

基于平面矢量场的可视化方法的研究

陈丽娜

(商丘师范学院 计算机科学系, 河南 商丘 476000)

摘 要:平面矢量场可视化是科学计算可视化的重要研究内容。矢量场以直观的图形图像显示场的运动,透过抽象数据有效洞察其内涵本质和变化规律,广泛应用于计算流体力学、航空动力学、大气物理和气象分析等领域。对平面矢量场进行可视化的方法有很多种,常见的有点图标法、流线法、线积分卷积法和拓扑分析法等。论文主要研究常见的可视化方法,分析它们的性能,并通过实际的例子,对具体的可视化结果图像进行比较。通过该研究,能够给人们在选择可视化方法时提供依据。

关键词:科学计算可视化;矢量场可视化;点图标法;流线法;线积分卷积;拓扑分析法

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)05-0108-04

Research of Visualization Methods Based on Planar Vector Field

CHEN Li-na

(Department of Computer Science, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

Abstract: The planar vector field visualization is an important part of visualization in scientific computing. Vector field can display field with an intuitive graphical image, at the same time, it can validly insight into the nature and variation through the abstract data, and it has been used widely in computational fluid dynamics, air dynamics, atmospheric physics and meteorology analysis, etc. The methods of the planar vector field visualization have many, including point icon method, streamline method, line integral convolution and topology analysis method, etc. In this paper, common used visualization methods are introduced, and the properties are analyzed, furthermore, the visualization images are compared through practical examples. Through this study, hope to provide a basis for people in choosing the visualization methods.

Key words: visualization in scientific computing; vector field visualization; point icon method; streamline method; line integral convolution; topology analysis method

0 引言

在科学研究和工程技术上,图形或图像是一种早已广为采用的显示和解释数据的基本手段,但随着大型科学计算以及数据采集技术的发展,在许多领域中数据量的剧增已远远超过了研究者的数据处理能力。早先的一些辅助显示和解释数据的方法和技术已远远满足不了要求,研究人员还需要一种能提高数据处理速度,能有效地辅助研究者理解数据、发现大量数据中所蕴含的自然规律和数据表现方法的工具,在这种背景下,科学计算可视化(Visualization in Scientific Com-

puting,简称 ViSC)应运而生。ViSC 利用计算机图形学和图像处理的先进技术与方法,采掘隐含在空间数据场中的信息,并转换成人类视觉可以感知的计算机图像。ViSC 的产生丰富了信息交流的手段,摆脱了前期借助于正文、数值量和平面静态图形作为信息媒介的现状,为一些很难用文字或数值量表达的现状(如 DNA 分子结构、飞行仿真实验、液体仿真、人脑结构等)提供了一种基于视觉信息的信息交流方式,大大提高了研究者对信息的理解速度和准确率^[1]。

科学计算可视化一经提出,很快就在计算机图形学的基础上融合了工作站技术、计算机辅助设计与交互技术、网络技术、视频技术,发展成为一门新兴的学科方向。在很短时间内,科学计算可视化已经被成功地运用到天体研究、地震预测、气象分析、航空航天、船舶、建筑等许多领域。科学计算可视化结果的分析过程中所带来的直观性、准确性等都给科学家们带来了很大方便,科学计算可视化的快速发展引发了科学计

收稿日期:2009-09-11;修回日期:2009-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10372053),河南省科技厅资助项目(092300410220);商丘师范学院青年科研基金资助项目(2009QN16)

作者简介:陈丽娜(1979-),女,讲师,硕士研究生,研究方向为科学计算可视化等。

算的计算风格的一次革命。

实现科学计算可视化具有多方面的重要意义。它可以大大加快数据的处理速度,使庞大的数据得到有效利用;能把不能或不易观察到的工程现象变为人们能观察到的过程和结果,以加深对产生这类现象的物理机制的理解,提出改进设计的具体措施;可以实现对计算过程的引导和控制,通过图形交互手段可方便快速地改变设计和计算的原始数据和条件,并通过三维图形、模拟图像或动画来显示和观察改变原始数据后对研究对象基本特性的影响,来达到对象优化设计的目的。

矢量场可视化是科学计算可视化中最具挑战性的研究课题之一。在物理学上,矢量场被定义为在指定的时刻,空间每一点可以用一个矢量唯一地描述的场。例如流体空间中的流速分布等可以用矢量场来表示。一般意义上,标量场中描述的特征和属性只有大小描述,没有方向描述,而在矢量场中描述的特征和属性不仅有大小,还有对方向的描述。矢量场通常可以使用微分方程来表示:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \text{ 即 } \begin{cases} \frac{dx}{dt} = P(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = Q(x, y) \end{cases}$$

在矢量场描述的区域中,每个点处都有相应的矢量描述如方向、大小等。

常用的矢量场可视化方法有很多种,如点图标法、流线表示法、基于纹理的线积分卷积法以及基于特征的拓扑分析法等。这些方法都可以表示场的结构,但是它们各有自己的特点。论文介绍了这四种最常见的可视化方法,并分析其性能,最后通过实际例子,分别用四种方法对其进行可视化,并对可视化的结果进行了比较。

1 常见的平面矢量场可视化方法

(1) 点图标法。

点图标法可以认为是直接可视化的方法。直接可视化是指几乎不经过任何预处理而直接应用如图标法或颜色编码等方法来可视化整个数据场的技术,它是一种全局可视化技术。应用较多的点图标法是箭头表示法,它是最简单的显示矢量场数据的方法。箭头法在具体实现时,对于每一个采样点,用具有大小和方向的箭头映射矢量的大小和方向,也即:该箭头在水平和垂直方向的分量分别代表该矢量的水平矢量和垂直分量,箭头的长度代表了该矢量的大小。

(2) 流线法。

流线法可以认为是几何可视化方法。几何可视化是指从矢量场数据中抽取诸如流线(Streamline)、迹线

(Pathlines)、脉线(Streaklines)、时线(Timelines)等几何形体来用于可视化的显示。在定常流中,流线、迹线、脉线三者是重合的。流线是流场中反映同一时刻流动变化趋势的一条几何线。矢量场的流线有如下性质:任意一点,流线的方向与该点的矢量方向一致。流体质点的运动规律用速度矢量来描述时可表示为下列形式 $V = V(r, t)$, 其中 r 为点 p 的位置矢量, t 表示时间。

流线是通过积分得到的。在流线上的每一个点都包含着此处的位置信息和矢量信息(如方向,大小等)。积分方式绘制流线通常要选定积分种子点,采用四阶龙格-库塔法向两个方向跟踪积分,可以比较精确地得到平滑的流线。

四阶龙格-库塔(4th Runge Kutta)积分法如下定义:

h 表示步长,正值和负值分别表示沿向量正方向和负方向积分, $F(x)$ 表示向量场在 x 处的向量值。

则从 x 到 x' 的计算公式为:

$$\textcircled{1} k_1 = \Delta t v(x_n)$$

$$\textcircled{2} k_2 = \Delta t v(x_n + \frac{k_1}{2})$$

$$\textcircled{3} k_3 = \Delta t v(x_n + \frac{k_2}{2})$$

$$\textcircled{4} k_4 = \Delta t v(x_n + k_3)$$

$$\textcircled{5} x_{n+1} = x_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} + O(\Delta t^5)$$

每条积分曲线均终止于下列三种情况之一:

* 终止于流场边界;

* 终止于结束点(即除马鞍点、入点、出点之外的其它临界点);

* 终止于另一起始点,在此情况下应由此点开始产生新的积分曲线。

(3) 线积分卷积法。

线积分卷积法是基于纹理的可视化方法。基于纹理的映射方法主要是应用纹理显示矢量场的方向信息,该方法综合了几何形状映射方法和颜色映射方法两者的长处,又克服了两者的各自存在的缺点。

线积分卷积法的基本思想是矢量场中任意一点处的局部特性是由一卷积核函数 $k(w)$ 沿一条从该点开始向前向后追踪出的一段流线积分的结果决定的^[2,3]。线积分卷积法用滤波器沿流线卷积白噪声图像,它很好地可视化了流线的方向性,反映了整个矢量场的结构。具体地说,线积分卷积法以白噪声作为输入纹理,输出纹理的每个像素值均通过积分卷积得到:首先基于该像素沿矢量正、反方向对称积分得到流线,将流线上所有像素对应的输入噪声值按卷积核

参与卷积,结果作为输出纹理的像素值。计算公式:

$$I(x_0) = \frac{1}{\int_{-L}^L K(s)ds} \int_{s_0-L}^{s_0+L} K(s-s_0)T(\sigma(s))ds$$

其中 $T(x)$ 是输入白噪声图像, $\sigma(s)$ 是通过 x_0 的流线, $K(s)$ 是卷积核函数, 积分长度为 $2L$ 。采用盒式卷积核函数 $K(s)$ 进行线积分运算, 其离散计算公式如下:

$$I(x_0) = \frac{1}{2n+1} \left(\sum_{i=-n}^{i=n} T(x_i) \right)$$

(4) 拓扑分析法。

拓扑分析法是基于特征的可视化方法。基于特征的可视化方法指从数据集中抽取有意义的结构、模式或用户感兴趣的区域——特征, 得到高度抽象的场信息。

拓扑结构分析法是以拓扑结构来显示场的结构^[4,5], 它主要基于临界点理论: 矢量场拓扑由临界点、连接临界点的积分曲线或曲面组成。在实现时, 先寻找临界点, 基于临界点附近矢量对位置的偏导数矩阵(也称为雅可比矩阵)将临界点分类, 雅可比矩阵特征值的实部的正负分别表示吸引和排斥、对应收敛和发散, 共扼复数对应旋入、旋出, 如此将临界点分为交点、聚点和马鞍点以及中心点(同心圆临界点), 交点聚点各自进一步分为吸引和排斥两种, 在包含物体的场中需要将壁点(wall point)分为入点和出点, 最后用积分曲线或曲面连接临界点, 一般从马鞍点、入点和出点出发, 以特征向量为矢量作积分, 终止于其它临界点或场边界^[6,7]。二维临界点的分类如图 1 所示。

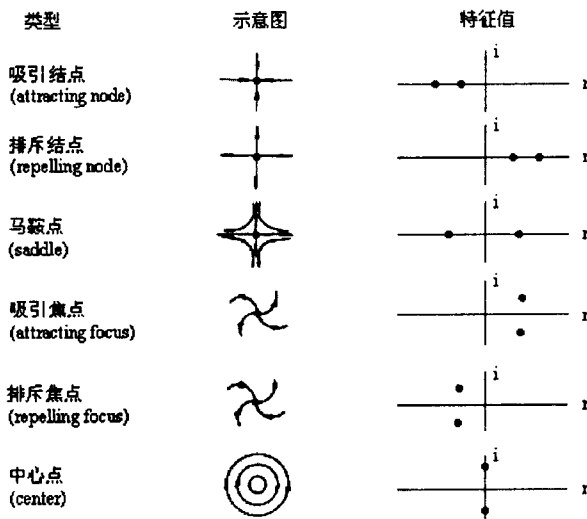


图 1 二维临界点分类

2 可视化方法的性能研究

几种可视化方法都是很成熟的方法, 经常被用在

各种数据场中对数据进行可视化。而不同的方法又各有自己的特点, 下面重点对几种方法的性能做一对比研究。

点图标法最简单, 可以较好地反映出矢量的方向和大小信息, 并且很容易实现。对于不太复杂的矢量场, 使用该方法简单直观, 可以同时描述出矢量场的大小和方向。但对于采样密集的数据场, 将所有矢量逐点映射为点图标常会导致所生成的图像杂乱无章, 而显示太少又不能准确地把握矢量场的变化情况。另外, 对于变化突兀的矢量场, 该方法在实现时, 有可能需要对矢量的大小按比例地缩放, 这样的结果使得图标的长度并不能真实地代表矢量的大小, 而只是矢量大小的近似表达。

与点图标法相比, 流线法所显示的图像是连续的, 可以更好地观察矢量场, 能在一定程度上表现出场的连续性。但是流线法实现起来稍微复杂一点, 而且也存在一定的缺陷, 因为该方法可视化质量的好坏, 严重依赖于初始质点源位置的选取, 选的不好或过少常常会漏掉矢量场中重要的特征和细节, 选的过于密集时, 又会造成视觉上的混乱。所以该方法在很多情况下被基于纹理的可视化方法所取代。

线积分卷积法应用纹理来显示矢量场的方向信息。该方法即使对于矢量方向变化很大的区域, 也能揭示出矢量的方向, 可以较好地表达出矢量场的细节。由于卷积后的图像具有像素分辨率的连续性, 描述数据场的信息非常丰富。但该方法也有缺陷, 它只考虑了沿速度方向那条折线段上的像素点对该点的作用, 没有考虑与速度垂直方向上邻近的像素也可能对其纹理值产生影响, 因而生成的图像高频噪声较大。还有一个最大的缺点, 就是它只能描绘出矢量场的方向信息, 却不能够描绘出矢量场的大小信息。而对于矢量场来说, 两者都是描述一个矢量场的必不可少的部分。这种方法近来又可以借助于矢量动画来显示其矢量的大小信息, 矢量大的地方动画移动的速度也快。

拓扑结构分析法直观简洁, 是重要而且比较成功的特征可视化方法。矢量场的拓扑结构抽取了矢量场的主要结构, 忽略了其它次要的信息, 事实证明, 在侧重于考虑场的特殊结构时拓扑分析法显示出了较大的优越性。但是将该方法应用在复杂而信息丰富的流场中时, 可视化的结果可能是成簇的、混乱的, 难以正确地解释流场的特征。而将该方法应用在特征不很明显的场中时, 又观察不到场的特征, 此时, 该方法又没有点图标等简单方法更能表达场的信息了。所以, 在使用拓扑结构分析法时, 也可结合其它方法一起使用, 确保既能显示场的主要特征, 又能使特征不明显的矢量

场也可以得到理想的可视化结果。

3 可视化方法在特定矢量场中的应用

可视化方法可以对任意的矢量场,比如风场、海洋流场等进行可视化。比如气象污染学家所关心的是雾的变化和风场的关系,这时候需要清晰地显示风场的特征,这就要求显示清晰的风场的拓扑图像,用来描述场的全局的结构。再比如渔民养鱼时,关心的是哪个海洋领域最适合海洋鱼类的生活,这时候就需要了解海洋流场的特征了(当然,这里除了海洋流场的矢量信息需要关注外,海洋的一些标量,比如像温度、盐度等特征也是很重要的)。除了现实生活中常见的矢量场外,可视化方法还可以对系统方程所代表的任意的矢量场进行可视化。为了更加清晰直观地说明问题,采用某一典型的系统方程所代表的矢量场作为研究对象,下面给出该系统方程^[8]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(3-x-5y) \\ \frac{dy}{dt} = y(-1+x+y) \end{cases}$$

$$(-5 \leq x \leq 5, -5 \leq y \leq 5)$$

该系统方程代表的是一常见矢量场,它具有矢量场的比较典型的特征,比如矢量场的方向和大小有比较明显的变化、有马鞍点等。

使用 VC++ 6.0 作为开发工具,在 OpenGL 环境下,用文中提到的几种典型方法对其进行可视化,其可视化的结果图像分别如图 2~图 5 所示。

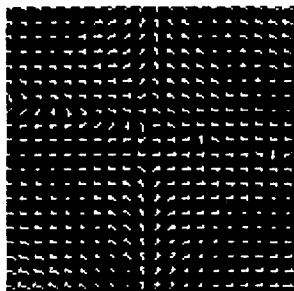


图 2 点图标法

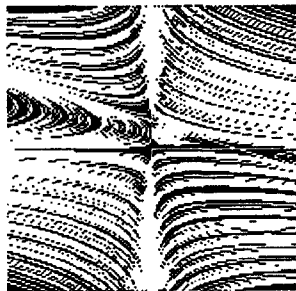


图 3 流线法

4 结束语

通过对常见矢量场可视化方法的研究,发现没有哪一种方法可以称为是“最好”的方法。箭头法简单直

观,可以反映出矢量的方向和大小信息,且容易实现;流线法可以表达出矢量场的连续性;线积分卷积法可以较好地表达出矢量场的细节;而拓扑结构分析法则可以忽略场的次要信息,在侧重于考虑场的特殊结构时显示出了较大的优越性。因此,在具体使用的时候,人们可以根据不同的目的而选择合适的可视化方法,比如需要考虑数据场的细节时,可以考虑使用线积分卷积的方法,而对于数据量比较大的矢量场,如果仅侧重考虑场的特殊结构,那么拓扑结构分析法又是较好的选择了。当然,在必要的情况下,也可以同时使用多种可视化方法。

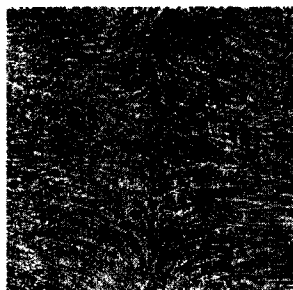


图 4 线积分卷积法

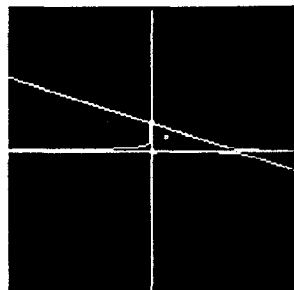


图 5 拓扑分析法

参考文献:

- [1] 石教英,蔡文立. 科学计算可视化算法与系统[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] Risquet C. Visualizing 2D flows: Integrate and draw[C]//In: Proc. of the 9th Eurographics. Workshop on Visualization in Scientific Computing. Germany:[s. n.], 1998.
- [3] 刘占平,汪国平,董士海. 一种新的 VolumeLIC 可视化方法[J]. 中国图像图形学报,2001,6(5):470-474.
- [4] 张 文,李晓梅. 基于流线纹理合成的 2D 矢量场可视化[J]. 中国图像图形学报,2001,6(3):280-284.
- [5] 陈丽娜. 用拓扑结构分析法实现平面向量场可视化[J]. 西南民族大学学报:自然科学版,2009(1):183-186.
- [6] Tricoche X, Scheuermann G, Hagen H. A Topology Simplification Method for 2D Vector Fields[C]//IEEE Visualization'00 Proceedings. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000:359-366.
- [7] 陈丽娜,杨冠杰. 快速检测流场中涡核区域的角度函数法[J]. 工程图学学报,2008(1):146-149.
- [8] 张锦炎,冯贝叶. 常微分方程几何理论与分支问题[M]. 北京:北京大学出版社,2000.

《计算机技术与发展》邮发代号:52—127

欢迎投稿,欢迎订阅!