

基于视觉感知的二维线积分卷积矢量场可视化算法

马颖异¹ 李洪平¹ 郭艺峰²

(中国海洋大学信息科学与工程学院 山东 青岛 266100)¹ (国家海洋信息中心 天津 300171)²

摘 要 在流场可视化领域,优化算法进行以及提升可视化效果一直是研究者关注的重点。近年来,也有很多评估可视化质量的研究和改进算法被提出,但是,在算法实现和质量评估的过程中往往面临流场方向的二义性以及矢量场方向和大小描述不清的问题。为了解决该问题,尝试将人类视觉感知理论应用于对流场可视化结果质量的评估以及可视化效果的提升上,并在此研究基础上利用模拟旋风数据对二维线积分卷积矢量场可视化算法进行了研究和实现。
关键词 视觉感知,流场可视化,风场,LIC,OLIC
中图法分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Visualization of Wind Vectors Using Line Integral Convolution with Visual Perception

MA Ying-yi¹ LI Hong-ping¹ GUO Yi-feng²

(College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)¹
(National Marine Information Center, Tianjin 300171, China)²

Abstract A great deal of efforts have gone into improving the algorithm and the display of the patterns in field of flow visualization during these years. However, in the process of algorithm implementation and quality assessment, the ambiguity of flow field direction and the unclear description of vector field direction and size are often encountered. In order to solve this problem, the theory of human visual perception was used to evaluate the quality of visualization results and improve the patters of flow. To put this design into practice, according to the visual perception, a display using wind vectors with line integral convolution algorithm was presented.
Keywords Visual perception, Flow visualization, Wind field, LIC, OLIC

矢量数据是流场中一类非常重要的数据,流场中的许多复杂动态现象(例如湍流、涡等)都与矢量数据紧密相关。从 20 世纪六七十年代计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)领域的航天航空飞行器设计,到目前该领域的列车气动性能设计、水动力学研究、气象动力学研究等,以及全球气候建模等领域的问题研究,矢量数据大部分由科学实验和数值模拟产生。

在过去的 50 年中,海洋气象预报领域有了快速的发展,预报模型提供了高精度、大规模的数值模拟矢量数据。但是,如今对矢量场可视化的研究仍处于初级阶段,现有的对矢量场的可视化技术大多很难被应用于实际工作中。线积分卷积法(Line Integral Convolution, LIC)^[1]是纹理可视化方法中应用最多的方法之一,在 LIC 算法基础之上,出现了很多优化算法,其中有快速线积分卷积算法(Fast LIC)^[2]、体线积分卷积算法(Volume LIC)^[3]、非定常流场线积分卷积算法(Unsteady Flow LIC, UFLIC)^[4]、定向线积分卷积算法(Orient Line Integral Convolution, OLIC)^[5]等。本文在上述研究的基础上,基于人类视觉感知理论,利用 LIC、OLIC 算法对模拟旋风数据进行了可视化实现和效果优化。

1 基于视觉感知的矢量可视化

随着流场可视化领域科学实验和数值模拟研究的深入,

以及计算机领域内科学计算能力的提升、存储容量的扩充以及并行计算技术的发展应用,研究人员把更多的精力投入到了流场可视化技术的优化与应用上。在流场可视化技术日趋丰富和多样的条件下,Laidlaw 等^[6]针对 6 种不同的二维矢量场可视化方法进行了正式的评估,同时证实等间距流线的矢量可视化效果比用箭头等几何图标形式表示的矢量可视化效果更好。

对矢量场可视化效果的评估,为更加科学的流场可视化研究奠定了基础。从评估过程中可以看到在表示矢量流场时,箭头可以有不同的长度、宽度、颜色和间距,采用何种箭头绘制矢量直接影响到整个流场的可视化效果,而对绘制方式的确定可以通过人类参与的试验进行测试和优化。研究人员认为上述的理论表明,将人类视觉感知科学应用于流场可视化,有助于可视化效果的优化。

1.1 视觉感知

人类的视觉感知过程十分复杂,光信号进入眼睛后,在神经节细胞的轴突位置形成视觉神经信号,视觉神经信号通过侧膝状体进入视皮层,最后被大脑理解生成视觉感知信息。图 1 给出人类的视觉感知过程。Marr^[7]提出人类的视觉感知过程即对信号的加工过程。在视觉感知过程中,初级视觉皮层(Primary Visual Cortex, V1)负责将视网膜图像转换成能被大脑解释分析的神经信号,在视觉感知过程中起到了至

马颖异(1983—),女,博士生,主要研究方向为流场可视化,E-mail:mayingyi2013@163.com;李洪平(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为高性能并行计算,E-mail:lihongping2005@yeah.net(通信作者);郭艺峰(1984—),男,硕士,主要研究方向为微服务与大数据并行计算。

关重要的作用。通过对大量实验的总结,Livingstone 等^[8]提出初级视觉皮层在 3 个不同区域分别对视觉信号进行不同形式的处理,包括获取局部色差信息、移动模式、位置和大小,值得注意的是这些解析过程是同步进行的。

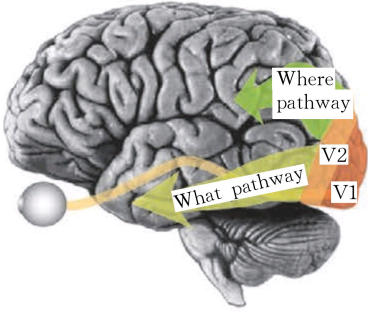


图 1 人类视觉感知过程^[9]

视觉感知过程中存在着一种完善的轮廓检测机制,该机制能够帮助人类识别出观测对象的边界路径^[10],而 V1 对于检测对象的边界以及对边缘的增强功能起着至关重要的作用。

经过实验证实,V1 中的神经元能够对与其平行的外物刺激做出敏锐的反应,相反,对那些与其方位和朝向不一致的外物刺激则没有反应。该特性使得人类能够准确识别外物的方位和朝向。

随着人类视觉感知理论的发展与完善,利用人类实验和模拟视皮质处理轮廓的计算模型,对矢量可视化效果进行有效的评估和改进,已成为流场可视化领域一个新的研究方向。

1.2 矢量数据的可视化

在流场可视化领域存在着多种分类体系,其中按照视觉表达方式分类的体系由 Post 等^[11]提出。依据该体系,流场可视化技术分为:直接可视化、几何图标可视化、基于纹理的可视化、基于特征的可视化。其中,几何图标可视化技术在科学实验和工程实践中得到了广泛的应用,常用的图标形式包括箭头、有向线段、椎体等。几何图标可视化方法形式简单、容易实现、易于理解,但是也存在前后遮挡、连续性差等缺点。

对矢量进行可视化,通常会把将要显示的矢量数据分解为位置、方向和大小,例如将风场数据的起始位置、风向和风速展现出来。流线^[12]是与流的方向相切的矢量线,它能够准确显示流的位置,但是对流的方向和大小很难表达。为了能够清晰地表述矢量场,可以在流线等矢量线的绘制过程中加入颜色来表示温度、压强、速度大小等信息。Fowler 等^[13]提出通过流线前后不同颜色的对比显示出路径的不对称,比箭头的显示效果更加明显。如图 2 所示,e 显示了流线宽度的变化对矢量速度和位置的影响,如 f 显示了流线宽度和长度的变化对矢量速度和位置的影响。

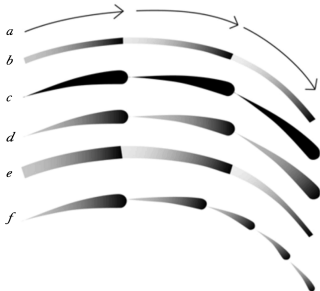


图 2 对箭头形式的优化^[15]

Ware^[14]对什么是有效的可视化表述进行了探讨,并且给出了实现原则和算法。

2 基于视觉感知的线积分卷积积算法的实现

LIC 算法是由 Brian Cabral 与 Leith Leedom 在 SIGGRAPH'93 上提出来的,该算法来源于一种运动模糊的思想,用卷积来表示流场方向。具体做法是在原始矢量场之上,选取与原始矢量场分辨率一致的噪声数据作为输入纹理,然后沿着原始矢量场的切线方向对该输入纹理进行低通滤波,得到输出纹理后便可用来描述矢量场的方向信息。LIC 纹理产生的过程如图 3 所示^[16]。

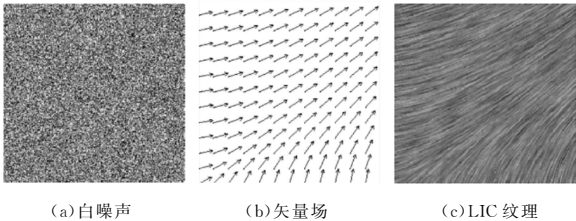


图 3 LIC 纹理产生示意图^[16]

在二维流场可视化中,LIC 的原理如图 4 所示。假设输出对象为 ρ ,当需要对这个数据进行处理时,首先沿着这个数据矢量图的正反方向采集数据,分析出流线 $\rho(\tau)$,其中 $-L \leq \tau \leq L$, L 是矢量上正反两个方向的长度。如果这两个长度的值相等,就可以确保这些数据是合理的; τ 取 0 时对应像素 P 。 P 的像素值 $T'(\rho(0))$ 是流线各点噪声纹理值的卷积:

$$T'(\rho(0)) = \frac{\int_{-L}^L k(\tau) T(\rho(\tau)) d\tau}{\int_{-L}^L k(\tau) d\tau}$$

其离散形式表示为:

$$T'(P) = \frac{\sum_{i=1}^N T(P_i) W_i}{\sum_{i=1}^N W_i}$$

其中, T 是输入的噪声纹理; $T(\rho(\tau))$ 为流线上各点噪声的纹理值; $K(\tau)$ 是卷积核,表示流线上各点与 P 的相关性; p_i 为流线(包括正反两个方向)上的 N 个离散点; W_i 为 p_i 对 P 的贡献,即卷积核 $K(\tau)$ 在点 p_{i-1} 和 p_i 之间覆盖的面积。

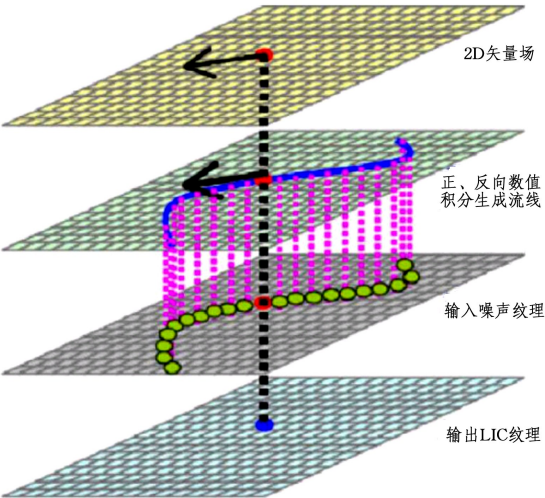


图 4 LIC 原理示意图^[17]

2.1 LIC 算法的实现与可视化渲染

LIC 算法的计算过程如图 5 所示,首先需要读入已知的流场数据,从而确定纹理图像的长宽值,并初始化白噪声纹理;然后需要将不规则网格上的流场数据插值到规则网格上,并归一化处理;最后根据白噪声纹理值、流场数据以及核函数进行卷积求和计算。

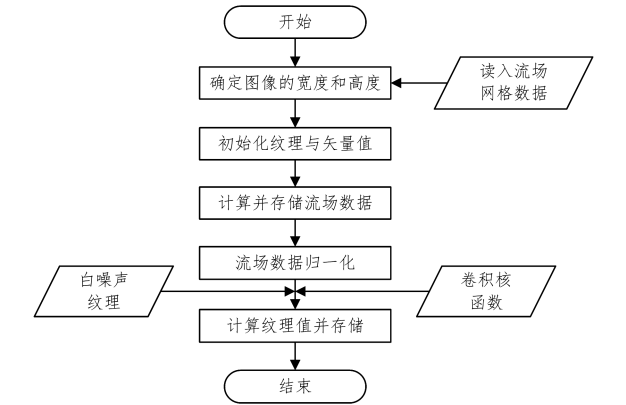


图 5 LIC 算法流程图

- 卷积部分是 LIC 算法的主要环节,具体步骤如下。
- (1)初始化正反两方向的卷积和以及权重: $C_p = C_b = W_p = W_b = 0$ 。
 - (2)分别计算正反方向的卷积和 C_p, C_b 及权重 W_p, W_b : 初始化当前步数 $Step$ 和当前流线总长 $TotalLen$;依据卷积核函数更新当前像素点的权重 w ,计算当前总权重和 $W += w$ 并求卷积和 $C += T * w$;更新当前步数 $Step$ 及流线的总长 $TotalLen$;根据当前积分步数 $Step$ 以及流线总长 $TotalLen$ 判断是否结束循环。
 - (3)计算输出纹理像素值 $T' = (C_p + C_b) / (W_p + W_b)$,并输出图像。

其中, C 表示积分卷积和, W 表示核函数权重和,下标 p 和 b 分别表示沿矢量场正反方向进行积分卷积的过程。 w 为当前噪声纹理对应的核函数权重, $SingleLen$ 为单步步长, $TotalLen$ 为流线总长度, $Step$ 为积分插值总步数, T 为输入噪声的纹理像素值, T' 为输出图像的像素值。该部分的流程图如图 6 所示。

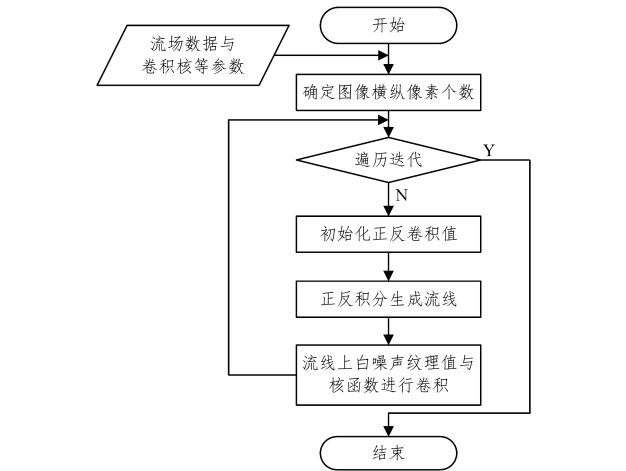


图 6 卷积流程图

本文在实现 LIC 算法的基础之上,利用视觉感知理论对

LIC 可视化效果进行了渲染,添加渲染后的过程如图 7 所示。

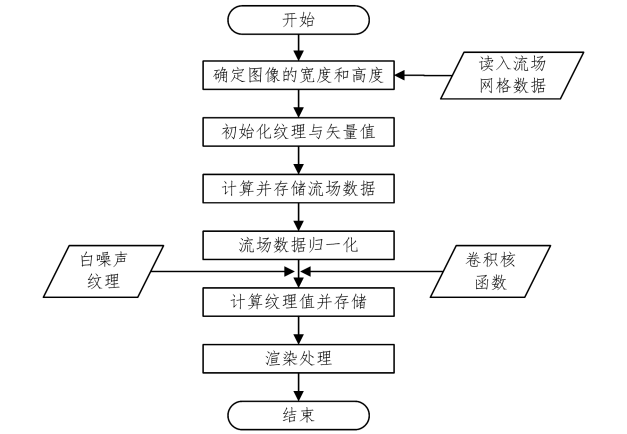


图 7 LIC 渲染流程图

2.2 OLIC 算法的实现与可视化渲染

LIC 难以表现流场中的方向信息,算法实现的流场图像在方向上存在歧义,如图 8 所示。

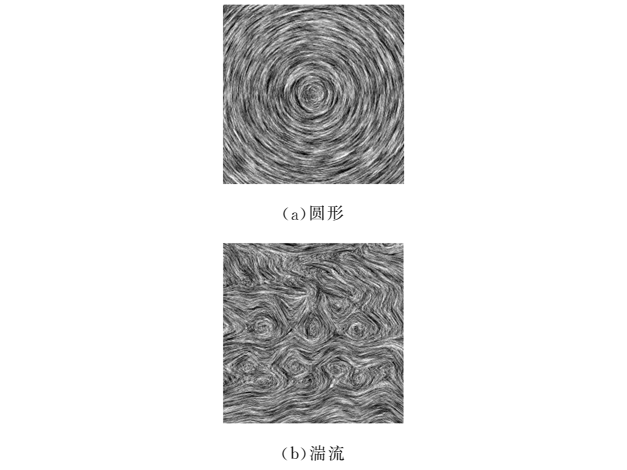


图 8 基于白噪声的 LIC 图像^[1]

OLIC 算法能够解决 LIC 方法在可视化流体方向上具有二义性这一问题。通过输入离散星点噪声纹理和一个斜坡状的卷积核函数,实现了对可视化矢量场方向进行描述的目的。这些输入的离散星点噪声纹理可以看作是稀疏地撒在一片纸上的一些墨点。矢量场沿着局部矢量的方向涂抹这些墨点,从而反映流场的方向信息^[18]。OLIC 法的纹理结果如图 9 所示。

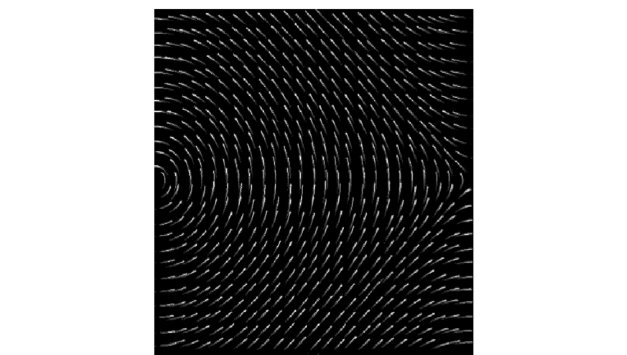


图 9 OLIC 可视化效果^[18]

本文在实现 OLIC 算法的基础之上,利用视觉感知理论对 OLIC 可视化效果进行了渲染,过程如图 10 所示。

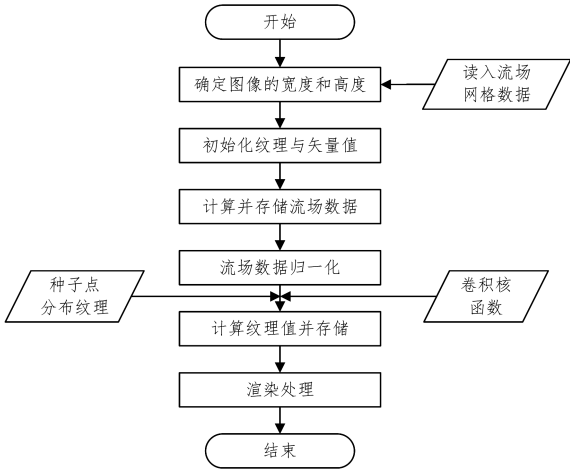


图 10 OLIC 算法流程图

3 实验结果与分析

本文实验在 Intel(R) Core(TM) i5-4210M CPU,4GB 内存,Intel(R) HD Graphics 4600 独立显卡的计算机上进行,软件环境为 VS2015,C++,OpenGL 及 GLSL。实验数据是由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research)提供的模拟旋风数据,数据场的分辨率是 512 * 512,分别对 LIC、LIC 渲染、OLIC、OLIC 渲染算法进行了实现。实验结果如图 11 所示。

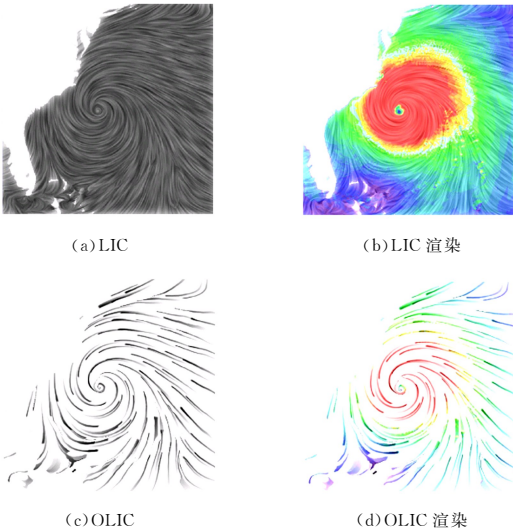


图 11 模拟旋风数据效果图

结束语 本文利用视觉感知理论对矢量可视化效果进行评估和改进,结合 LIC、OLIC 算法,进而对矢量的可视化效果进行了优化;将该方法应用于旋风流场可视化的实现,最后得到了优化后的旋风流场展现。

参 考 文 献

[1] CABRAL B,LEEDOM L C. Imaging vector fields using line integral convolution[C]// Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH;DBLP,1993:263-270.

[2] STALLING D,HEGE H C. Fast and Resolution Independent Line Integral Convolution[C]// Proceedings of SIGGRAPH95. 1995:249-256.

[3] INTERRANTE V,GROSCH C. Strategies for effectively visualizing 3D flow with volume LIC[C]// Visualization'97. IEEE, 1997:421-424.

[4] HEIDRICH W,WESTERMANN R,SEIDEL H P,et al. Applications of pixel textures in visualization and realistic image synthesis[C]// Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics. 1999:127-134.

[5] WEGENKITTL R,GROLLER E,PURGATHOFER W. Animating flow fields;rendering of oriented line integral convolution [C]// Computer Animation. IEEE Computer Society,1997:15.

[6] LAIDLAW D H,KIRBY R M,JACKSON C D,et al. Comparing 2D vector field visualization methods: a user study[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 1990, 15(6):1219-1226.

[7] MARR D. Vision:A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information[M]. New York;Henry Hoct and Co. ,1982.

[8] LIVINGSTONE M S,HUBEL D H. Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth[J]. The Journal of Neuroscience,1987,7(11): 3416-3468.

[9] WARE C,KELLEY J G W,PILAR D. Improving the Display of Wind Patterns and Ocean Currents[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2014,95(10):1573-1581.

[10] GARLANDINI S,FABRIKANT S I. Evaluating the Effectiveness and Efficiency of Visual Variables for Geographic Information Visualization[C]// International Conference on Spatial Information Theory. Berlin;Springer-Verlag,2009:195-211.

[11] POST F H,VROLIJK B,HAUSER H,et al. Feature extraction and visualization of flow fields[J]. Eurographics 2002 State-of-the-Art Reports,2002,1:69-100.

[12] WEISKOPF D,ERLEBACHER G. Flow Visualization Overview [M]// Handbook of Visualization. 2005:261-278.

[13] FOWLER D,WARE C. Strokes for Representing Univariate Vector Field Maps[C]// Graphics Interface Proceedings. 1989.

[14] WARE C. Toward a Perceptual Theory of Flow Visualization [J]. IEEE Comput Graph Appl,2008,28(2):6-11.

[15] WARE C,MITCHELL P,KELLEY J,et al. Designing Flow Visualizations for Oceanography and Meteorology using Interactive Design Space Hill Climbing[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE,2009.

[16] 徐华勋. 复杂流场特征提取与可视化方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.

[17] 刘占平,汪国平,董士海. 一种新的 VolumeLIC 可视化方法[J]. 中国图象图形学报,2001,6(5):470-474.

[18] 潘金京. 基于纹理的矢量场可视化方法研究[D]. 青岛:中国石油大学,2007.