

一种流线放置方法*

王少荣¹⁺, 吴迪^{2,3}, 汪国平^{2,3}

¹(北京林业大学 信息学院, 北京 100083)

²(北京大学 图形与交互技术实验室, 北京 100871)

³(机器感知与智能教育部重点实验室(北京大学), 北京 100871)

Streamline Placement Strategy

WANG Shao-Rong¹⁺, WU Di^{2,3}, WANG Guo-Ping^{2,3}

¹(School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

²(Graphics and Interactive Technology Laboratory, Peking University, Beijing 100871, China)

³(Key Laboratory of Machine Perception (Peking University), Ministry of Education, Beijing 100871, China)

+ Corresponding author: E-mail: shaorongwang@gmail.com

Wang SR, Wu D, Wang GP. Streamline placement strategy. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (2)): 42-52 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12023.htm>

Abstract: The Streamline based method is one of the most important vector field visualization methods. The physical-related feature was seldom considered in the past streamline placements algorithms. A streamline placement algorithm for 2D and 3D vector field is introduced in this paper. The study measures the difference between the inflow and the outflow to evaluate the local spatial-varying feature at a specified field point. A Difference of Inflow and Outflow Matrix (DIOM) is then calculated to describe the global appearance of the field. The study draws streamlines by choosing the local extreme points in DIOM as seeds. DIOM is somewhat like flow divergence and is physics-related and thus reflects the intrinsic characteristics of the vector field. The strategy performs well in revealing features of the vector field, even with relatively few streamlines in both 2D and 3D vector field.

Key words: vector field visualization; streamline placement; difference of inflow and outflow

摘要: 基于流线的可视化方法是重要向量场可视化方法. 以往的流线放置算法中很少考虑向量场的物理性质. 提出了一种适用于 2D 和 3D 向量场的流线放置算法. 为了度量向量场根据不同空间位置而变化的性质, 引入了向量场的出入流差异属性, 计算出流差异矩阵用于描述向量场的全局属性. 选取出入流差异矩阵中的最大值作为流线的种子点. 由于出入流差异度和散度定义上有相似性, 因而也具有一定的物理性质, 能够反映出向量场的内在属性. 该方法适用于 2D 和 3D 向量场, 可以使用少量的流线很好地揭示出流场中的重要信息.

关键词: 向量场可视化; 流线放置; 出入流差异

向量场在科学计算和工程分析中扮演着非常的重要角色. 它描述了许多非常重要常见的物理现象. 向量场

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2010CB328002); 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA120301); 北京林业大学新进教师科研启动基金(BLX2011019)

收稿时间: 2012-05-30; 定稿时间: 2012-09-29

可视化是理解向量场运动变化规律的有力工具,在计算和工程分析中发挥着重要作用,已被广泛应用于航空航天、地质勘探、仿真、临床医学等领域,具有非常重要的实际意义和研究价值.基于流线的可视化方法是向量可视化方法中最为重要的方法之一.流线可视化方法一方面提供了一个稀疏表达,以重点关注显著特征,另一方面容易与其他可视化方法进行协同.

流线可视化的质量严重依赖于流线种子点位置选取、流线的数量、长度等:设想选出一组流线来代表整个向量场,(流线的位置)如果放置过多的流线则会导致向量场的流线杂乱,影响对整个向量场数据的理解;但如果流线放置太少,则会导致一些重要特征遗失.为了评价流线可视化的质量,Verma 等人提出一个准则^[1]:(1) 范围:流线应该覆盖所有的定义域,不能遗失向量场中的重要特征;(2) 一致性:流线分布的在定义域中均匀或者不均匀分布;(3) 连续性:与短流线相比,倾向于使用连续的长流线.过去已经有很多流线放置算法,如均匀流线算法^[2]、Verma 等人提出的基于特征的算法^[1].

与2D流线可视化类似,在3D流线可视化中,如果流线数目比较多,整个流场效果显得很杂乱,甚至出现流线相互遮挡的情况.文献[3]提出了均匀流线算法,Chen 等人^[4]提出了基于特征的可视化方法.但现在对于3D流线依然没有系统的可视化方法.

本文提出了一种新的流线放置方法.该方法的核心思想是:流场在某个区域内发生的变化越大,则该位置越能代表流场的重要特征.根据这种思想,我们通过计算流体流经一个封闭区域时被该区域截出的出入面大小的差值来衡量流场在该区域发生变化的程度.

因此,我们定义一个出入流差异矩阵(difference of inflow and outflow matrix,简称 DIOM),作为一个衡量向量场特征的度量,并且提出一种基于 DIOM 的流线放置算法.如图 1 所示,有流场流入和流出一个圆形区域,流入圆形区域时有一个相交界面,称为入界面,同样地,流出圆形区域时也有相交面,称为出界面.如果入界面和出界面的面积(3D 情况,2D 情况则为长度)不相等,则说明流体在此处有所变化.出入界面的差异越大,流场的变化越大. DIOM 与散度有些类似,散度用于描述通量源的密度.一般说来,只有在向量场的源(source)或者汇(sink)的位置,散度才不为 0.如图 1 所示,圆形区域不存在源,圆形区域内的散度处处为 0;对应地,若入界面和出界面的面积(3D 情况)不相等,则 DIOM 在该处值非 0.



图 1 经过某一区域的出入流

在本文的流线放置算法中,流线种子点优先选取统计矩阵中的最大值位置.因为 DIOM 与散度有些类似,具有一定的物理意义,故我们的算法有能力用较少的流线来反映流场中的重要特征,因而使用到的流线较少,杂乱现象大为减少.与以往的算法相比,本文优先考虑的是流线密度变化最快之处,而不是流线密度最大之处,这是因为前者能够更好地反映流场特征.直观地说,如果某个区域流线密度变化不大,这些流线在空间上就近似均匀分布,只需要不多的流线即可概括描述;如果某个区域流线密度变化剧烈,就需要更多的流线来表征变化细节.

在以往的流线算法中,流线生成与流线之间的距离有关.这可能导致视觉效果上的不连续,尤其在临界点附近的流线更是如此.在我们的流线算法中,只生成尽可能长的流线.由于流线没有被突然中断,流线的这种可视化模式更容易被理解和接受.

1 相关工作

根据不同的目标,有很多不同基于流线的可视化方法.它们大致分成 4 类:基于图像的方法、直接绘制的方法、基于特征的方法、向量场相关的方法.

基于图像的方法在图像空间中根据流线定义了一个能量函数,并寻找这个函数的最小值.Turk 等人提出的

算法^[5]具有指数级的时间复杂度.Mao 等人^[6]将算法推广到 3D 空间的参数化曲面上.Schlemmer 等人^[7]引入了一种基于图像的方法.其中,流线密度通过用户定义的密度函数来控制.在实现时,采用贪心算法将新流线一条一条地加入.

基于特征的可视化方法主要关注感兴趣的特征的提取.各种特征用于可视化,例如漩涡、冲击波、分界线等等.这些特征有着特定的物理属性.特征被提取出来之后,可以使用标准的可视化技术进行绘制^[8].Helman 等人^[9]对 2D 向量场的拓扑结果进行分析,对临界点进行检测和分类,并以此作为可视化基础.Scheuermann 等人^[10]提出了生成高阶的临界点的方法.Verma 等人^[11]提出了一种基于特征模板的方法.Ye 等人^[11]将算法扩展到 3D 情况.Wischgoll 等人^[12]在 2D 向量场中生成封闭的分界线.Theisel 等人^[13]连接鞍点以进行 3D 向量场拓扑骨架的可视化.Weinkauff 等人^[14]使用更高阶的临界点进行扩展.临界点的计算有时候是比较困难的问题,尤其在几个临界点相邻的情况下.

直接绘制方法使用一定的启发式来放置流线方法,以便不用计算全局的能量函数也可以得到一个良好的种子点选取结果.Jobard 等人^[15]显式地控制相邻流线间的距离以得到期望的流线密度.文献[16]扩展到不稳定场,其多分辨率流场可视化应用在文献[17]中有所描述.通过定义 3D 欧几里德距离度量,Mattausch 等人^[3]将这个策略扩展到 3D 向量场.Mebarki 等人^[18]采用了一种贪心算法.但该算法很难扩展到 3D 空间的曲面上去.Liu 等人^[2]通过在加入新流线时优化流线延长顺序,改进了流线的连续性.Rosanwo 等人^[19]提出一种双流线模型的种子点选取方法.

流线相似度和流线密度是重要向量场特征.向量场相关的方法主要关注根据相似性度量定义的、与向量场本身相关的重要特征.新流线在流线差异性最大的地方加入.Chen 等人^[4]提出了基于相邻流线距离、形状和方向的形似性度量.Li 等人^[20]提出了基于流线间距离变换的相似性度量.Li 等人^[21]提出一种在 3D 图像空间里的流线放置算法,在图像空间控制种子点的生成和流线的产生,以免产生视觉上的杂乱感.Schlemmer 等人^[7]定义了一个流线的区域密度,通过区域的流线像素数和区域像素数的比率作为参数控制流线的放置.

流线简化是利用聚类,使用简化流线的方法对向量场进行简化.关于 2D 向量场的简化有很多技术.其中一类常见的简化技术是聚类,通过向量本身的聚类构建出整个向量场的层次化结构.Heckel 等人^[22]提出了一种自顶向下的简化方法.Telea 等人^[23]提出了一种自底向上的简化方法.开始将每个节点看作一个类,选择合适的相似度量,每次将最相似的两个相邻类合并成一个类,反复进行这个过程直到最后合并成一个类.Du 等人^[24]提出了一种用质心 Voronoi 图镶嵌的简化和可视化方法.

在 3D 流线绘制时,需要从三维空间投影到二维屏幕上,这些流线可能相互重叠,相关的深度信息也可能丢失.因此,二维向量场的流线方法不能简单地扩展到三维向量场中.Verma 等人^[11]提出一种基于拓扑的种子点选取算法.Ye 等人^[11]扩展了这种方法到三维空间.Mattausch 等人^[3]将文献[15]中的算法扩展到 3D 向量场.Li 等人^[21]提出了一种基于图像的流线方法,以控制在图像空间的流线生成,减少和避免流线绘制时的视觉杂乱现象.

2 基于出入度的流线放置算法

在本文中,算法的精度和流线的精度有很大的关系,为了保证计算的精确性,我们使用四阶的 Runge-Kutta 方法来计算流线.为方便起见,我们先给出一个定义.对于向量场中任意的一点,如果该点的向量不是零向量,则存在一条经过该点流线.如果这条流线满足以下情形之一,则称该流线为经过该点的完整流线:(1) 起点和终点相连,形成闭合通路.即该流线为闭合曲线;(2) 流线端点位置处的向量值为 0 或者流线端点在向量场的边界.

下面,我们先定义一个出入流差异矩阵,然后根据这个矩阵提出一种迭代的流线放置算法.

2.1 出入流差异矩阵

首先,以种子点均匀的方式产生一个覆盖整个流场定义域的完整流线集合.给定 2D 向量场,将其定义域分成 $m \times n$ 个正方形(3D 情况, $m \times n \times k$ 个立方体).找出每个区域的中心点,过这个中心生成一条完整流线,为了方便讨论,对于不同位置种子点生成的重合的流线算不同的流线.这样得到一个包含 $m \times n / m \times n \times k$ 条完整流线的完整流线集.

给定向量场的一个点 p, c_p 是以 p 为中心 r 为半径的圆/球. 我们把 c_p 均匀地分成曲线/曲面单元. 每个单元 u_i 有一个外向权值 $w_{out}(u_i)$ 和一个内向权值 $w_{in}(u_i)$. 外向权值和内向权值的初值均为 0, 且 $0 < w_{in}, w_{out} < 1$. 给定一个给定完整流线集 S_{line}, S_{sub} 为 S_{line} 中所有和 c_p 的流线集合. 对于 S_{sub} 中的每条流线 l , 设 cp 为 l 和 c_p 的交点, $N(p)$ 为 S_{sub} 和 c_p 所有交点的数目. V 为向量场在交点 cp 处的向量值, 如果 V 的方向为朝内, 则 cp 被称为内向交点, 否则称为外向交点. 对于每个内向交点 cp_i , 我们可以计算其对每个单元 u_j 的内向贡献值 $Con_{in}(cp_i, u_j)$: $Con_{in}(cp_i, u_j) = F(Dis(cp_i, u_j))$. 其中, $Dis(cp_i, u_j)$ 为 cp_i 到 u_j 的距离, $F()$ 为递减函数. 如图 2(a)所示, 分割单元用不同的灰度标记, 单元线的粗细代表贡献的大小, 单元线越粗, 贡献值越大. 图 2(b)表示, 离交点越近, 贡献值越大.

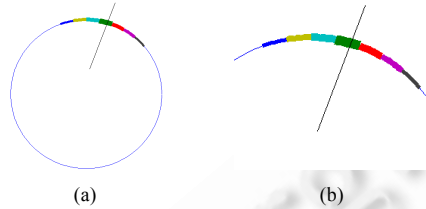


图 2 出入流贡献

每个单元 u_j 的权值可以通过公式 $w_{in}(u_j) = \sum_i Con_{in}(cp_i, u_j)$ 更新. 其中, 权值 $w_{in}(u_j) = 1$, if $(w_{in}(u_j) > 1)$. 给定点的内向贡献值为所有单元的权值总和: $Con_{in}(p) = \sum_j w(u_j)$.

外向贡献值可以用同样的方式进行计算. 对向量场进行均匀采样, 对于每个点 p , 计算其内向和向外贡献值 $Con_{in/out}(p)$. 这样得到一个密度矩阵 $Mat_{density}$, 外向贡献值矩阵 Mat_{out} , 内向贡献值矩阵 Mat_{in} , 有符号出入流差异矩阵 Mat_{SDIO} , 出入流差异矩阵 Mat_{DIO} 定义如下:

$$\begin{aligned} Mat_{density} &= (N(p)), \\ Mat_{out} &= (Con_{out}(p)), & Mat_{in} &= (Con_{in}(p)), \\ Mat_{SDIO} &= Mat_{in} - Mat_{out}, & Mat_{DIO} &= abs(Mat_{SDIO}). \end{aligned}$$

容易推断出以下属性:

1. 对于 Mat_{in}, Mat_{out} 中的任意元素 $a, a > 0$.
2. 如果 $Mat_{in}(p) > 0$ and $Mat_{out}(p) = 0$, p 点附近存在汇聚点.
3. 如果 $Mat_{in}(p) = 0, Mat_{out}(p) > 0$, p 点附近存在发散点 p .
4. 如果 $Mat_{SDIO}(p) > 0, Mat_{in}(p) > Mat_{out}(p)$, 如果有流通过 p 所在区域时, 流有被“挤压”的效果.
5. 如果 $Mat_{SDIO}(p) < 0, Mat_{in}(p) < Mat_{out}(p)$, 如果有流通过 p 所在区域时, 流有“膨胀”的效果.

如图 3 所示为 2D 向量场可视化的例子. 图 3(a)为向量场的图标可视化效果. 图 3(b)为示意的流线采样效果. 图 3(c)为 DIOM, 图 3(d)为密度矩阵. 向量差异在 DIOM 比密度矩阵要更强.

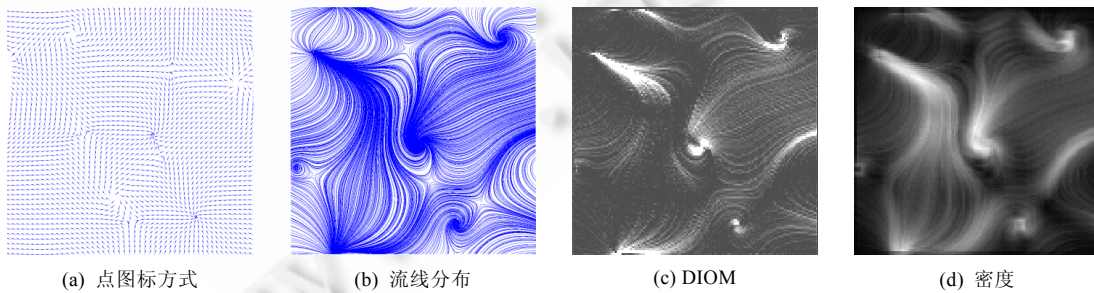


图 3 2D 向量场和相关矩阵

图 3(b)和图 3(c)分别为出入度矩阵和密度矩阵.由于取值是绝对值,出入度矩阵只关心流场的变化,并不能区分汇聚或者发散点.流线分布图中的汇聚点和发散点非常明显,出入度矩阵和密度矩阵在相应位置也有较大的取值.另外,流线分布图中的鞍点可以明显观察到,但密度矩阵图中则不明显,出入度矩阵中在鞍点附近有一些位置的取值比较高.

如图 4 所示为 3D 向量场可视化的例子.图 4(a)为图标方式可视化效果.图 4(b)为示意的流线采样效果.图 4(c)为 DIOM,图 4(d)为密度矩阵.

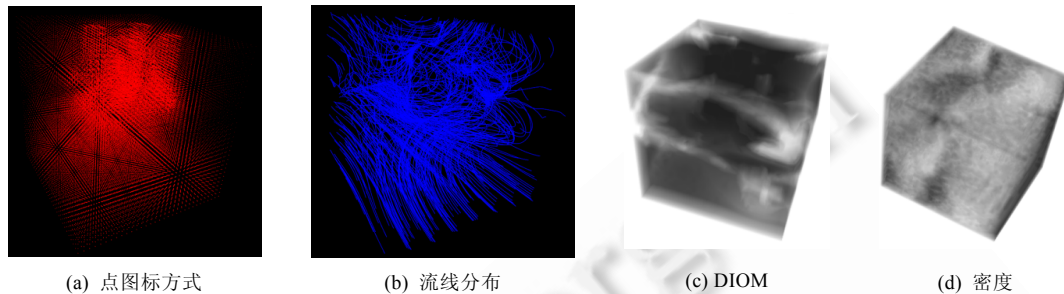


图 4 3D 向量场和相关矩阵

2.2 3D DIOM计算

为了计算出点和入点对单元的贡献,需要对将球面划分成一系列大小形状完全一致的多边形,并且这些多边形能以不重叠的方式覆盖整个球面.一般来说,球面可以划分成三角形、菱形、六边形.为了简化计算,我们将球面划分成一系列的三角形.虽然这些三角形不完全一致,但在保证三角形数量的情形下,计算误差不大.在出入贡献矩阵计算中,需要计算出每个交点对每个单元的影响.交点对单元的贡献与交点到单元的距离有关,距离越大,贡献值越小,当距离大于给定值时,贡献为 0.

2.3 基于DIOM的流线放置策略

我们的流线放置策略试图按照流场变化大小对候选流线种子进行排序,流场变化大位置处的候选种子点优先级更高.本文使用基于前面定义的 DIOM 矩阵来代表流场的变化规律.在选取种子点时,优先找出 DIOM 矩阵中的最大值,取该位置代表的向量定义域中单元的中心作为种子点.在不引起误解的情况下,我们将其简称为以该位置作为种子点.

算法的主要思想是:给定向量场 V ,计算其入度矩阵、出度矩阵和差值矩阵、绝对差值矩阵.按照绝对差值矩阵中元素大小排列种子点优先级.每选取一个种子点以后,修改绝对差值矩阵的值.反复进行这个种子点选取过程,直到满足停止条件.

2.3.1 初始化

我们可以选取出入流差异矩阵的最大值作为初始种子点.因为出入流差异矩阵中数值大的位置意味着通过该处的流线变化大,或者向量幅值变化大或者方向改变大,因而代表此处流场特征更为显著.对于有多个具有相同值候选种子点的情况,我们可以随机选取其中之一.这样,对于诸如常量场,种子点的选取也具有随机性,避免逐行或者逐列进行.

对于向量场中存在鞍点等特殊点的情况,为了展现该数据场的拓扑结构,我们更倾向于选取和拓扑相关的临界点作为首选的种子点.与密度矩阵相比,出入度矩阵在鞍点附近的数值较高,但鞍点位置的数值还是比较小,如果仅仅以统计数值作为种子点选取标准,鞍点处就很有可能不会有流线分布.因而我们希望将鞍点位置附近预先设置流线.对于其他的临界点则不做特殊处理.

我们使用文献[25]中的方法找出临界点中的鞍点.我们找出鞍点的两个主方向,在两个主方向上各放置两个种子点,得到 4 个种子点,使得鞍点被 4 条流线所围绕,鞍点的特征得以突出.

2.3.2 迭 代

每个迭代过程中都包含如下两个步骤:

1. 选取种子点,生成一条完整流线.
2. 根据新生成的完整流线更新统计矩阵.

在步骤 1 中,除了初始化时在鞍点附近找种子点以外,其他每次迭代过程,种子点的选取都是找出统计矩阵中数值最大的.同样地,对于有多个具有相同值候选种子点的情况,我们可以随机选取其中之一.

每添加一条完整流线之后,意味着流线及附近特征的优先级下降.如果不更新相关矩阵信息,下一个种子点仍然可能在上一个种子点附近,这样生成的流线之间的距离将过小.因此,每次生成一条完整流线之后要进行步骤 2,更新统计矩阵.如果鞍点附近的种子点首先选取,则等到生成完流线后再更新 DIOM.

在本文中,我们认为新生成完整流线对某个位置处特征的影响与该位置到流线的距离有关.对于新生成的完整流线,我们计算出它在统计矩阵所占的所有位置集合 S_p . 对于集合内的位置,我们不希望再生成流线,故可以把集合内元素所在位置的统计值修改为一个很小的值.对于统计矩阵中的其他位置 p , 计算该位置到集合 S_p 的最小距离 Dis , 通过一个定义在 Dis 上的函数 $F_{update}()$ 得到统计矩阵在该位置处的新数值:

$$DIOM(p) \leftarrow F_{update}(Dis, DIOM(p)),$$

其中, Dis 为非负数. Dis 越大, $DIOM(p)$ 越小.即离新生成的流线越远,流线对该处的特征影响越小.

在矩阵更新过程中,如果矩阵的每个位置都要进行距离的计算,计算开销太大.给定最大影响距离 d_{max} , 则当 $d > d_{max}$ 时, $DIOM(p)$ 不变化.我们只需找出距离新流线不超过 d_{max} 的那些位置即可,这样,我们使用 Fast Marching 方法^[26],只计算不大于 d_{max} 的那些位置.

2.3.3 终 止

在本文中,算法的终止条件可以选择如下方式:

流线条数大于等于给定数值.这种情况下可以根据用户需求,用给定数目的流线来代表整个向量场.如果给定数目过小,则将忽略一些流场的重要信息.

统计矩阵满足一定的条件.如统计矩阵的最大值小于给定的阈值,这意味着较为重要的特征点已经被选出.

3 结果和讨论

我们使用一些模拟数据进行算法测试.我们的结果在 64 位 Windows 7 系统,ThinkPad T420,Intel CPU P8700,4G 内存机器上运行.所有的 2D 测试都不超过 10s.

3.1 2D 向量场可视化

在本节中,我们使用一些人造向量场数据和 CFD 数据进行实验.并尽可能地将本文实验结果与其他种子点选取算法的结果进行比较.我们对比文献[18]中的方法,其实现可以在文献[27]中找到.文献[5]方法和文献[15]方法的结果比较来源于文献[15].

根据前面的讨论,流线生成算法的质量依赖于一致性、连续性和覆盖率.对于连续性,本文中过种子点生成的流线是完整流线,生成的流线或者是封闭流线或者不能再继续演化,在过该种子点的所有流线中最长.至于一致性和覆盖性,并没有一个标准,因此我们只能通过视觉对实验结果进行比较.

图 5 为本文算法和基于直接绘制算法的比较结果,向量场大小为 50×50 .在连续性上,我们的算法和最远点选取方法以及 Turk 方法差不多,比 Jobard 的方法要好一些,Jobard 的结果更倾向于生成短的分开的流线,而往往在这些位置上需要放置一些连续的长流线.在静态数据场可视化中为了表达流的连贯性,应该尽量避免这种情况的出现.我们的算法并没有强制要求产生均匀的流线,但取得了较好的效果,而其他方法比较刻意去关注这一点.如图 5(d)所示,本文算法使用较少的流线表达出较多的特征.

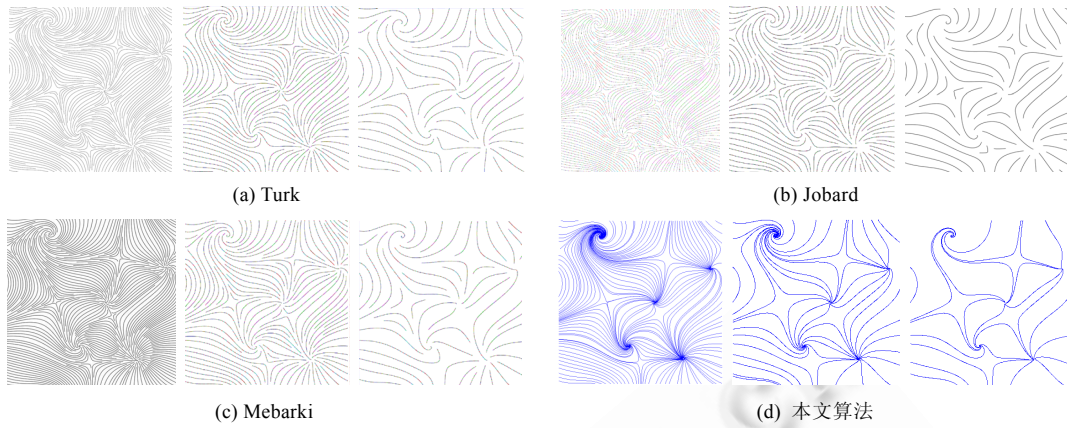


图5 流线可视化算法比较

图6所示为3D向量场中的一个片,它包含了 128×128 个由仿真产生的涡动喷气式飞机有关的向量数据.图6(a)和图6(b)为本文算法结果,尽管数据的拓扑结果非常复杂,漩涡结果很好地被识别出来.图6(c)和图6(d)为对比结果,由于生成的流线比较短,在图3(c)和图3(d)中漩涡并没有很好地标识出来.

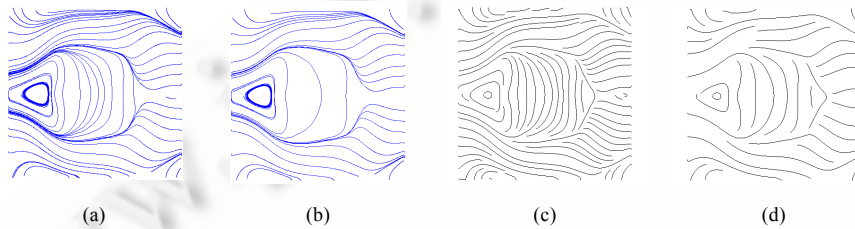


图6 流体动力学仿真数据

图7对我们的算法和Verma等的算法进行比较.图7(a)和图7(b)为Verma的算法结果,对没有临界点的区域表现不佳,尤其在较少流线的情况下,很多临界点并不能清楚地被标识.图7(c)和图7(d)为本文结果.在图7(d)中,流线数目较少,但临界区域依然比较清晰.我们的算法在连续性和一致性方面表现更好.

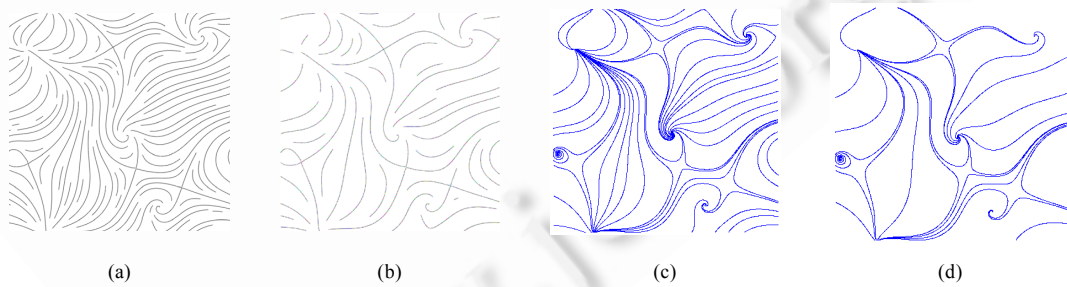


图7 与基于特征的方法的比较

我们的算法使用完整流线.一般来说,较长的流线与较短的流线相比是一种更有效的表示方法,因为后者的间断性削弱了流线的印象.实验结果表明了这一点,尤其在流线数目较小的情况下.

3.2 3D向量场可视化

曲线在绘制时不能加上光照等,绘制的空间感(spatial perception)不强.为此,我们将流线做成有实体的管子,这样可以利用已有的真实感绘制技术,例如加上光照效果,增强流线空间感和真实感.根据曲线生成实体模型一

般有 Sweep 方法^[28].本文中的流线由一系列很短的直线段构成,我们可以使用一种简单的算法来生成管道.

我们第 1 个测试数据来自仿真产生的涡动喷气式飞机有关的向量数据.它包含 $128 \times 128 \times 128$ 个向量、15 个临界点,如图 8 所示.图 8(a)和图 8(b)中的点代表临界点.图 8(a)用箭头模式进行绘制.图 8(b)使用随机设置种子点生成流线.图 8(c)为本文算法结果.与图 8(b)相比:1) 本文生成的流线对向量场定义域的覆盖更为均匀.图 8(b)中有些区域并没有流线覆盖.2) 本文算法流线显示更多的临界区域特征,生成的短流线也更少.图 8(d)为临界点优先的 DIOM 种子点算法结果.图 8(e)显示了 100 条流线,比图 8(d)中的流线放置更为均匀.图 8(f)只有 25 条流线,大多数流线都集中在向量场上部中间区域,这个区域也是向量变化比较大的区域.换句话说,本文的 DIOM 种子点算法正好抓住了向量变化特征.

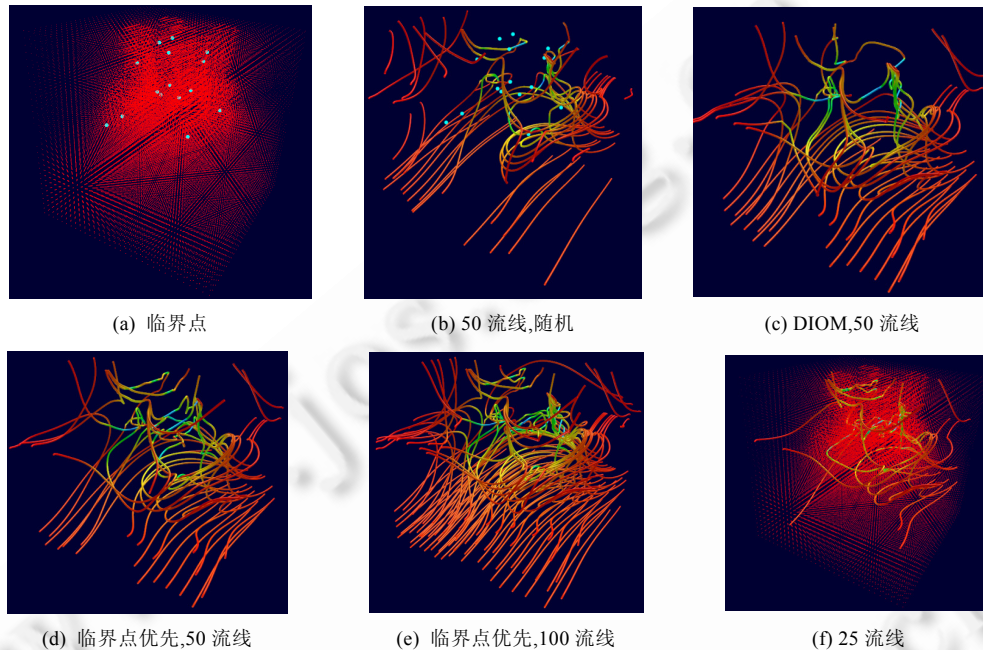


图 8 涡动喷气式飞机有关的向量数据,15 个临界点

第 2 个测试数据为飓风 Isabel 数据.这是 IEEE Visualization 2004 Contest 的测试数据.如图 9 所示,它包含 $500 \times 500 \times 100$ 个向量、172 个临界点,向量场非常复杂.图 9(b)为临界点优先的 DIOM 种子点算法,一共生成了 252 条流线,基本上覆盖了流场中的大部分区域.

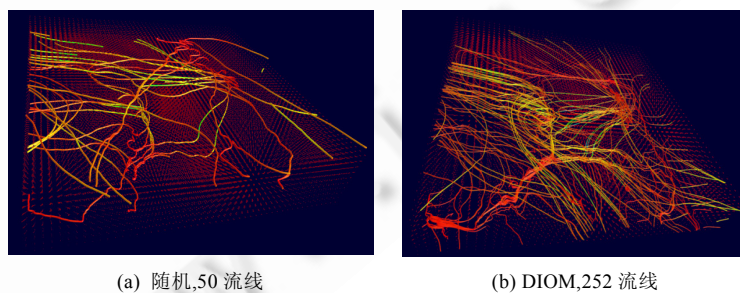


图 9 飓风 Isabel 数据,172 个临界点

第 3 个实验来自文献[11].如图 10 所示,一共包含 $51 \times 51 \times 51$ 个向量、5 个临界点.本文结果与文献[11]结果相类似,但在本文结果中,临界点附近的流线更多,这样能加强临界点区域的视觉效果,如图中左下角附近.

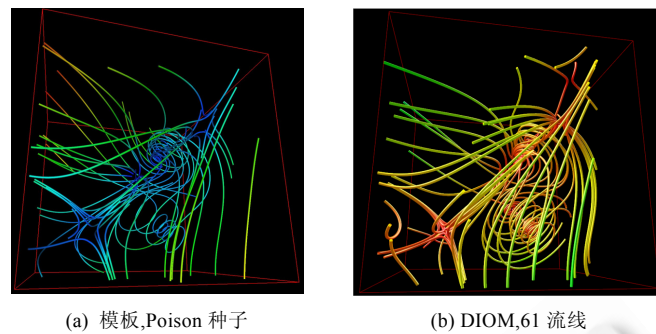


图 10 模拟数据,7 个临界点

最后一个实验数据由俄亥俄州立大学的 Roger Crawfis 提供^[29],如图 11 所示,一共包含 $128 \times 128 \times 128$ 个向量,没有临界点.图 11(a)为没有使用扫掠算法,而是直接绘制流线的结果.图 11(b)则先通过扫掠算法生成新的几何形体,然后进行绘制.绘制视觉效果优于前者.

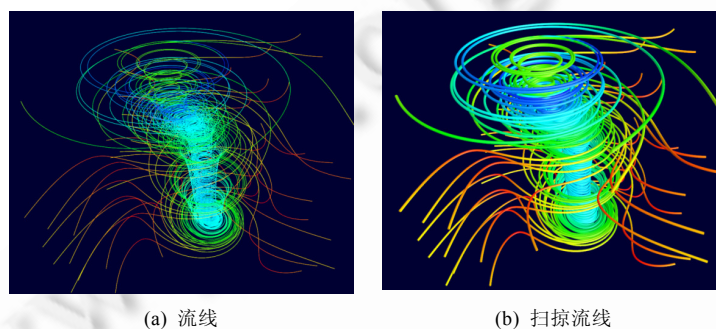


图 11 模拟龙卷风数据

由于本文算法种子点优先选取出入流差异值大的位置,差异值大意味着此处流场变化很大.因而本文算法可以优先选出流场变化大的位置,如汇聚点发散点等.对于变化相对平稳的位置,入流差异值相对较小,本文算法结果在这些位置的流线相对稀疏,这也是与其他方法结果差别较大之处.如图 6(b)所示,流线稀疏处的向量场变化平稳,而相应地,如图 6(d)所示,不能明显地看出对应位置的变化趋势.

与最远点算法相似,我们采用了贪心算法,而且每次生成最长的流线,这样,我们可以在使用少量流线的情况下也能反映向量场的基本信息.实验结果也反映了这一特性.

比较 2D 实验和 3D 实验结果,我们的算法在 2D 情况下效果更好,这也是因为 3D 情况下的流线可视化更为困难.

本文的种子点选取算法优先选择 DIOM 中的最大值.向量场中的出入流差异值越大,该处的向量变化越大.这样,汇聚点等向量变化较大的点被首先选出.如图 7(b)所示,出入流差异值小的区域流线较少,而图 7(d)中的流线则几乎均匀.

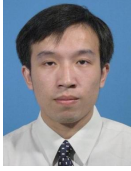
4 结 论

本文提出了一种新的种子点选取算法.我们引入了向量场的出入度属性,出入度差异越大,说明向量场该处的变化越大.这样我们得到一个出入度统计矩阵.每次通过选出出入度值最大的位置作为候选的种子点,每次生成流线以后修正统计矩阵的值,反复进行这个过程直到满足给定的条件为止.实验结果表明,本文生成的流线能够抓住向量场的主要特征.与其他方法相比,尤其在流线数量较少的情况下,本文的算法结果较好.

References:

- [1] Verma V, Kao D, Pang A. A flow-guided streamline seeding strategy. In: Proc. of the IEEE Visualization 2000. 2000. 163–170.
- [2] Liu Z, Moorhead R, Groner J. An advanced evenly-spaced streamline placement algorithm. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2006,12(5):965–972.
- [3] Mattausch O, Theußl T, Hauser H, Gröller ME. Strategies for interactive exploration of 3D flow using evenly-spaced illuminated streamlines. In: Proc. of the Spring Conf. on Computer Graphics. New York: ACM, 2003. 213–222.
- [4] Chen Y, Cohen JD, Krolik JH. Similarity-Guided streamline placement with error evaluation. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2007,13(6):1448–1455.
- [5] Turk G, Banks D. Image-Guided streamline placement. In: Proc. of the SIGGRAPH 1996. New York, 1996. 453–460.
- [6] Mao X, Hatanaka Y, Higashida H, Imamiya A. Image-Guided streamline placement on curvilinear grid surfaces. In: Proc. of the IEEE Visualization'98. IEEE, 1998. 135–142.
- [7] Schlemmer M, Hotz I, Hamann B, Morr F, Hagen H. Priority streamlines: A context-based visualization of flow fields. In: Proc. of the EuroVis07: Joint Eurographics-IEEE VGTC Symp. on Visualization. 2007. 227–234.
- [8] Post FH, Vrolijk B, Hauser H, Laramée RS, Doleisch H. The state of the art in flow visualisation: Feature extraction and tracking. Computer Graphics Forum, 2003,22:775–792.
- [9] Helman JL, Hesselink L. Visualizing vector field topology in fluid flows. IEEE Computer Graphics and Applications, 1991,11(3): 36–46.
- [10] Scheuermann G, Hagen H, Kruger H, Menzel M, Rockwood A. Visualization of higher order singularities in vector fields. In: Proc. of the IEEE Visualization'97. 1997. 67–74.
- [11] Ye XH, Kao D, Pang A. Strategy for seeding 3D streamlines. In: Proc. of the IEEE Visualization 2005. 2005. 471–478.
- [12] Wischgoll T, Scheuermann G. Locating closed streamlines in 3D vector fields. In: Proc. of the 8th Eurographics Workshop on Virtual Environments 2002. 2002. 227–232.
- [13] Theisel H, Weinkauff T, Hege HC, Seidel HP. Saddle connectors—An approach to visualizing the topological skeleton of complex 3D vector fields. In: Proc. of the IEEE Visualization 2003. 2003. 225–232.
- [14] Weinkauff T, Theisel H, Shi K, Hege HC, Seidel HP. Extracting higher order critical points and topological simplification of 3D vector fields. In: Proc. of the IEEE Visualization 2005. 2005. 559–566.
- [15] Jobard B, Lefer W. Creating evenly-spaced streamlines of arbitrary density. Visualization in Scientific Computing, 1997,97:43–56.
- [16] Jobard B, Lefer W. Unsteady flow visualization by animating evenly-spaced streamlines. In: Proc. of the Eurographics 2000. 2000. 31–39.
- [17] Jobard B, Lefer W. Multiresolution flow visualization. In: Proc. of the Int'l Conf. in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Digital Interactive Media 2001. 2001. 34–35.
- [18] Mebarki A, Alliez P, Devillers O. Farthest point seeding for efficient placement of streamlines. In: Proc. of the IEEE Visualization 2005. 2005. 479–486.
- [19] Rosanwo O, Petz C, Prohaska S, Hege HC, Hotz I. Dual streamline seeding. In: Proc. of the IEEE Pacific Visualization Symp. 2009. 2009. 9–16.
- [20] Li L, Hsieh HH, Shen HW. Illustrative streamline placement and visualization. In: Proc. of the IEEE Pacific Visualization Symp. 2008. 2008. 79–86.
- [21] Li L, Shen HW. Image-Based streamline generation and rendering. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3):630–640.
- [22] Heckel B, Weber G, Hamann B, Joy KI. Construction of vector field hierarchies. In: Proc. of the IEEE Visualization 1999. 1999. 19–25.
- [23] Telea A, Van Wijk JJ. Simplified representation of vector fields. In: Proc. of the IEEE Visualization 1999. San Francisco, 1999.
- [24] Du Q, Wang X. Centroidal Voronoi tessellation based algorithms for vector fields visualization and segmentation. In: Proc. of the IEEE Visualization 2004. 2004. 43–50.
- [25] Helman J, Hesselink L. Representation and display of vector field topology in fluid-flow data sets. Computer, 1989,22(8):27–36.
- [26] Sethian JA. Fast marching methods. Siam Review, 1999,41(2):199–235.

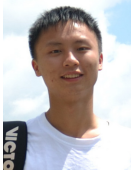
- [27] Mebarki A. Streamlines. 2009. <http://www-sop.inria.fr/geometrica/team/Abdelkrim.Mebarki/Streamlines.html>
- [28] Post FH, Klok F. Deformations of sweep objects in solid modeling. In: Proc. of the Eurographics 1986. 1986. 103-114.
- [29] Crawfis RA, Max N. Texture splats for 3D scalar and vector field visualization. In: Proc. of the IEEE Visualization 1993. 1993. 261-266.



王少荣(1978-),男,江西永丰人,博士,讲师,主要研究领域为计算机图形学,可视化,虚拟现实.



汪国平(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实,人机交互.



吴迪(1985-),男,硕士,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实系统架构.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn