

利用改进 FLIC 算法进行重力矢量场可视化

李振海¹ 罗志才^{1,2,3} 汪海洪^{1,2} 李 琼¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:针对固定滤波长度公式得到的 LIC 图像显示效果不理想的缺点,利用纹理流线上所有点亮度值的统计方差来衡量可视化精度,提出了一种滤波长度随矢量变化的改进 FLIC 算法。用颜色信息表示重力异常大小或者真实垂线偏差大小,纹理方向表示重力方向,基于改进 FLIC 算法实现了重力矢量场的可视化,结果表明,重力矢量场的可视化具有表达多维信息和矢量方向细节、图形直观易读等优势。
关键词:改进 FLIC 算法;重力矢量场;可视化;滤波长度
中图法分类号:P223.7

重力场的可视化从数据类型上大体可分为标量场可视化及矢量场可视化^[1,2]。最早将纹理技术引入到矢量场可视化的方法有点噪声法^[3]和纹理溅射方法^[4]。文献^[5]提出的线积分卷积(line integral convolution, LIC)算法增强了流线的方向性,可以表达矢量场的全局结构及细节变化,但具有重复卷积计算的缺点。FLIC 算法则利用同一流线上卷积积分的重叠加快了 LIC 的计算速度,但仍不能满足海量数据可视化的要求^[6]。

计算速度与精度是衡量可视化效果的两个指标^[7],但二者是矛盾的,目前尚未有具体方法应用于评价矢量场可视化的效果。本文为了改善可视化计算速度与精度的“矛盾”,提出以纹理流线方差为衡量可视化精度的量化指标。滤波器和滤波长度是影响 FLIC 算法的主要因素,本文针对方波滤波器的 FLIC 算法^[8],分析滤波长度对可视化纹理图像的影响,给出了滤波长度的优选模型。

1 LIC 算法

LIC 算法对输出图像的每个像素点首先计算一条流线,用 1D 滤波器沿流线卷积纹理图像(通

常为白噪声),再利用其得到的像素值来合成纹理,要求纹理图像大小与矢量场数据大小相同^[5]。输入的白噪声图像各点不相关,但是输出图像的纹理在流线方向上相关,显示了矢量场的方向信息。

假定流线用 $\vec{\sigma}(s)$ 表示, s 是弧长参数,输出的 LIC 纹理在点 $\vec{x}_0 = \vec{\sigma}(s_0)$ 的强度为 $I(\vec{x}_0)$:

$$I(\vec{x}_0) = \frac{1}{\int_{-L}^L k(s) ds} \int_{s_0-L}^{s_0+L} k(s-s_0) T(\vec{\sigma}(s)) ds \quad (1)$$

式中, T 为纹理数据,一般采用 2D 白噪声; k 为滤波器(如方波滤波、三角滤波等); L 为滤波长度。

FLIC 是 LIC 的改进算法。采用方波滤波器的 FLIC 算法时,以 \vec{x}_0 为初始点,然后分别沿前后两个方向计算其后续输出像素的强度值 $I(\vec{x}_i)$ 。计算 x_0 点的输出纹理强度值 $I(\vec{x}_0)$ 可用式(1)的离散形式得到:

$$I(\vec{x}_0) = \frac{1}{2n+1} \sum_{i=-n}^{i=n} T(\vec{x}_i) \quad (2)$$

式中, $\vec{x}_i = \vec{\sigma}(s_0 + ih)$, h 为积分步长。计算出 $I(\vec{x}_0)$ 后, x_0 点的后续采样点 (x_1, x_2, \dots, x_i) 与点 $(x_{-1}, x_{-2}, \dots, x_{-i})$ 的输出纹理强度值的计算公

式为^[6]：

$$I(\bar{x}_{i+1}) = I(\bar{x}_i) + \frac{1}{2n+1} [T(\bar{x}_{i+(n+1)}) - T(\bar{x}_{i+n})] \tag{3}$$

当采用方波滤波器的 FLIC 算法时,选取滤波长度的经验公式为^[6]：

$$2L = 0.1 \times d \tag{4}$$

式中, L 表示滤波半波长; $d = \max(\text{width}, \text{height})$, width 表示结果图像宽度, height 表示结果图像高度。

2 滤波长度的优选

2.1 重力矢量场的表达方法

重力数据既有大小又有方向,其大小用地球外部正常重力与重力异常的和表示,方向用垂线偏差表示。为了得到 2D 平面上的重力矢量方向的图像,需要对垂线偏差数据进行投影计算。如图 1 所示, O 为大地水准面上的一点,过 O 点作平行于参考椭球面的辅助面 S ,实际重力方向 \overrightarrow{PO} 与正常重力方向 $\overrightarrow{P'O}$ (过 O 点到平均椭球体表面的法线方向) 的偏差分别为南北分量 ξ 与东西分量 η ,平面内的向量数据可以由二者计算得到：

$$\left. \begin{aligned} v_x &= P'O \times \tan \eta \\ v_y &= P'O \times \tan \xi \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

当 $P'O$ 变化时, v_y/v_x 保持不变,所以令 $P'O=1$,这样就可以用向量 $(\tan \eta, \tan \xi)$ 代替东西与南北分量 η 与 ξ 。

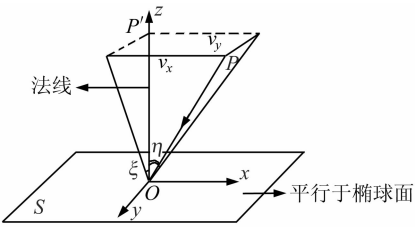


图 1 垂线偏差与其平面向量的相对关系
Fig. 1 Relative Relationship Between Vertical Deflection and Its Projection Vector

2.2 滤波长度的影响分析

采用式(3)计算了我国某区域重力矢量场的 LIC 图像(见封三彩图 1),该区域西北角坐标为 $(120^\circ\text{E}, 26^\circ\text{N})$,范围为 $4^\circ \times 4^\circ$,分辨率为 $1' \times 1'$ 。图中蓝色框表示矢量数据缓和变化的区域,红色框表示矢量数据变化较大的区域。由图可知,随着 L 的增加,矢量数据缓和变化的区域纹理特征变得明显,而矢量数据变化较大的区域纹理特征有“丢失”现象;卷积积分的计算时间随 L 的增加

而增加。这表明经 LIC 计算的图像纹理特征与所使用滤波长度直接相关,采用式(4)的固定滤波长度不能得到满意的结果。封三彩图 1 的结果与已有的结论相矛盾,即滤波长度越小,噪声图像的纹理方向改变越小,当滤波长度增加时,矢量场的方向特征会变得明显^[7]。因此,为了更精确表达矢量场的可视化,在矢量场变化较平缓的区域,应采用较长的滤波长度进行积分,而在矢量场变化较剧烈的区域,则应减小滤波长度。

为了进一步分析滤波长度与重力矢量场变化的关系,进而获得合适的滤波长度计算公式,本文选取了矢量场复杂变化与缓和变化的两个区域,进行计算和分析。图 2(a) 的西北角坐标为 $(123^\circ\text{E}, 28^\circ\text{N})$,范围为 $2^\circ \times 2^\circ$,分辨率为 $1' \times 1'$;图 2(b) 的西北角坐标为 $(126^\circ\text{E}, 26^\circ\text{N})$,范围为 $2^\circ \times 2^\circ$,分辨率为 $1' \times 1'$ 。

从图 2(a) 可知,对于变化较剧烈的矢量场数据,当 $2L = 0.08d$ 时纹理特征较明显,纹理特征随着滤波长度的进一步增加,有“丢失”现象;从图 2(b) 可知,当 $2L = 0.5d$ 时纹理特征明显,随着滤波长度的进一步增加,纹理特征变化较小。大量的实验和分析表明,当矢量场变化较大时,滤波长度采用 $6/100 \sim 8/100$ 倍边长较合适,即 $2L = 0.06d \sim 0.08d$;当矢量场变化较平缓时,滤波长度采用 $45/100 \sim 50/100$ 倍边长为宜,即 $2L = 0.45d \sim 0.5d$ 。

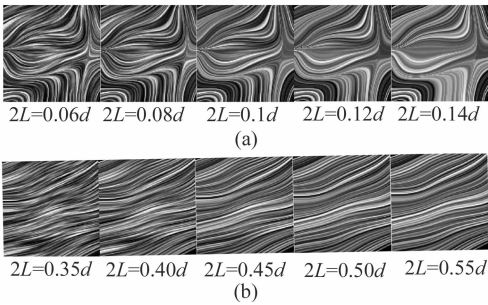


图 2 滤波长度对结果图像纹理特征的影响
Fig. 2 Effects of Texture Feature with Different Filter Length

2.3 纹理流线的统计特性分析

基于纹理的 LIC 算法结果图像的每一条流线均具有统计特性^[9]。每一条纹理流线所有像素点的平均值和方差的理想结果应满足：

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i = a \\ D(\bar{I}) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2 = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

式中, I_i 为纹理流线上像素点的强度值; a 为常

数。

因可视化过程中存在数据获取误差、数值计算模型误差和显示误差^[10],根据式(6)的实际计算结果应该为 $\bar{I} \rightarrow a$ 与 $D(\hat{I}) \rightarrow 0, D(\hat{I})$ 越小,表示一条流线上像素点的强度值的离散程度小,方向特征明显,那么精度就越高。因此,本文采用每条纹理流线的方差作为可视化精度的评定指标。

利用式(6)分别计算图 2 中两个区域若干纹理流线的方差,图 3 显示了纹理流线的方差随滤波长度的变化情况,其中图 3(a)为纹理流线的平均斜率差大于 0.3 的结果,图 3(b)为纹理流线的平均斜率差小于 0.05 的结果。

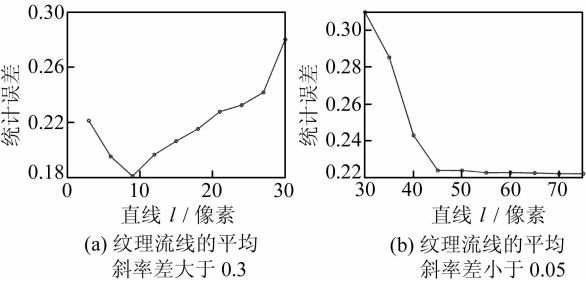


图 3 纹理流线的方差随滤波长度的变化

Fig. 3 Variations of Texture Streamline Variance with Filtering Length

由图 3(a)可以看出,当 $2L = 8 \sim 10$ 即 $2L = 0.06d \sim 0.08d$ 时,LIC 计算结果的精度较高;图 3(b)表明:当 $2L = 50 \sim 55$ 即 $2L = 0.45d \sim 0.5d$ 时,纹理流线的方差趋于稳定,继续增加滤波长度对 LIC 计算结果的改善不明显。此结果与图 2 的分析结果一致。

综合图 2 和图 3 的分析结果,可以得出针对重力矢量场的最优滤波长度公式:

$$2L = \begin{cases} 0.5 \times d, & 0 < k' < 0.05 \\ 0.1 \times d, & 0.05 \leq k' < 0.3 \\ 0.08 \times d, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

2.4 改进 FLIC 算法的结果

本文计算了封三彩图 1 所对应区域的重力矢量图,采用的纹理为白噪声。封三彩图 2 为采用方波滤波器、三角滤波器 FLIC 算法与改进 FLIC 算法计算得到的矢量图。彩色图像采用 HSV 颜色映像,根据重力异常的大小插值得到,单位为 mGal。采用不同滤波器对 LIC 计算结果的影响可以参阅文献[9]。为了用量化标准评价 LIC 计算结果,本文利用纹理流线统计特征来评价结果,对封三彩图 2 的横向中间线采样并统计经过中间线的每个像素点的纹理流线,共计算纹理流线 240 条,统计结果如封三彩图 3 所示。封三彩图 3

采用 FLIC 算法与改进方法计算了纹理流线的误差分布图,蓝色表示 FLIC 算法,绿色表示改进算法。由图可知,对于整个区域数据,改进方法精度略优于传统方法。计算时间方面,方波滤波器、三角滤波器 FLIC 算法与改进 FLIC 算法分别为 10.26 s、7.33 s 和 2.52 s。因此,改进算法比传统的 FLIC 算法要快得多;结果图像中流线变化缓和的区域纹理特征明显,而且在变化较大区域避免了封三彩图 1 中的纹理“丢失”现象。

3 重力矢量场可视化的对比实验

本文采用 EGM96 计算了我国东海海域的重力异常及垂线偏差数据(南北向分量与东西向分量,单位为"),该区域西北角坐标为(122°E, 31°N)、范围为 8°×8°、分辨率为 1'×1',采用的纹理为白噪声。

3.1 重力异常图的对比

采用常规方法,绘制了该实验区域重力异常的等值线填充图,并采用改进 FLIC 算法绘制了该区域的重力矢量图,纹理表示重力方向,颜色表示重力异常大小,计算结果如封三彩图 4 所示。其中,封三彩图 4(a)为常规重力异常表示方法,封三彩图 4(b)为采用本文方法的计算结果。从封三彩图 4 可以看出,两种方法对重力异常值的可视化结果表达一致。对比两幅图,改进 FLIC 算法的计算结果除了表达重力异常的分布这一维信息外,还可以表达任意点位的实际重力方向信息。图上每一个点的矢量方向为过该点作纹理的切线方向,对于整个区域的矢量细节信息表达明确。

3.2 垂线偏差图的对比

为了查看垂线偏差的分布情况,传统方法一般需要绘制两幅垂线偏差图(南北分量图及东西分量图)^[11]。本文在该实验区域采用常规方法绘制了两幅垂线偏差图,并采用改进 FLIC 算法绘制了一幅垂线偏差图,其方向采用垂线偏差的分量数据,大小为真实偏差大小。计算结果如封三彩图 5 所示。封三彩图 5(a)与封三彩图 5(b)分别表示采用传统方法得到的垂线偏差南北分量及东西分量等值线图,封三彩图 5(c)表示采用改进 FLIC 算法得到的结果,垂线偏差单位为(")。对比封三彩图 5 的 3 幅图,重力矢量方向的表达是一致的。与传统的垂线偏差分量等值线填充图比较,本文的表达方式同时反映了真实垂线偏差的大小和方向,具有更直观的优势。

4 结 语

本文以传统 LIC 算法为出发点,结合重力矢量场数据,通过选择合适的滤波长度来改进 FLIC 算法,实现了重力矢量场的可视化,既改进了可视化的精度又提高了计算效率。与传统的重力异常和垂线偏差等值线填充图相比,基于改进 FLIC 算法的重力矢量场可视化具有表达多维信息和更直观的优势。此外,本文还有一些内容需要深入研究,如可视化的不确定度等。

参 考 文 献

[1] 宁津生,郭金来. 地球重力场可视化数据挖掘平台 WHU-3Dgravity 的设计与实现[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(11): 945-949

[2] 张昆,张松林,刘祖强,等. 滑坡变形的三维可视化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(9): 795-798

[3] van Wijk J J. Spot Noise:Texture Synthesis for Data Visualization[J]. Computer Graphics, 1991, 25(4): 309-318

[4] Crawfis R A, Max N. Texture Splats for 3D Scalar and Vector Field Visualization[C]. Visualization'

93, Los Alamitos, CA, 1993

[5] Cabral B, Leedom L. Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution[J]. Computer Graphics, 1993, 27(4): 263-270

[6] Stalling D, Hege H C. Fast and Resolution Independent Line Integral Convolution[C]. Computer Graphics Annual Conference, New York, 1995

[7] Stalling D. Fast Texture-Based Algorithms for Vector Field Visualization[D]. Berlin: Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin(ZIB), 1998

[8] Hege H C, Stalling D. Fast LIC with Piecewise Polynomial Filter Kernels[M]. Heidelberg: Springer, 1998

[9] Hege H C, Stalling D. Fast LIC with Higher Order Filter Kernels[M]. Heibelberg:Springer, 1997

[10] Laidlaw D H, Kirby M, Jackson C, et al. Comparing 2D Vector Field Visualization Methods: a User Study[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(1): 59-70

[11] 王虎彪,王勇,陆洋. 联合多种测高数据确定中国边缘海及全球海域的垂线偏差[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(9): 770-773

第一作者简介:李振海,博士生,主要研究方向为物理大地测量学及地球重力场的可视化。
E-mail:lizhenhai666@163.com

Visualization of Gravity Vector Field Using Improved FLIC Algorithm

LI Zhenhai¹ LUO Zhicai^{1, 2, 3} WANG Haihong^{1, 2} LI Qiong¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traditional LIC algorithm with fixed filter length, an improved FLIC algorithm which filter length varied with the vector direction was proposed. And statistical variance of the intensities at all points in one texture stream-line was employed to evaluate the visualization accuracy. The computational efficiency and visualization accuracy can be improved simultaneously by the new method. Furthermore, visualization of gravity vector field was carried out by improved FLIC algorithm, using color information to distinguish gravity anomalies or deflections of the vertical, and texture to express the direction of gravity vector. The results indicate that the visualization of gravity vector field has obvious advantages including multi-dimensional information expression, image cognition and vector direction details.

Key words: improved FLIC algorithm; gravity vector field; visualization; filter length