

改进变分光流法并行算法实现

王志斌¹ 肖艳姣¹ 吴涛² 崔方³

¹(中国气象局武汉暴雨研究所 湖北 武汉 430205)

²(武汉中心气象台 湖北 武汉 430074)

³(中国电力科学研究院新能源研究中心 江苏 南京 210009)

摘要 通过天气雷达回波并使用变分光流方法的改进算法对雷达数据进行风场反演,计算回波的光流场变化而得到运动的矢量场。把 Horn & Schunck 方法和 Lucas & Kanade 方法结合在一起,加入高阶平滑项,再运用九点平滑算法得到矢量场。外推预报采用 Semi-Lagrange 方法进行。实验表明,该方法的效果优于 Horn & Schunck 方法和 Lucas & Kanade 方法。通过 Join-Fork 模式运用共享内存处理并行算法实现了大范围三维矢量场的快速计算,其加速比可达 5.05,减少实时业务所需时间。

关键词 天气雷达 临近预报 变分方法 光流方法 并行计算

中图分类号 TP301.6

文献标识码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.01.019

IMPLEMENTATION OF IMPROVED VARIATIONAL OPTICAL FLOW PARALLEL ALGORITHM

Wang Zhibin¹ Xiao Yanjiao¹ Wu Tao² Cui Fang³

¹(Institute of Wuhan Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, Hubei, China)

²(Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, Hubei, China)

³(Renewable Energy Center, China Electric Power Research Institute, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract A wind field inversion was conducted by means of weather radar echo and an improved variational optical flow method, and the motion vector field was obtained by calculating the optical flow changes of echo. We combined the Horn & Schunck method with Lucas & Kanade method, in which the higher order smoothing term was added. The vector field was obtained by using the nine dot smoothing algorithm. The Semi-Lagrange method was adopted for extrapolation prediction. The experimental results show that the effect of the improved method is better than Horn & Schunck and Lucas & Kanade method. Shared memory process parallel algorithm is used in Join-Fork mode to realize the fast calculation of a large range of three-dimensional vector field. Experiments show that the speedup of the parallel algorithm can reach 5.05, which reduces the time required for real-time services.

Keywords Weather radar Nowcasting Variational method Optical flow method Parallel computing

0 引言

雷暴易产生强的天气系统,对雷暴的跟踪和外推预报难度很大^[1],它变化快,有些雷暴单体从产生到消亡只有短短的几分钟。目前气象部门实时业务上常用

的主要方法是基于天气雷达的雷暴追踪和通过风场进行外推的预报技术,包括:基于相关法(TREC)^[2-3]和基于质心法^[4-5],TITAN 等。要对雷暴进行跟踪和预报,有两种基本的方法:第一种是识别出初生的雷暴,再根据多个时次的雷达资料计算出运动轨迹,利用拟合曲线方法进行外推;另外一种求解风场,利用风场

的演变规律求解出雷暴的运动轨迹。质心方法是用天气雷达空间数据来进行分析,属于第一种方法;相关法属于第二种方法。相关法是利用两个不同时刻某一层的雷达回波求最优相关,来确定某一层某一回波块移动特征,从而得出矢量风场,通过风场进行回波外推来预报雷暴。相关法算法计算简单,主要是计算雷达回波块的相关系数,相关系数最大的回波被认为是从上个时刻演变而来。相关法在短时临近预报工作中得到了很好的应用^[6-7]。但对局地的及变化较快强对流系统,通过此方法计算出的风场质量会显著降低,表现为跟踪回波失败^[8],在某些情况下还比较严重。为了有效地克服这些不完善的地方,光流方法被引入。本文中采用的方法是利用改进的变分光流法计算得到雷达回波的矢量场来代替 TREC 风场。文献[9]首先提出了基本光流方程,文献[10]根据光流方程提出了一种求解方法(简称 HS 方法),它是基于全场约束。文献[11]根据 HS 方法的不足提出了另外一种求解方法(简称 LK 方法),它是基于局部求解的方法。光流方法应用广泛,如在运动物体识别跟踪等方面^[12-14],韩雷利用 HS 提出方法对雷达回波进行了风场求解,并用外推预报进行评估,对全场的回波这种方法满足最优解条件较难,往往求解的是局部最优解,特别是在图像噪声强的时候。曹春燕等^[15]使用改进的 LK 算法进行了求解,但对满足全场最优解仍有一定困难。王志斌等^[16]运用简单的方案把两者结合在一起,先利用 LK 求局部最优,后利用局部最优解的结果作为 HS 方法的初始场计算全场的光流值,得到运动矢量风场,这种方法虽然进行了结合,但很简单,且在进行全局计算时对噪声还是相当敏感。因此本文选择一种变分的光流方法,使两者有机结合起来,得到较合理的运动矢量场。利用这种改进的方法对于范围大的变分光流场的计算需要时间较长,满足不了实时业务需求,因此需通过并行算法实现了快速计算。和传统的 HS 及 LK 光流方法比较,此改进的方法试验结果表明效果更好。

1 HS、LK 及改进的光流方法

光流方法研究的是三维图像在平面上投影时图像灰度在时间上的变化,这里介绍上面提到的两种常用的光流方法:LK 和 HS 方法。

设 $M(x, y)$ 是在平面坐标系上的一点,它代表了该三维空间中的一点 $K(x, y, z)$ 在 (x, y) 平面上的投影。设 t 时刻该点的灰度值为 $I(x, y, t)$,如果在 t 时刻该点运动到 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 的地方,假设在 Δt 间隔内

该点灰度值保持不变。即:

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

将式(1)按照 Taylor 公式进行展开:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \Delta x \frac{I}{X} + \Delta y \frac{I}{Y} + \Delta t \frac{I}{T} + Y_n \quad (2)$$

式中: Y_n 包含了 Δx 、 Δy 、 Δt 的二次及以上的小量。对式(2)进行变换,得:

$$\Delta x \frac{I}{X} + \Delta y \frac{I}{Y} + \Delta t \frac{I}{T} + Y_n = 0 \quad (3)$$

式(3)两边除以 Δt ,取 Δt 趋向于零的极限,忽略掉高阶小量项 Y_n 可得:

$$\frac{I}{X} \frac{dx}{dt} + \frac{I}{Y} \frac{dy}{dt} + \frac{I}{T} = 0 \quad (4)$$

表达式简写为:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (5)$$

式中: $I_x = \frac{I}{X}$, $I_y = \frac{I}{Y}$, $I_t = \frac{I}{T}$, $u = \frac{dx}{dt}$, $v = \frac{dy}{dt}$, 式(5)就是 Gibson 提出的原始光流方程。

对雷达图像而言 I_x 、 I_y 为回波值灰度的空间梯度,而 I_t 为回波值灰度随时间的变化, u 、 v 为矢量风场。方程中的 I_x 、 I_y 、 I_t 可以通过相邻的两幅雷达回波的灰度值进行计算,但式(5)中有两个变量待求,需要引入附加约束条件,方能求解出 u 、 v 。

1.1 HS 方法

为了求解式(5),Horn 和 Schunk 等提出全局约束的条件方程,如下:

$$J = J_0 + \alpha^2 J_{HS} \quad (6)$$

式中:平滑系数用 α ,灰度守恒用 J_0 ,约束项用 J_{HS} 。

$$J_0 = \iint (I_x u + I_y v + I_t)^2 dx dy$$

$$J_{HS} = \iint \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy$$

根据式(6)和其约束条件,利用欧拉-拉格朗日方法求解方程,数值解用雅克比迭代法求解式(6),得到的迭代方程为:

$$U^{k+1} = \bar{U}^k - \frac{I_x \bar{U}^k + I_y \bar{v}^k + I_t}{I_x^2 + I_y^2 + \alpha^2} \quad (7)$$

$$V^{k+1} = \bar{V}^k - \frac{I_y \bar{U}^k + I_x \bar{v}^k + I_t}{I_x^2 + I_y^2 + \alpha^2} \quad (8)$$

即可以求解风矢量的 u 、 v 分量。

1.2 LK 方法

利用 HS 方法进行求解,可能得不到全局最优,因此 LK 提出另外一种基于局部最优求解的方法,把大范围的雷达数据场分为多个小区域,在小区域内易满

足光流方程中光流变化恒定的条件,对噪声不敏感。

假设一个大范围的小区域 Ω 内的光流随时间恒定,根据光流方程式(5)有:

$$\begin{cases} I_{x1}u + I_{y1}v = -I_{t1} \\ I_{x2}u + I_{y2}v = -I_{t2} \\ I_{x3}u + I_{y3}v = -I_{t3} \\ \vdots \\ I_{xn}u + I_{yn}v = -I_{tn} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)的求解方法是使用最小二乘法。

把式(9)记为如下行列式:

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ I_{x2} & I_{y2} \\ I_{x3} & I_{y3} \\ \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{t1} \\ -I_{t2} \\ -I_{t3} \\ \vdots \\ -I_{tn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

得到 u, v 的解为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum I_{xi}^2 & \sum I_{xi}I_{yi} \\ \sum I_{xi}I_{yi} & \sum I_{yi}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum -I_{xi}I_{ti} \\ \sum -I_{yi}I_{ti} \end{bmatrix} \quad (11)$$

如果考虑距离因素,在选择的小区域 Ω 范围内可以使用一个权重窗口函数进行调整,得到的光流场如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum W^2 I_{xi}^2 & \sum W^2 I_{xi}I_{yi} \\ \sum W^2 I_{xi}I_{yi} & \sum W^2 I_{yi}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum W^2 I_{xi}I_{ti} \\ \sum W^2 I_{yi}I_{ti} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: w 为高斯权重系数。

1.3 改进的变分光流方法

如何把 HS 和 LK 两种方法结合,观察式(6)和式(9)发现,可以把矢量 $(u, v, 1)$ 及灰度矢量 I 通过三个向量相乘(如式(14))并加上变分约束项表达,在变分约束项中加入了约束条件更强的条件,它对数据的抗噪更强,同时考虑 LK 方法中的窗口权重函数,最后得到变分方程式。设 $f(x, y, t)$ 是雷达图像序列, x, y 在矩形区域 Ω 内,我们给出的变分光流的能量函数如下:

$$E(u, v) = \int_{\Omega} \left\{ \mathbf{W}^T J_p(\nabla_3 f) \mathbf{W} + \alpha \cdot \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (13)$$

式中: $\mathbf{W}(x, y) = (u(x, y), v(x, y), 1)^T$ 是一个向量, $\nabla_3 f = (f_x, f_y, f_t)^T$ 是光流的梯度向量, f_x, f_y, f_t 分别代表光流沿着 x, y 方向及随时间的变化, $J_p(\nabla_3 f)$ 是由 $K_p * (\nabla_3 f \nabla_3 f^t)$ 向量构成, $*$ 代表卷积, K_p 代表标准差为 ρ 的高斯分布, $\alpha > 0$ 。在式(13)中如果 $\rho \rightarrow 0$ 时不

考虑权重,则转化为 HS 方法,这个 HS 方法和原始的 HS 方法比较,修改了变分约束项。如果 $\alpha \rightarrow 0$ 则转化为 LK 方法,这时没有约束项,且不用变分方法也可以求解,因此改进的变分光流方法主要体现在将 HS、LK 两者有机结合并加入了强的约束项。 $\mathbf{W}^T J_p(\nabla_3 f) \mathbf{W}$ 展开的矩阵具体形式如下:

$$(u(x, y), v(x, y), 1) \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_t \end{pmatrix} (f_x, f_y, f_t) \begin{pmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

最后求解式(13),结果如下:

$$\Delta^2 u + \frac{1}{\alpha} [K_p \times (f_x^2)u + K_p \times (f_x f_y)v + K_p \times (f_x f_t)] = 0 \quad (15)$$

$$\Delta^2 v + \frac{1}{\alpha} [K_p \times (f_x f_y)u + K_p \times (f_y^2)v + K_p \times (f_y f_t)] = 0 \quad (16)$$

式中: $\Delta^2 u, \Delta^2 v$ 为下面高阶的拉普拉斯算子^[16-17]:

$$\Delta^2 u = \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2}$$

$$\Delta^2 v = \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 v}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial y^2}$$

实验中取 $\alpha = 2700, \rho$ 取 1.8。

1.4 雷达数据质量控制

在形成三维格点场数据之前,需对各单部雷达的数据进行有效的质量控制,本文利用吴涛^[17]的模糊逻辑方法进行。各单站雷达质量控制完成后,我们采用肖艳姣^[18]三维拼图方法完成由极坐标向三维直角坐标格式的转换。对单站雷达数据进行质量控制后,有部分雷达数据仍有噪声问题存在,因此还利用了 5 点平滑对整场进行平滑处理。通过上述各种方法计算出的格点风场仍有不连续的地方,需要进一步改进。如某一格点在速度和方向上超过某些阈值,此值也给予剔除,用周围平均值进行替换。

1.5 个例分析

把 HS 和 LW 方法及改进变分光流方法的计算结果进行评估,用下面气象上常用三种评价指标进行评估,分别是击中率、虚警率、临界成功指数,分别用 POD、FAR、CSI 代表。

$$POD = \frac{N_{成功}}{N_{失败} + N_{成功}}$$

$$FAR = \frac{N_{虚假}}{N_{虚假} + N_{成功}}$$

$$CSI = \frac{N_{成功}}{N_{成功} + N_{虚假} + N_{失败}}$$

将实况位置的回波和预报结果按照 5 个等级进行比较,外推预报用半拉格朗日方法进行,外推预报时间为三十分钟和六十分钟。

选取2017年6月22日的过程,从图1、图2的分析效果看,变分光流方法效果最好,其中成功指数和命中率比HS及LW方法高,同时虚警率比HS和LW小。六十分钟的外推效果不如三十分钟外推效果好,且随预报时间变长而变差,这和使用半拉格朗日方法外推时能量损失有关,也和强对流系统变化不确定有关。

雷达资料范围为湖北、安徽、湖南、江西及重庆的部分雷达资料共计40部。格点数为 $1\ 600 \times 1\ 000$ 共21层。形成一个三维格点场需要的时间为123秒左右。由于雷达资料产生的周期为六分钟,包括资料收集处理还有其他算法,给光流场计算的时间只有30秒左右,如果不对程序进行并行及优化处理,满足不了业务需求。

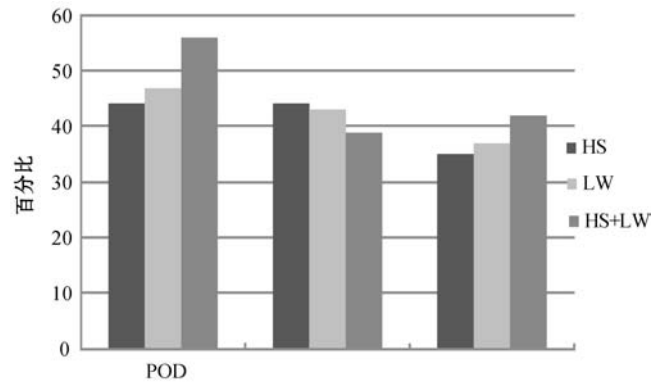


图1 2017年6月22日30分钟外推

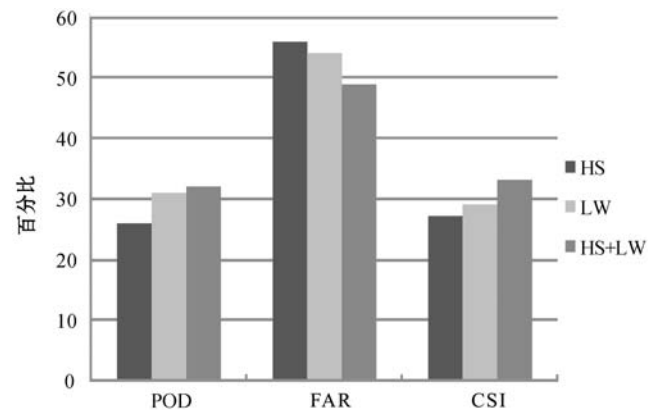


图2 2017年6月22日60分钟外推结果

2 并行处理方法

2.1 并行过程分析

在进行三维光流场的计算中,使用的是网格化的资料,在水平方向和垂直方向都可以进行并行处理。

并行处理的条件分析,我们使用的是基于共享内存的多核服务器。并行编程主要采用共享内存方式进行,在形成大区域的格点场之前,需对单站雷达资料进

行处理,单站雷达形成范围较小的三维格点场,再在其基础上把单站的雷达资料拼接成大范围的三维格点场。这个过程特别适合把小的任务分配到各CPU核上运行,等待小的任务全部完成后合并成最后的结果(JOIN-FORK模式)。即全部雷达处理完成后,最终形成大范围的三维格点场,单站雷达之间重叠部分采用高斯距离加权方法进行插值运算实现。

上述形成的格点场只是三维雷达回波强度值,并没有形成三维的光流强度场,对三维光流场的计算同样可以采用并行方法进行,且并行处理只在垂直方向实施,水平方向没有划分为多个区域进行处理,垂直方向划分为7等份计算的时间最少。

2.2 并行实验结果分析

雷达资料处理平台为壹台高性能服务器,有两个CPU共8核,共有16个CPU数,操作系统采用Centos 6.8。通常程序并行的执行效率采用加速比进行衡量,并对执行耗时较长的单站雷达形成大范围三维格点场的结果进行了分析,选取华中区域雷达共40部。结果如表1和图3所示,串行处理时间为123.09秒,为了确保实验数据的可靠性,实验的结果是进行了50次以上运算结果的平均。从表1可以看出,共享内存并行算法可以大幅提高雷达资料处理速度,其加速比达到了5左右,能在24秒左右完成三维数据场的处理,满足实时业务需求。

表1 并行处理时间表

CPU个数	OpenMP并行/s	加速比
1	123.09	1.00
2	86.01	1.43
3	60.33	2.04
4	54.01	2.27
5	50.32	2.44
6	48.89	2.51
7	45.70	2.69
8	38.87	3.16
9	33.03	3.72
10	32.10	3.83
11	30.10	4.08
12	27.19	4.52
13	28.19	4.36
14	27.80	4.42
15	26.87	4.58
16	24.34	5.05

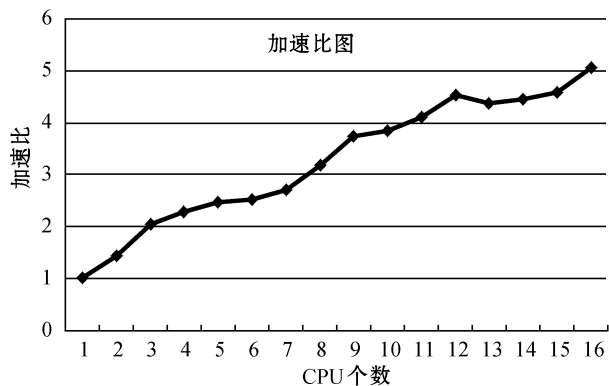


图3 加速比图

在形成的三维格点强度场后,要通过光流计算才能得到三维的光流格点场,实验表明计算某一层的时间大约需要3秒左右,如采用串行方法计算,21层需要60秒左右的时间。为此采用和单部雷达处理方式一样,派生出多个线程同时计算不同高度层的光流值。从表2和图4分析发现,并不是同时派生出21个粒度相同的线程处理各层的时间用时最少,而是派生出7个粗粒度相同,各含3个高度层用时最少。

表2 线程数划分表

三维雷达层数划分/粒度	执行时间/s
1	63.12
2	42.92
3	21.43
4	16.47
5	12.89
6	11.98
7	9.71
8	10.21
9	11.12
10	12.98
11	12.01
12	11.83
13	12.98
14	13.34
15	13.29
16	12.29
17	13.78
18	14.98
19	14.78
20	15.01
21	15.39

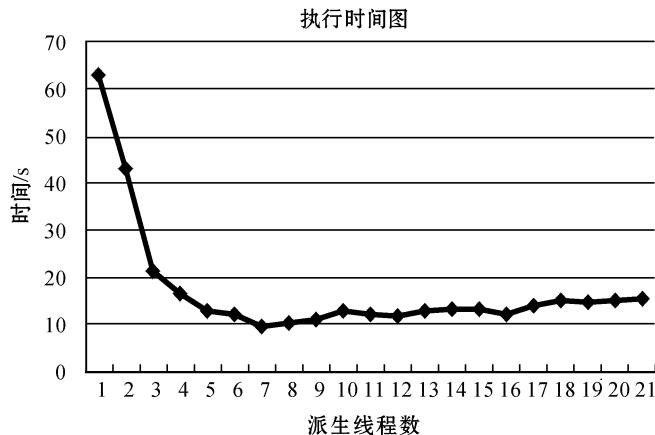


图4 时间执行图

3 结 语

本文对比了HS和LK方法,HS方法解全局最优,很难满足最优条件;而LK方法是对雷达图像数据小范围内求最优解,容易满足最优条件,但对全场的图像数据完全满足最优条件有困难。我们把两个方法通过一个能量函数有机结合起来,并加入了强的约束项,提出了一种改进的变分光流方法。实验结果表明改进的变分光流优于HS及LK方法,击中率、成功指数都比HS及LK方法效果好;三十分钟外推结果表明其击中率比HS高12%,比LK高9%;成功指数比HS高7%,比LK高5%;同时虚警率比HS及LK方法低5%左右。为了实时业务需求,利用共享内存方式进行并行处理,编程中运用JOIN-FORK模式进行,在处理多部雷达时,把单部雷达资料派生到各独立的CPU上进行处理,各自独立生成三维格点场,最后进行拼接处理,大大缩短了运行时间,实验表明其加速比可达5.05;在进行三维光流场的计算中,把二十一层分为三组,同时派生到不同的CPU上进行计算,实验表明分层的线程不宜粒度太小,粒度划分太小计算时间反而增加,每七层作为一个整体进行派生计算效率最高,计算一次只有9.71秒。

和传统的跟踪方法比较,光流法在于变化,因为在进行光流场的计算时,同时考虑了图像灰度值在水平方向上和时间的变化;通过并行计算改进,在一般服务器上三十秒即可完成,完全满足气象部门实时业务需求。

参 考 文 献

- [1] Wong W K. Merging radar nowcast with convection-permitting-rapidly-updated NWP model for significant convection forecast [C]//WMO WRP 4th International Symposium on Nowcasting and Very-short-range Forecast 2016 (WSN16),

2016.

- [2] Rinehart R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar[J]. *Nature*, 1978, 273(5660):287-289.
- [3] Wilson J W, Crook N A, Mueller C K. et al. Nowcasting thunderstorms: A status report[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(10):2079-2099.
- [4] Crane R K. Automatic cell detection and tracking[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1979, 17(4):250-262.
- [5] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology[J]. *Journal of Atmospheric and oceanic Technology*, 1993, 10(6):785-797.
- [6] Rasmussen R, Dixon M, Hage F, et al. Weather support to deicing decision making (WSDDM): A winter weather nowcasting system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(4):579-595.
- [7] Mueller K, Saxen T, Roberts D, et al. NCAR auto-nowcast system[J]. *Weather & Forecasting*, 2003, 18(4):545-561.
- [8] 韩雷, 王洪庆, 林隐静. 光流法在强对流天气临近预报中的应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(5):751-755.
- [9] Gibson J J. *The perception of the visual world*[M]. Boston: HoughtonMifflin, 1950.
- [10] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow[J]. *Artificial Intelligence*, 1981, 17(1/3):185-204.
- [11] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereovision[C]//*Proceedings of Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Vancouver: IEEE Press, 1981.
- [12] 王彬, 翁政魁, 王坤, 等. 基于 Lucas-Kanada 光流法的人眼特征点实时跟踪方法[J]. *计算机工程*, 2015, 41(7):244-249.
- [13] 熊饶饶, 胡学敏, 陈龙, 等. 利用综合光流直方图的人群异常行为检测[J]. *计算机工程*, 2017, 43(10):228-233.
- [14] 柯泽贤, 江汉红, 张朝亮, 等. 融合运动和颜色特征的视频目标粒子滤波跟踪[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(2):347-352.
- [15] 曹春燕, 陈元昭, 刘东华, 等. 光流法及其在临近预报中的应用[J]. *气象学报*, 2015, 73(3):471-480.
- [16] 王志斌, 肖艳姣, 吴涛. 基于改进光流法的雷达图像运动估计[J]. *计算机技术与发展*, 2017, 27(12):170-175.
- [17] 吴涛, 万玉发, 沃伟峰, 等. SWAN 系统中雷达反射率因子质量控制算法及其应用[J]. *气象科技*, 2013, 41(5):809-817.
- [18] 肖艳姣, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(5):647-657.

(上接第 93 页)

验证。研究表明:企业及个人都可以根据本文所构建的产品综合评价模型对想要分析的产品进行评价,并能有效地分析出消费者对产品的情感倾向情况以及产品在不同维度中的表现,找出产品在不同维度下体现出的优劣程度。同时,本文的研究结果既可以指导消费者购买产品,也能够为企业在产品评价的知识服务,丰富企业原有的产品评价手段,对产品的更新换代提供决策支持。当然,在今后的研究中会考虑其他维度信息在产品评价建模中的应用,并希望利用产品评价的结果更加深入地进行产品创新推荐方面的研究。

参 考 文 献

- [1] Bai X. Predicting consumer sentiments from online text[J]. *Ssm Electronic Journal*, 2011, 50(4):732-742.
- [2] 张玉峰, 何超. 基于 Web 评论挖掘的动态竞争情报分析研究(下)——算法设计与实验分析[J]. *情报理论与实践*, 2012(7):47-50, 42.
- [3] Xu K, Liao S S, Li J, et al. Mining comparative opinions from customer reviews for Competitive Intelligence[J]. *Decision Support Systems*, 2011, 50(4):743-754.
- [4] Schumaker R P, Jarmoszko A T, Labedz C S. Predicting wins and spread in the Premier League using a sentiment analysis of twitter[J]. *Decision Support Systems*, 2016, 88:76-84.
- [5] Salehan M, Kim D J. Predicting the performance of online consumer reviews[J]. *Decision Support Systems*, 2016, 81(C):30-40.
- [6] 施国良, 程楠楠. Web 环境下产品评论挖掘在企业竞争情报中的应用[J]. *情报杂志*, 2011, 30(11):10-14.
- [7] Cho J, Lee J. Development of a new technology product evaluation model for assessing commercialization opportunities using Delphi method and fuzzy AHP approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(13):5314-5330.
- [8] Xing K, Belusko M, Luong L, et al. An evaluation model of product upgradeability for remanufacture[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 35(1):1-14.
- [9] 李丹, 郑志安. 产业链主导产品评价模型的构建及其应用[J]. *商场现代化*, 2005(30):145-146.
- [10] 宁连举, 张沙沙. 基于层次分析法的移动通信产品创新评价模型[J]. *科研管理*, 2010(3):176-182.
- [11] 林园园, 战洪飞, 余军合, 等. 基于产品评论的消费者情感波动分析模型构建及实证研究[J]. *现代图书情报技术*, 2016, 32(11):44-53.
- [12] 魏慧玲. 文本情感分析在产品评论中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.