

光流在氣象雷達圖像處理的應用

鄧財文

中央氣象局墾丁氣象雷達站¹

摘要

光流是一種標準的電腦視覺方法之一，可用以計算運動向量(或位移向量)，此模式類似氣象學上的平流方程。本文討論氣象雷達圖像之運動向量的擷取，目標在於嘗試提供一種快速運算而可靠之降水即時預報模式，並希望能以此運動向量進行0-3小時的降水即時預報。

關鍵字：光流、最小方差法

一、前言

在氣象雷達觀測中，可觀測到兩類主要的運動型態。第一為可由都卜勒雷達網觀測的平均降水粒子運動，第二為出現在一系列雷達圖像中降水區的運動，而當進行即時降水預報時，後者比較重要。此兩類運動型態皆受風的影響，但各自有各自的運動方式。對於前者而言，它們的運動近似於平均風，因此可應用都卜勒雷達測量(徑向)風速，尤其當測量小水滴的水平運動時，此假設幾近符合實際狀況。另一方面，在降水區的運動中，風的影響通常受大尺度流場的控制，因此運動可區分為各種不同的尺度與現象，例如，鋒面雨區、對流區，而獨立對流胞可能有其自身的運動方式。

在作業雷達中，降水即時預報是最重要的一環，在預報未來數小時的降水中，通常將雷達資料直接外插，而其先決條件為必須有效率高的運動場擷取(與外插)的演算法。目前外插預報方法大略分為三大類：第一類，相關法技術(Hilst & Russo, 1960; Bellon & Austin, 1978)。第二類，追蹤重心(Barclay & Wilk, 1970; Johnson et al., 1998)。第三類，使用NWP風場平流技術(Tatehira et al., 1976; Parsons and Hobbs, 1983)。另外一種分析法為TREC(Tracking Radar Echoes by Correlation)(Rinehart and Garvey, 1978; Tuttle and Foote, 1990)為將連續雨區分割為數個區塊，利用相關法決定每個區塊的最佳平流速度，此法未考慮雨區的變形。COTREC(Tracking Radar Echoes by Correlation corrected by Continuity)(Li et al., 1995)針對TREC的問題加以改良，即最小化相鄰區塊速度之輻散現象(最小化 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$)，此條件使降水區守恆並消去因雜波與地面遮蔽所造成的假平流速度。

本文所提出的新外插方法類似於TREC方法，但每個區塊的速度不由相關法來計算，而是直接利用光流場制約條件(Optical Flow Constraint, OFC)，以

不同於COTREC的平滑制約條件消去鄰近區塊的輻散現象，因為OFC能夠處理降水的消長而優於相關法

二、光流場原理(Singh, 1991)

光流的概念是J.J. Gibson於1950年首先提出，當人的眼睛觀察運動物體時，物體的景像在人的視網膜上形成一系列連續變化圖像，這一系列連續變化的訊息不斷「流過」視網膜(即圖像平面)，好像一種光的「流」，故稱之為光流，或者說物體帶光學特徵部位的移動投影到視網膜上就形成光流。光流表達了圖像的變化，由於它包含了目標運動的訊息，因此可被觀察者用來決定目標的運動情況。從光流的定義可以看出，光流有三個要素：一是運動(速度場)，這是形成光流場的必要條件；二是帶光學特性的部位(例如有灰度的像素點)，它能攜帶訊息；三是成像投影(從場景到圖像平面)，因而能被觀察到。運動產生光流，因而有光流必定存在著運動，然而並非有運動必定有光流，雖然光流場並不等價於運動場，但在絕大多數的情況下，光流與運動場是對應的。所以在大多數情況下我們可根據光流與運動場的對應關係由圖像變化來估計相對運動。

三、光流場的計算(Lucas and Kanade, 1981; Barron and Thacker, 2005)

光流場的計算最初是由美國學者Horn and Schunck(1981)提出的，他們在相鄰圖像之間的時間間隔很小($<nx10ms$)，且其圖像中灰度值變化也很小的前提下，推導出灰度圖像光流場計算的基本方程式。

在 t 時刻，圖像上一點 (x,y) 處的灰度值為 $I(x,y,t)$ 。在 $t+\Delta t$ 時，這一點移動到新位置 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ ，灰度

值記為 $I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ ，假設圖像灰度值守恆，則

$$I(x, y, t) = I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) \quad (1)$$

將上式右項以泰勒公式展開，省略二次以上的項，整理得

$$\frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\text{或 } I_x + I_y + I_t = 0$$

此即為光流場計算的基本方程式，又稱為光流約束方程式(OFE)，表示在圖像序列中特徵部位僅改變形狀但不改變其大小與強度，在此 (u, v) 為圖像中各點的速度且 $I(x, y)$ 為降雨強度值。方程式(1)一個有兩個未知數的方程式，真正的速度是在直線上的某一點上。法線速度(影像速度垂直於強度的分量)可由下式表示

$$\vec{v}_n = \frac{-I_t(I_x, I_y)^T}{\|(I_x, I_y)\|^2} = (\vec{v} \cdot \vec{n})\hat{n}$$

在此 \hat{n} 為單位法向量。

由於必須估計三維運動場，故必須將二維光流場推廣至三維光流場。只要將二維擴張為三維，即可得到三維OFE如下式

$$I_x u + I_y v + I_z w + I_t = 0 \quad (3)$$

在此三維速度之分量為 (u, v, w) 且 I_x, I_y, I_z, I_t 分別為 X, Y, Z 與 t 方向的強度導數，上式代表一個三維平面，且真正的三維速度位於該平面上的某一點上。三維光流場已應用於計算CT(電腦斷層攝影)(Gutierrez et al., 1996)、MRI(核磁共振影像)(Huang et al., 1995)與PET(正子攝影)(Klein and Huesman, 1997)的三維光流場。

同樣亦可得到三維法線速度如下式

$$\vec{v}_n = \frac{-I_t(I_x, I_y, I_z)}{\|(I_x, I_y, I_z)\|^2} \quad (4)$$

上述二維與三維OFE都在剛性運動(不變形)與純平流下方成立，亦即徑向速度並無強度分量。儘管都卜勒資料具有高度的變形特徵，不過因為徑向速度資料的瞬間取樣特性，故上述假設仍然成立。

三、最小方差法計算三維速度

欲利用徑向速度資料計算三維全速度

$\vec{V} = (U, V, W)$ ，在此使用 \vec{V} 與 \vec{r} 的內積，亦即

$$\vec{V} \cdot \vec{r} = V_r \text{ 而得到下式}$$

$$U r_x + V r_y + W r_z = V_r \quad (5)$$

在此上式為一個有三個未知數的方程式，實際上，此為三維光流之三維運動約束方程式(OFE)，亦即類似於方程式(4)，只是將徑向速度取代法線速度而已。

要解某點的三維速度 \vec{V} ，先在某點周圍選取一個 $7 \times 7 \times 7$ 的小區塊，在做最小方差估計前，先將資料平滑化，然後以該區塊平滑後的平均徑向速度取代原有的值。因為該區塊遠小於整個掃描體積，故可將該區塊的所有點視為以全速度 \vec{V} 移動。因不同點的徑向速度滿足不同的運動約束平面，而其相交點即是所求的三維全速度 $\vec{V} = (U, V, W)$ 。

對於 $N = n \times n \times n$ 區塊，可獲得一個 $N \times 3$ 線性方程組，可寫成 $A_{N \times 3} \vec{V} = B_{N \times 1}$

在此 A 在第 i 列的項目為 $r_x i, r_y i, r_z i$ ，而 B 在第 i 的項目為 V_r ， N 為區塊中資料點的數目。

以最小方差法解 \vec{V} 如下：

$$A_{N \times 3}^T A_{N \times 3} \vec{V} = A_{N \times 3}^T B_{N \times 1}$$

在此 $A^T A$ 為一 3×3 對稱矩陣(所有特徵值皆為實數且為正值)。當 $A^T A$ 的反矩陣存在時，解如下式：

$$\vec{V} = [A^T A]^{-1} A^T B$$

四、討論與結論

在本文中，理論上從圖像序列探討擷取三維運動向的演算法，由此法可得到三維速度場，不過有幾點尚需注意：

1. 由於圖像點可能存在之不連續性，造成所計算之位移超出區塊範圍，所以在做最小方差估計以前，必須將資料點加以平滑化，故有必要加入一個高斯窗區函數 W ，這使速度解 \vec{V} 變為：

$$\vec{V} = [A^T W A]^{-1} A^T W B$$

2. 當風暴為非剛體可變形的物體時，三維OFE不再成立，在此情形下，上述演算法必須改良(H. Sakaino, 2002)。

3. 當風場發生折錯時，也必須預先處理。

參考文獻

1. Barclay, P.A., and K. E. Wilk, 1970: Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations, ESSA Tech. Mem, ERLTM-NSSL 46, 63 pp.
2. Barron, J.L. and N.A. Thacker, 2005 : Tutorial: Computing 2D and 3D Optical flow. Tina Memo No. 2004-012/internal, University of Manchester.
3. Bellon, A. and Austin, G. L.: The evaluation of two years of real time operation of a short term precipitation forecasting procedure (SHARP). *J. Appl. Meteor.*, 17, 1778–1787, 1978.
4. Gutierrez, M.A., M.S. Rebelo, S.S. Furuie, L. Moura, C.M.C. Moro, C.P. Meio, and J.C. Meneghetti, 1996 : A polar map representation of myocardial kinetic energy from gated SPECT. 18th Annual International Conference of the IEEE, page 660-661.
5. Hilst, G.R., and J.A. Russo, Jr., 1960: An objective extrapolation technique for semi-conservative fields with an application to radar patterns. Tech. Memo. No. 3, Travelers Weather Research Centre, Hartford, CT.
6. Horn, B.K.P. and B.G. Schunck, 1981 : Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17, 185-204.
7. H. Sakaino, 2002 : A unified prediction method for heterogeneous weather radar patterns. Proceedings of the sixth IEEE workshop on applications of computer vision (WACV'02).
8. Huang, S.-H., S.-T. Wang, and J.-H. Chen., 1995 : 3D motion analysis of MR imaging using optical flow method. 17th Annual International Conference of the IEEE, page 463-464.
9. Johnson, J.T., P.L. MacKeen, A. Witt, E.D. Mitchell, G.J. Stumpf, M.D. Eilts, K.W. Thomas, 1998: The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm. *Wea. Forecasting*, 13, 263-276.
10. Klein, G.J. and R.H. Huesman, 1997 : A 3D optical flow approach to addition of deformable PET volume. Non-rigid and Articulated Motion Workshop. Proceedings of IEEE, page 136-143.
11. Li, L., W. Schmid, J. Joss, (1995), "Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography", *Journal of Applied Meteorology*, 34, 1286-1300.
12. Lucas, B.D. and T. Kanade, 1981 : An iterative image-registration technique with an application to stereo vision. In *Image Understanding Workshop*, page 121-130. DARPA.
13. Parsons, D. B., and P. V. Hobbs, 1983: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XI: Comparisons between observational and theoretical aspects of rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 40, 2377–2397.
14. Rinehart, R.E., and E.T. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 273, 287-289.
15. Singh, A., 1991 : *Optical Flow Computation*, IEEE Computer Society Press.
16. Tatehira, R., H. Sato, Y. Makino, (1976) "Short-term forecasting of digitised echo pattern", *Kisho-cho Kenkyu Jiho*, 28, 61-70 .
17. Tuttle, J.D. and G.B. Foote, 1990: Determination of the Boundary Layer Airflow from a Single Doppler Radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 7, 218-232.