも適用して行きたい。

参考文献

- 小平信彦,立平良三:気象ドップラーレーダ. 気象研究ノート,第112号(1972),日本気象協会, 375-417
- 三池秀敏,古賀和利:パソコンによる動画像処理 森北出版.1993年,133-169
- 野村厚志,三池秀敏,古賀和利:時間変動する照明下での動画像から速度ベクトル場の検出. 電子情報通信学会論文誌,D-11 Vol.J76-D-11 No.9,1995年9月,1977-1985
- 大井正行:オブティカルフローによるレーダ動画像の速度ベクトル場の算出. First inter Media Symposium Sapporo'95,1995年10月,29-33



第1図. 1995年7月31日、石狩湾における降雨雲の1枚目と30枚目のPPI画像. 距離のスケールは km.



第2図. 1分間隔で観測した30枚のレーダPPI動画像から求めたオプティカルフローの検出結果.
30分間、定常状態が続いていると仮定して、この時の1分間の降雨雲の動き.

Appendix

一般化した勾配法によるイメージフローの検出

グラディエント法では、2枚の動画像間の対応付けの考えから、濃淡値の時間勾配、空間勾配と速度ベクトルとの関係を導く。通常、運動物体の画像関数値 $f(x, y, t)$ が変化しないものとして (*Rigid*)、異なる時刻、異なる場所での値 $f(x+dx, y+dy, t+dt)$ と一致することから、次式が成立する。

$$f(x, y, t) = f(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (1)$$

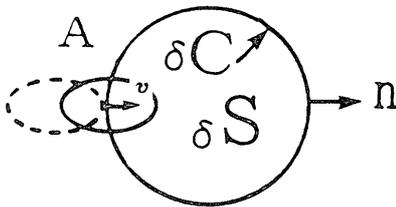
この式の右辺をテーラ展開し、2次以上の項を無視することにより、

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{dy}{dt} \cdot \frac{\partial f}{\partial y} \quad (2)$$

となり、グラディエント法の基本式が得られる。 $dx/dt, dy/dt$ は決定すべき未知数である。このままでは、未知数が2つで条件式が1つしかなく、解を求めることは不可能である。そこで、独立な別の拘束条件式が導入される。通常、①速度場が空間的に滑らかに変化する(連続性)、②速度場が局所空間領域で一定である(一様性)、③速度場が局所時間領域で一定である(定常性)、などの仮定(拘束条件)を導入してオプティカルフローが決定される。

一方、グラディエント法を拡張する手法が提案されている。すなわち、オプティカルフローを一種の流体と見なし、流体生成消滅を含むより一般的な保存則を適用することで、オプティカルフローの概念を拡張し、一般化イメージフローの概念とその基本式を提案している。

基本式



付図1. 濃淡パターンAが閉領域 δS へ流入することにより、 δS 内の濃淡値の総和に時間的な変化が生じる。

付図1. に示すように物体の濃淡パターンAがある速度ベクトルで運動する。画像平面上に、閉領域 δS を考えれば、ある瞬間での閉領域における濃淡値の総和の時間変化は、閉領域内への(閉領域外への)濃淡パターンAの流入(流失)によるものと考えられる。これを定式化すれば、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} f ds = - \int_{\delta C} f v \cdot n dc \quad (3)$$

となる。ただし、 $f(x, y, t)$ は動画像の時間・空間に関する濃淡値分布、 δC は閉領域 δS を囲む閉曲線、 $v(x, y, t)$ は濃淡パターンの速度ベクトル、 n は閉曲線 δC に対して外向きの法線ベクトルを表す。しかし、濃淡値の変動までを考えた場合には式(3)では不十分であり、以下の式を提案している。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} f ds = - \int_{\delta C} f v \cdot n dc + \int_{\delta S} \phi ds \quad (4)$$

(v : 定ベクトル in δS)

すなわち式(3)に対して、単位時間当たりの濃淡値の生成量分布 ϕ をも考慮した式となっている。濃淡パターン自身の濃度値の変化に対しては、その濃度値の増加・減少量が ϕ と考えられる。

式(4)の右辺1項をガウスの定理によって線積分から面積分へ変換すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} f ds = - \int_{\delta S} \text{div}(f v) ds + \int_{\delta S} \phi ds \quad (5)$$

式(5)の中で全ての項は積分領域が等しくかつ任意であるので、非積分項のみによって表現すれば次式を得る。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\text{div}(f v) + \phi \quad (6)$$

この式(6)の右辺1項を分解すると、

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -f \text{div}(v) - v \cdot \text{grad}(f) + \phi \quad (7)$$

が得られる。式(4)および、その微分形式としての式(6)あるいは式(7)が濃淡値の生成・消滅をも考慮した速度ベクトル場検出法の基本となる拘束条件式である。本論文では、 $\text{div}(v) = 0$ の仮定は残すものの、濃淡強度の変動量に関する ϕ の項を考慮した(4)式の積分形式および(8)式の微分形式に基ずく速度ベクトル場検出法を提案している。

$$\frac{\partial}{\partial t} = -v \cdot \text{grad}(f) + \phi \quad (8)$$

制約条件

速度ベクトル検出の基本となる式(4)、(8)において、 $f(x, y, t)$ は既知の動画データである。速度ベクトルの2成分 $\mathbf{v} = (u, v)$ と単位時間当りの濃淡値の生成・消滅量を表す ϕ は未知数であり、これらを各画素・各時刻で独立に求めることが目的である。しかしながら、各画素・各時刻において基本式は式(4)あるいは式(7)のように一つであり、更に \mathbf{v} と ϕ に関する制約条件式が必要となる。

速度ベクトル場に関して以下の仮定(N=0の場合)を提案している。

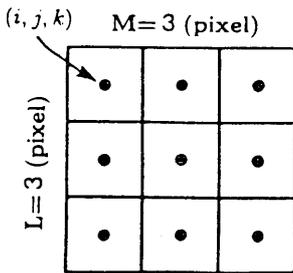
$$\frac{\partial^N \mathbf{v}}{\partial t^N} = C \quad \text{:定ベクトル(Nはゼロ以上の整数)} \quad (9)$$

基本式が導出される際には、画像平面上で観測領域が固定されているので、空間座標を固定し、時間方向のみについて仮定した式(9)は自然である。更に定常な速度ベクトル場をもつ動画にたいしては2、3枚の画像ではなく多数枚の画像を用いることが容易であり、速度ベクトル場の高精度検出が期待される。これらの理由から速度ベクトルに関する仮定として式(9)(N=0とする)を用いる。更に単位時間当りの濃淡値の生成量 ϕ についても、時間方向のみについて制約条件を付け加える。

$$\frac{\partial^N \phi}{\partial t^N} = C \quad \text{:定数(Nはゼロ以上の整数)} \quad (10)$$

この仮定は、ある画素における時間方向の濃淡値の生成量分布が、時間に関するN次関数で表現できることを示している。

計算機上での実現



付図2. 式(11)の濃淡値の積分領域

積分形式で記述された式(4)をもとに具体的な速度ベクトル検出場を提案する。はじめに積分領域を決定する。一般には付図2. に示すように $L \times M$ 画素の積分領域を考える。時刻 k における、その領域の左上隅(最も原点に近い)画素の座標を (i, j, k) とする。式(4)の左辺の濃淡値の積分領

域にわたる総和の時間変化は、次式により近似する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta s} f ds \approx \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \{f(i+l, j+m, k+1) - f(i+l, j+m, k-1)\} / 2 \quad (11)$$

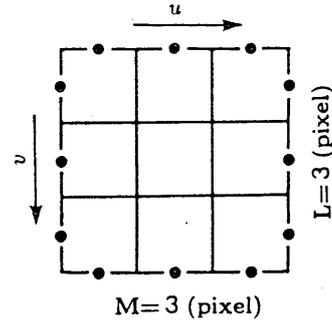
式(4)の右辺1項の線積分を積分領域に適用すれば次式となる。

$$\int_{\delta c} f \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dc \approx u \sum_{m=0}^{M-1} \{f(i+L-0.5, j+m, k) - f(i-0.5, j+m, k)\} + v \sum_{l=0}^{L-1} \{f(i+L, j+M-0.5, k) - f(i+1, j-0.5, k)\} \quad (12)$$

但し閉曲線上の濃淡値は、

$$f(i-0.5, j, k) = f(i, j, k) + f(i-1, j, k) / 2$$

として求める。式(12)(13)の様子を付図3. に示す。



付図3. 式(12)の濃淡値の線積分領域

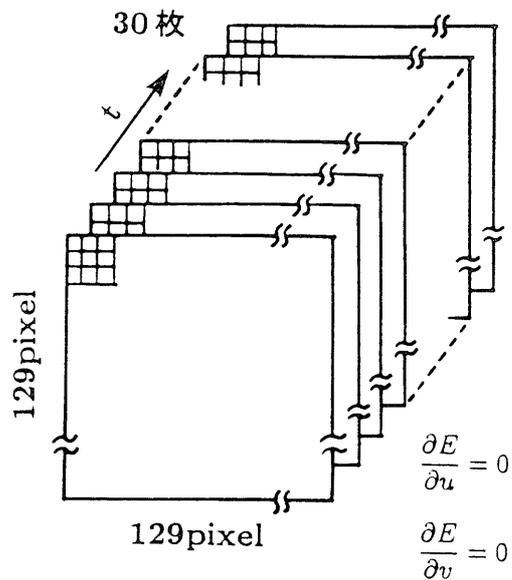
式(4)の右辺2項目は、式(10)の仮定により、積分された $\int_{\delta s} \phi ds$ も時間のN次関数で表すことができる。すなわち、

$$\int_{\delta s} \phi ds = \sum_{n=0}^N \eta_n k^n \quad (14)$$

式(4)をもとに、式(11)を $F_t(k)$ 、式(12)の u, v それぞれの係数項を $F_x(k), F_y(k)$ とおき、次の評価関数(エラー関数)を定義する。

$$E = \sum_{k=0}^{K-1} \{F_t(k) + u F_x(k) + v F_y(k) - \sum_{n=0}^N \eta_n k^n\}^2 \quad (15)$$

付図4. は(15)式の考え方を図化したものである。
 上式には $\{2+(N+1)\}$ 個の未知数が含まれる。
 $\{2+(N+1)\}$ 枚以上のK枚の動画像において式
 (9)、(10)の仮定が満足されれば、最小二乗法を
 用いて速度ベクトルと濃淡値の生成量を決定する
 ことができる。



付図4. 式(15)の考え方を図化したもの。
 $t=30$ 分間中 u, v は一定と云う仮定の下で、
 動画像枚数($k=30$)個の関数全体をエラー
 関数 E が最小となるような u, v を求める。