

利用云导风矢量的台风中心自动定位*

刘正光 喻远飞 吴 冰

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津, 300072)

刘还珠

(国家气象中心, 北京, 100081)

摘 要

文中提出了一种利用云导风矢量图进行台风中心自动定位的方法。云导风矢量通过对具有一定时间间隔的两幅相关卫星云图进行模板匹配而得出。模板匹配就是根据已知模式的图像在一幅陌生图像中寻找对应于该模式的子图像的过程。根据气象知识, 台风云系运动的特点是中心平移量大而自旋很弱, 且台风中心与台风云系整体的移动方向一致, 因此求出云导风矢量图中与台风整体移动矢量大小和方向一致的矢量集合的最密集区, 经过数学形态学处理后便得到台风中心。

关键词: 云导风, 模板匹配, 数学形态学, 台风中心定位。

1 引 言

气象领域中台风中心定位的两种基本方法是基于单幅云图的定位和基于多幅相关云图的定位。如传统的有眼和无眼台风定位方法都是基于单幅云图, 围绕着静态云图中台风的 3 大特征(密闭云墙, 螺旋云带和眼区) 来实现的。然而, 单幅云图受图像信噪比、分辨率和时间、频段的局限, 信息量较小, 对于人工定位来说, 由于可利用预报员的经验弥补, 定位准确性通常能得到保证; 但在台风的自动识别和定位中, 由于机器难以自动识别螺旋云带^[1], 给台风的自动识别和定位带来困难, 定位准确性往往不高。而台风的自动定位在台风的预报中有着不可替代的作用, 因此, 如何更好地进行台风自动定位是很重要的课题。多幅相关云图反映了一定时间内云系运动的变化情况, 包含的信息量远大于单幅云图, 因此它在台风的自动定位中能发挥更大的作用。云导风就是基于多幅相关云图, 从云系反演出风场变化的矢量图。它是一种基于灰度的运动检测方法, 能反映出台风云系微元的运动趋势。目前国内云导风资料的使用主要集中在数值预报的研究中, 使用云导风进行台风中心自动定位还未见报道。本文旨在

通过分析云导风矢量与云系运动变化的关系来确定台风中心。

2 云图的模板匹配

云的运动是一种半流体运动, 特点复杂^[2], 因此云图的匹配是非精确匹配问题, 诸如二维对数搜索算法、三步法和金字塔搜索算法都不宜使用。文中使用 3 种匹配方法, 共同点是允许误差存在, 通过设置阈值来检测匹配是否成功。

2.1 绝对值法^[3]

$$\text{定义} \quad D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{i,j}(m, n) - T(m, n)]^2 \quad (1)$$

$$\text{或} \quad D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M |S^{i,j}(m, n) - T(m, n)| \quad (2)$$

式中 $S^{i,j}(m, n)$ 是被探测的目标区, $T(m, n)$ 是样板, $D(i, j)$ 为目标区上每点与样板上对应点的累计差值测度。若 $D(i, j) < L_D(i, j)$ (阈值), 则认为在坐标 (i, j) 上样板匹配成立。

2.2 序列相似性检测算法(SSDA 算法)^[4]

(1) 定义绝对误差值

* 初稿时间: 2002 年 12 月 24 日; 修改稿时间: 2003 年 6 月 10 日。
资助课题: 国家气象局“九五”重点攻关项目(BX-01-04)。

$$\varepsilon(i, j, m_k, n_k) = \left| S^{i,j}(m_k, n_k) - S(i, j) - T(m_k, n_k) + T \right| \quad (3)$$

(2) 取阈值 T_K 。在子图 $S^{i,j}(m, n)$ 中随机选取像点, 计算它同 T 中对应点的误差值 ε , 将所有点对的差值累加起来。若累积误差超过阈值 T_K , 停止累加, 并记下累加次数 γ 。定义 SSDA 的检测曲面为

$$I(i, j) = \left\{ r \mid \min_{1 \leq m \leq M} \left[\sum_{k=1}^r \varepsilon(i, j, m_k, n_k) \geq T_K \right] \right\} \quad (4)$$

(3) 把 $I(i, j)$ 值大的 (i, j) 点作为匹配点, 因为此点需要很多次累加才使总误差 $\sum \varepsilon$ 超过 T_K , 它最可能是一匹配的像素点。

2.3 红外亮温交叉相关系数法^[5]

文中交叉相关系数定义为:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{i,j}(m, n) - S^{i,j}] \times [T(m, n) - T]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (T(m, n) - T)^2 \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (S^{i,j}(m, n) - S^{i,j})^2}} \quad (5)$$

式中加入了样板区的均值和各搜索区的均值, 若 $R(i, j) > R_{\text{lim}}$ (阈值), 则该区域为最佳匹配区域。定义交叉相关系数有不同的形式, 文中方法是其中的一种, 但实质是相同的。

3 云导风原理及计算

对卫星云图上的云进行连续的跟踪, 通过计算相邻时段(通常间隔 30~60 min)局部云图的变化情况得到该区域云的运动矢量, 对整块云团的各个局部推导出运动矢量就形成了云团的风场图。用来求取云导风的云图有地球静止卫星云图和极轨卫星云图两种, 两种云图求取的云导风有不同的特点和适用范围^[6,7]。本文使用的是中国气象局卫星气象中心接收的云图, 属于地球静止卫星云图。云导风计算的一般步骤为:

(1) 风矢量的求取

取连续 3 幅静止云图, 在第 2 幅云图中每 1.25 经纬度取网格点为示踪云目标中心点, 以中心点为中心取 16×16 像元块为目标在第 1 和 3 幅图像上, 以第 2 幅图像的示踪云目标区中心点为中心, 取 48×48 像元的图像块为追踪区。将第 2 幅图像上的目标(模板)在第 1 幅和 3 幅图像上的追踪区中进行逐一扫描, 扫描时每次将模板平移 1 个像素位置与搜索区相关匹配, 并计算匹配的相关系数, 这样共要计算 $(48-16) \times (48-16)$ 个相关系数, 选择使相关

系数 $R(i, j)$ 最大的区域为初始和终了位置, 算出前后两个风矢量(图 1)。

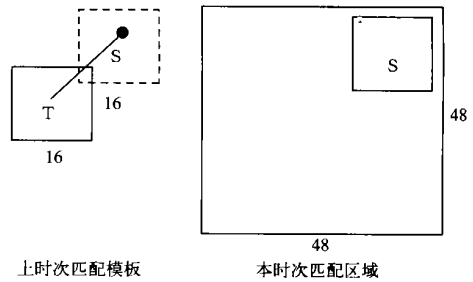


图 1 风矢量的求取

(2) 示踪云高度指定

由于不同高度的云的风速和风向不同, 反映出的云运动特征也不同, 因此求云导风时, 应区分目标云的云顶高度, 将其分为高云、中云和低云^[5], 并分别推导云导风矢量。文献^[8]中详细介绍了用双通道计算示踪云的高度。

(3) 质量控制

云导风需符合时间连续性和空间连续性。对于平移运动的云系风矢量, 由第 1 步骤中算得的两个矢量应无大的差别, 将矢量差大于阈值的矢量剔除, 要对矢量的长度和方向分别设定阈值; 低于 6 m/s 的矢量可能是地物, 也要剔除; 同类云的云导风矢量之间也应无大的差别, 将变化大的矢量调整到其他类别云的高度。文献^[9]中详细讨论了云导风高度的质量控制方法。

台风云系运动的特点是既有平移也有自旋, 并且是灰度值较高的特定云团。据此可对上述台风云导风计算进行两种简化:

(1) 只用两幅连续静止云图, 而不是 3 幅静止云图来计算云导风。即, 找到两幅图中相互匹配的各个 16×16 子区域, 按图 1 的方法得到风矢量。为减少计算量和避免因矢量过于密集而难以判断, 实际处理时, 按每隔 3 个像素距离求 1 个矢量, 即矢量图中矢量之间的距离是 3×3 像素的。原来取连续 3 幅静止云图求前后两个风矢量的目的是为了检验相邻时刻的风矢量方向有无突变, 而对台风云系这种检验是不必要的, 因为风矢量方向快速变化是台风运动的特点之一。

(2) 不需进行云的分类及其高度指定。因为台风云系的灰度值较高, 容易同其他云系区分开。

图 2 是由前面 3 种匹配法对台风 99100505 号

求取云导风矢量图的结果。差值测度依次使用式 (2), (4) 和 (5)。

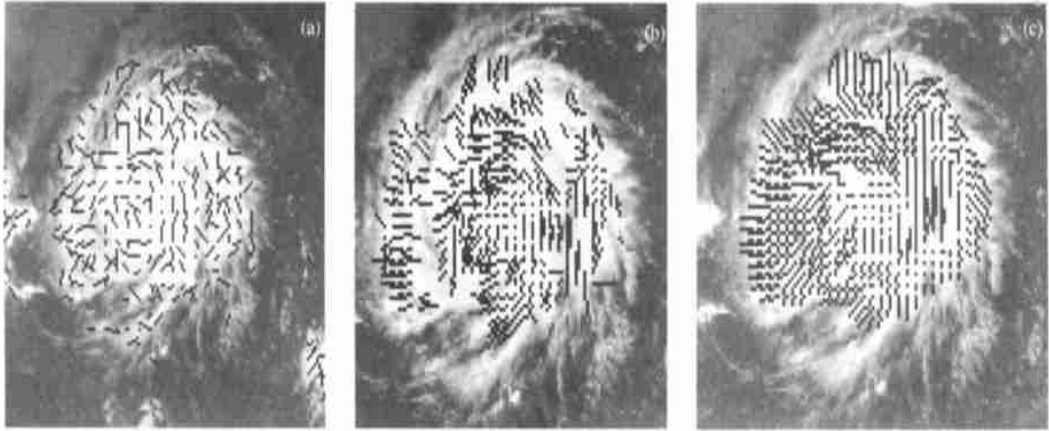


图 2 由 3 种方法求得的 99100505 号台风的云导风矢量
(a. 绝对值匹配法, b. SSDA 匹配法, c. 红外亮温交叉相关匹配法)

分析图 2 发现:

(1) 尽管绝对值匹配法计算量小, 速度快, 但得出的矢量组杂乱无章, 风场连续性效果最差, 不宜实际应用。这是由于该方法本身原理过于粗糙所致。

(2) SSDA 匹配法计算出的云导风风场连续性效果有明显改善, 并且计算速度快, 但匹配效果仍差于红外亮温交叉相关匹配法。

(3) 红外亮温交叉相关匹配法算出的云导风连续性效果在 3 种方法中最好, 运算速度比 SSDA 法稍慢, 但此速度对于云图的实时分析已足够, 故被本文采用。

实际使用式 (5) 时, 并不设定阈值 R_{lim} , 而是比较各 $R(i, j)$ 的大小, 取使 $R(i, j)$ 最大的搜索区域为匹配子图。式 (5) 各参数意义如下:

$M = 16$, i 和 j 为模板覆盖下的搜索区的左上角像素点在整个搜索图中的坐标, $S^{i,j}(m, n)$ 为模板覆盖下的搜索区中像素点 (m, n) 处的灰度值, $\bar{S}^{i,j}$ 为模板覆盖下的搜索区中各像素点的平均灰度值, $T(m, n)$ 为模板中像素点 (m, n) 处的灰度值, \bar{T} 是模板中各像素点的平均灰度值。

4 用云导风矢量图实现台风中心自动定位

台风运动的特点是从整体上看台风做平移运动; 但在台风内部是典型的自旋运动, 台风的螺旋云带包括中心密闭云墙绕中心做逆时针转动, 外围转动角速度大, 越往台风中心自旋角速度越小, 台风中心自旋相当弱, 主要是平移。整理成规则如下:

(1) 台风云导风既有平移又有自旋运动,

(2) 台风云导风中心的自旋弱, 主要是平移。

根据以上规则, 可得出结论: 台风中心矢量集合与台风整体移动矢量的大小和方向一致, 即与台风整体移动矢量一致的云导风矢量集合区域就是台风中心区域。按照这一基本思想, 云导风定位过程如下:

(1) 寻找整个台风区的云移动矢量(记为 G), 本文将两幅相邻云图 P_1 和 P_2 的台风高灰度值中心点 C_1 和 C_2 间的距离和相对方向取为 G , 即 $G = C_1 - C_2$ 。

高灰度值中心点用数学形态学求取:

首先将灰值图转化为二值图 P , 取阈值 $d = 180$, 二值化公式如下

$$\text{grayvalue} \begin{cases} 1 & |G| > d \\ 0 & |G| \leq d \end{cases} \quad (6)$$

然后用半径为 3 的结构元素进行开闭运算使二值图成为连通域 Q 。即

$$Q = (P \hat{Y} g_{(3)}) \odot g_{(3)} \\ \text{或 } Q = (P \odot g_{(3)}) \hat{Y} g_{(3)} \quad (7)$$

最后用半径为 1 的圆形结构元素腐蚀, 剩下一个像素点即为中心点, 即

$$S = Q \odot g_{(1)} \quad (8)$$

式 (7), (8) 中, $g_{(1)}$ 和 $g_{(3)}$ 分别表示半径为 1 和 3 的圆形结构元素。

(2) 由前面得出的结论可知: 台风中心区域矢量的大小与方向和 G 相当, 即寻找与 G 一致的矢

量组, 就可以确定台风中心位置。

采用红外亮温相关系数法匹配云图, 按照前述求取台风云导风矢量的方法, 将匹配得到的矢量集合(typhoon motion vectors 记为 T) 按照 G 的长度和方向挑选出合乎要求的矢量子集。本文寻找的 T 矢量幅值范围为

$$|\bar{V}_T| \in (|G| - 1, |G| + 1)$$

方向性规定如下: T 满足 $|G - G| < |G|$, 从矢量图中分析, 近似为等边三角形, 即设定以 G 矢量为中心, $\pm 60^\circ$ 为范围的 T 满足条件。矢量幅角范围为

$$\theta_T \in (\theta_G - \pi/3, \theta_G + \pi/3)$$

(3) 找出符合要求的矢量集合中最密集区域的中心, 就是台风中心。使用数学形态学计算出台风中心。

第 1 步: 将求得的矢量集合转化为二值图。各矢量的起点灰度值置为“1”, 其余部分均置为“0”, 则矢量集合区域变成像素点集。

第 2 步: 由于实际计算出的矢量是 3×3 距离, 选择半径为 3 的圆形结构元素使用膨胀算法使相邻

的矢量(3×3) 相连通。即作运算: $B = A \hat{Y} g_{(3)}$; A 为像素点集, B 为运算后的连通域。

第 3 步: 反复使用半径为 1 的圆形结构元素 $g_{(1)}$ 进行腐蚀, 直至图中只有一个像素点, 该点为中心; 若剩下有多点, 取多点的几何中心位置作为台风中心。即作运算: $C = B @ g_{(1)}$; 式中 C 为剩下的像素点。

图 3 给出了用上述方法计算台风 99100505 号台风中心的结果, 图 3a 中显示了台风区云导风矢量 T , 图 3b 表示符合 G 长度和方向的矢量集合。由图可见, 台风中心区的矢量最密集而其他区域比较分散且稀少。图 3c 是使用数学形态学运算找出的台风中心点。99100505 号台风云图采用 GMS-5 卫星的抽样云图, 每像素分辨率为 15 km。中国气象局发布的 99100505 号台风中心点在 18.2°N , 122.4°E , 文中定位方法计算出的 99100505 号台风中心点与中国气象局发布的台风中心点在云图中属于同一像素, 即定位误差小于 15 km。结果表明定位精度较高。

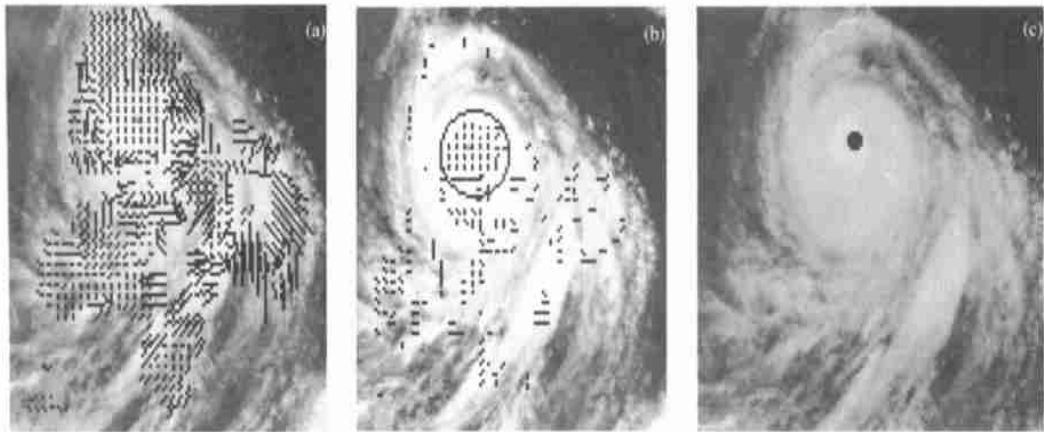


图 3 台风 99100505 号中心的自动定位过程与结果
(a. 台风云导风, b. 符合要求的矢量, c. 云导风定位结果)

5 结 论

使用云导风矢量图方法进行台风中心定位是云导风图像在气象领域应用的一种新尝试, 为台风的自动定位开辟了一个新的方向。实验结果表明, 用

该方法进行台风中心定位是基本成功的, 由于云图匹配过程和云导风的求取过程中均存在误差^[5], 因此如何减少这些误差, 使定位的准确性得到改善和提高的问题还需继续探究。

参考文献

- 1 谢俊元, 艾早阳, 高勇. 台风中心定位中的螺旋线自动识别算法. 软件学报, 1997, 6(增刊): 398~ 403
- 2 Palaniappan K, Kambhmettu C, Hasler A F, et al. Structure and semi-fluid motion analysis of stereoscopic satellite images for cloud tracking. in: Proceedings of Fifth International Conference on Computer Vision. 1995. 659~ 665

- 3 Atalsh M J. Faster image template matching in the sum of the absolute value of differences measure. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(4): 659~ 663
- 4 龚克, 叶大鲁, 葛成辉. 卫星云图预测的运动矢量方法. *中国图像图形学报(A 版)*, 2000, 5(4): 349~ 352
- 5 白洁, 王洪庆, 陶祖钰. GMS 卫星红外云图云迹风的反演. *北京大学学报(自然科学版)*, 1997, 33(1): 85~ 92
- 6 Kazansky, A V. Federyakov V G. Improved derivation of cloud motion winds from triple AVHRR and HIRS. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium On Better Understanding of Earth Environment (IGARSS '93)*, 1993, 3: 1493~ 1495
- 7 Warren D, Turner J. Cloud Track Winds From Polar Orbiting Satellites. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium On Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century (IGARSS '88)*, 1988, 1: 549~ 550
- 8 许健民, 张其松, 方翔. 用红外和水气两个通道的测值指定云迹风的高度. *气象学报*, 1997, 55(4): 408~ 417
- 9 陈华, 许健民, 张其松等. 用高度调整法进行云迹风高度的质量控制. *气象科学*, 1999, 19(1): 20~ 25
- 10 Gharavi- Alkhansari M. A fast globally optimal algorithm for template matching using low - resolution pruning. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(4): 526~ 533

AUTOMATIC LOCATION OF TYPHOON CENTER USING CLOUD DERIVED WIND VECTORS

Liu Zhengguang Yu Yuanfei Wu Bing

(School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University 300072)

Liu Huanzhu

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

An automatic locating algorithm is presented for typhoon center using cloud motion wind vectors derived from the satellite cloud images. The cloud motion wind vectors are obtained by implementing template matching to a pair of interrelated satellite cloud images with vegulan time interval. The template matching is a process to find the child image that corresponds to the given pattern image in an unknown pattern image. Three matching algorithms are compared. Namely, the absolute difference matching algorithm, the sequential similarity detection algorithm and the infrared cross- correlation coefficients matching algorithm. The third one is selected to acquire the set of cloud motion wind vectors due to its desirable vector results. Aiming at the specific typhoon cloud image, two simplifications are processed in the course of acquiring the cloud motion wind vectors. According to meteorological analysis, typhoon center motion has two important characteristics: (1) The translation in the central area is great while the spin is feeble. (2) The center moving direction is compatible to that of the whole typhoon clouds. According to these characteristics, the algorithm for automatically locating the typhoon center can be depicted as follows: firstly pick up the vectors that compatible to the whole typhoon cloud motion vectors in the cloud motion wind vectors image, then find out the thickest area of the satisfied vectors, lastly process the thickest area with mathematical morphology until there exists only one pixel point. The locating result shows that the thought in the paper is good and can be a promising application in the typhoon center location field.

Key words: Cloud motion wind, Template matching, Mathematical morphology, Typhoon center location.