

多变量空间数据场可视化综述

丁治宇¹⁾, 陈海东¹⁾, 吴斐然¹⁾, 陶煜波¹⁾, 左伍衡²⁾, 陈 为^{1)*}

¹⁾(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310058)

²⁾(浙江工业大学教育科学与技术学院 杭州 310024)

(chenwei@cad.zju.edu.cn)

摘 要: 多变量空间数据场可视化在计算流体力学、燃烧模拟、医学影像和气象仿真等科学领域有着重要的应用,其目的是分析和表达数据场中多个属性及其相互关系,通过可视界面呈现并探索复杂空间数据中的多变量演化规律。文中先介绍多变量三维空间数据场的概念及其与传统三维空间数据场的差异,再结合多变量空间数据场可视化流水线,从多变量三维空间数据场的数据表达与分析、多变量三维空间数据场的可视化与交互 2 个方面总结已有研究工作,并结合当前研究现状展望潜在的发展方向。

关键词: 多变量;空间数据场;可视化;特征抽取;统计分析

中图法分类号: TP391

A Survey of Multivariate Spatial Data Visualization

Ding Zhiyu¹⁾, Chen Haidong¹⁾, Wu Feiran¹⁾, Tao Yubo¹⁾, Zuo Wuheng²⁾, and Chen Wei^{1)*}

¹⁾(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

²⁾(College of Educational Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024)

Abstract: Multivariate spatial data visualization plays an important role in the fields of computing fluid dynamics, combustion simulation, medical imaging and meteorological simulation. It seeks to express and represent the multiple attributes as well as the relationships among them, and help users understand the characteristics and evolving patterns hidden in the datasets in an intuitive way. This paper introduces the concepts of multivariate data and differences from conventional spatial data first, and then clarifies the visualization pipeline of multivariate spatial datasets with a summary of existing works on two aspects: the representation and analysis of multivariate data fields, the visualization and interaction of multivariate data fields. Potential research topics are also discussed.

Key words: multivariate data visualization; spatial data field; feature extraction; statistical analysis

科学可视化的研究对象是科学计算或设备测量得到的三维空间数据^[1-2];多变量空间数据场可视化是其中一个重要分支。随着计算流体力学、燃烧模拟、医学影像和气象仿真等科学领域应用的兴起,科

学数据的复杂性呈现爆炸式的增长,多变量空间数据可视化技术在获取和理解复杂多变量、数据信息的作用上越来越重要。

Hibbard^[3]和 Johnson^[4]先后分析了可视化领域

收稿日期:2013-08-28. **基金项目:**国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA12090);国家自然科学基金重点项目(61232012);国家自然科学基金(61003193);国家自然科学基金(81172124);中央高校基本科研业务费专项资金(2013QNA5010);浙江省自然科学基金杰出青年基金(LR13F020001). **丁治宇**(1988—),男,博士研究生,主要研究方向为科学可视化;**陈海东**(1987—),男,博士研究生,主要研究方向为不确定性可视化;**吴斐然**(1986—),男,博士研究生,主要研究方向为信息可视化和可视分析;**陶煜波**(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为科学可视化和可视分析;**左伍衡**(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为人机交互;**陈 为**(1976—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,论文通讯作者,主要研究方向为科学可视化、信息可视化和可视分析。

的重要研究课题,其中有 3 个共同的课题:有效的数据分析方法、直观适用的交互和反馈方式以及可视表达的质量.由于多变量空间数据的复杂性,使对应

的可视化问题更加具有挑战性.图 1^[5]展示了典型的多变量空间数据场的可视化流水线.

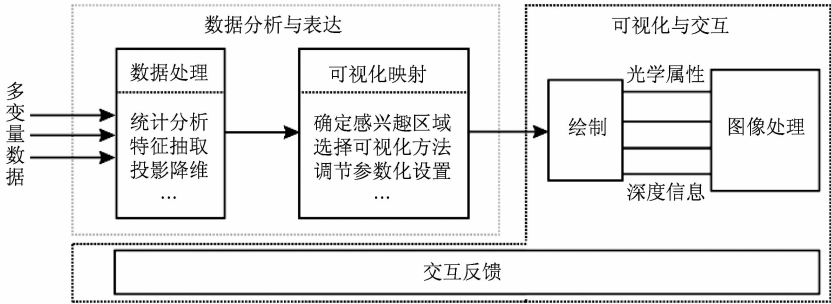


图 1 面向多变量空间数据的可视化流水线

1 多变量三维空间数据场的概念

传统的三维空间数据场是带有三维空间坐标的离散数据采样集,可粗略分为规则或不规则的网格结构:规则的数据场分布均匀,通常在 3 个空间维度方向上等步长采样;不规则的三维数据场数据分布不均匀,采样单元是四面体、六面体等不规则体单元,常产生于计算流体力学和有限元分析领域.根据采样点上的数据类型,传统的三维空间数据场分为 3 种类型.

- 1) 三维空间标量场(单变量). 每个采样点包含三维空间坐标和单一的标量数据值.
- 2) 三维空间向量场. 与标量场相比,向量场最

大的不同在于每一属性同时具有大小和方向,这种方向性特征决定了它与标量场完全不同的可视化映射方法.

3) 三维空间张量场. 广义上,标量可认为是 0 阶张量,向量可看作 1 阶张量. 张量场数据被广泛地使用于基础科学和工程领域,如弥散张量成像、基础物理、固体力学、复合材料和结构力学、湍流动力学以及航空航天等. 而张量场具有数据维度高、结构抽象、复杂等特点,使得对其有效可视化相对困难.

不同于传统的三维空间数据每个采样点上只有一个数据属性,图 2 所示多变量三维空间数据场的每个采样点上具有多个不同类型的属性,如多标量场^[6],标量场混合向量场^[7],标量、向量、张量混合^[8]以及标量场混合向量场^[9].

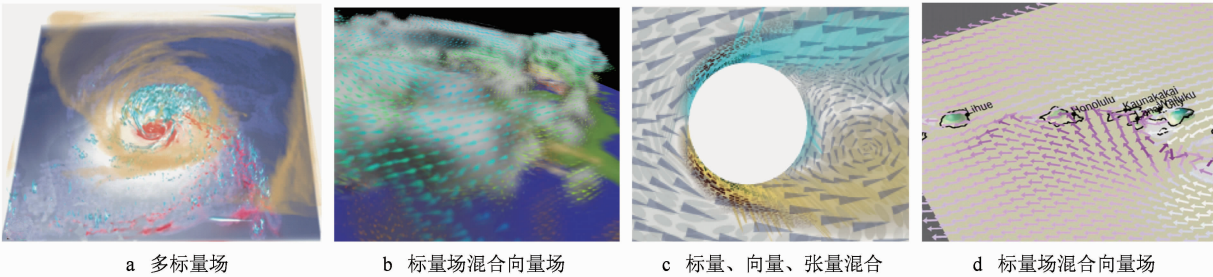


图 2 多变量三维空间数据场实例

在可视化领域,多维度、多变量、多值、多模态、多通道等概念和术语经常被混用^[10].事实上,多维度用于表达物理空间中独立变量的维数,侧重于表达空间和时间概念;多变量则用于表达变量和属性的数目,表示数据所包含信息和属性的多寡;多值亦可表示数据所含信息,但和多变量属于不同的概念,例如单变量多值数据,输入为同一个数据场,给定不同计算参数得到不同的输出数据场,每一个采样点含有属于同一个数据属性的多个值,其重点在描述

“值”的个数,而不是数据属性和变量的个数;多模态和多通道强调获取数据的方法不同以及各自对应的数据的组织结构和尺度的不同.例如,三维气象仿真数据包括气压、湿度和温度 3 个标量场,可称为三维三变量数据集;若数据包含时间维度,则称为四维三变量数据;若源数据通过卫星监测、地面站点监测和数值模拟等多种方式获得,则称为多模态或者多通道数据.本文以三维多变量数据为主要研究对象.图 3^[11]依次展示了多维度、多变量和多值的概念和

异同,图 3 a 中①~④分别表示零维、一维、二维和三维;图 3 b 中⑤~⑦分别表示单标量单值、二元组

单值和 N 元组单值的概念;图 3 c 中⑧~⑩分别表示单标量变量多值、二元组多值和 N 元组多值数据。

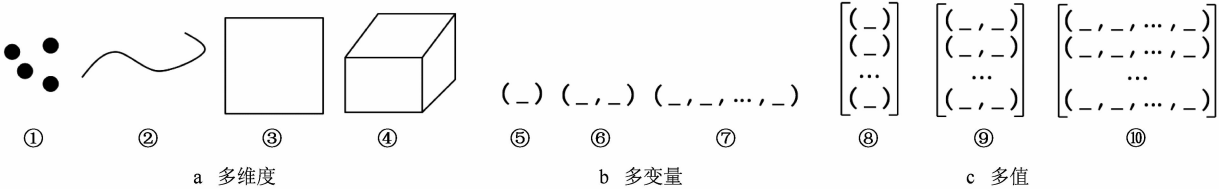


图 3 多维度、多变量和多值的概念

多变量空间数据可视化的目的是抽取和表达数据场中多个属性及其相互关系,其难点和挑战在于:克服多变量、类型复合、内在结构复杂且互相交织的数据特性,设计有效的视觉编码,以辅助用户同步地分析抽取和表达这些信息、观察和研究数据属性及其相互之间的关系,发现未知的新特征和新现象。

2 多变量三维空间数据场的数据分析与表达

多变量空间数据场数据分析和表达的主要任务是构建和处理多变量数据场的数据结构(几何、拓扑、网格结构等),抽取可视化以及可视表达的对象,即数据属性和衍生特征、相互之间的关系以及变化趋势等.在现实应用中,直接可视化多变量属性往往不可行或者不能有效地帮助用户理解该数据.通过数据分析和特征抽取,获得多变量数据场内部几何信息、统计特征或信息学特征,结合投影变换和降维去噪是去除冗余信息、减少数据量的有效途径.本节从多变量数据场特征抽取和统计分析、多变量数据投影变换和降维去噪 2 个方面展开论述。

2.1 多变量特征抽取和统计分析

特征指数据场中包含重要信息的相关结构、现象和区域,如体数据的物质边界(标量场特征)、速度场(向量场特征)和退化点(张量场特征)等.多变量数据场的特征相对抽象和复杂,变量间的相似性和差异性关系不明显.特征抽取是指通过构建几何的、拓扑的、图像的各种表达方式计算特征.在实际应用中,特征常依赖于特定的应用领域以及用户的需求,它没有普适的、统一的定义和描述,甚至是未知的。

在多变量空间数据场可视化中,特征抽取和统计分析^[1]经常被结合使用:将处理对象从原始数据空间变换到统计空间(直方图、散点图等),用统计学方法表达原始数据或者抽取的特征,以达到减少数据量同时保持关键信息、分析变量间关系的目的. Love^[11]提出基于过程化的算术运算符操作,以统计

学特征(均值、方差、偏差等)结合轮廓线、等值面、流线以及迹线等多种绘制方法用于多值数据场的可视化. Correa 等^[12]提出了适用于不确定性的可视分析框架,在数据投影变换的过程中应用不确定性建模以及不确定性的传播和聚集等统计方法. Potter 等^[13]提出了一个多窗口的多变量可视化框架,使用统计学方法描述相关变量的概率密度分布,并且提供统计窗口辅助用户进行交互和直观的数据分析. Kehrer 等^[14]将统计分析 with 可视分析相结合,设计了一系列泛化的视图变换,用于迭代地构建基于统计学特征(均值、方差、偏斜度和峰度)的信息视图. Jänicke 等^[15]基于信息理论,结合数学和统计方法扩展局部统计复杂性的概念来计算多变量数据场的局部复杂性,以突出数据场内的重要区域,并在流场和气象数据的实例应用中验证了效果;之后又改进了这一方法,将之扩展到三维空间,并提高了计算速度和精确性^[16]. Sauber 等^[17]提出了相关场的概念,使用梯度相似性度量(gradient similarity measure, GSIM)和局部相关性因子(local correlation coefficient, LCC)测量和计算多标量场数据各个属性(图 4 a 所示灰度图和带颜色的箭头分别表示标量场及对应梯度,共 4 个属性)之间的相关性(图 4 b 所示相似性越高,代表梯度的箭头方向和大小越一致),并设计了多场图用于选择重要的感兴趣的相关场,以避免不必要的计算. Tzeng 等^[18]将神经网络技术引入可视化,构建了一个可适用于多变量数据场的智能特征抽取和追踪系统,允许用户在传输函数空间和数据空间利用机器学习引擎半自动地进行特征抽取. Johansson 等^[19]使用 K 均值聚类的平行坐标表达多变量数据,将聚类数据用高精度纹理进行表达,结合预定义或用户定义的传输函数和特征动画技术,有效地降低平行坐标表达的视觉混乱问题,同时揭示和保留数据的结构和统计特征.此外,基于图像处理^[20]、物理学特征^[21]和拓扑逻辑分析^[22]的相关方法则被广泛应用于向量场特征抽取和可视化。

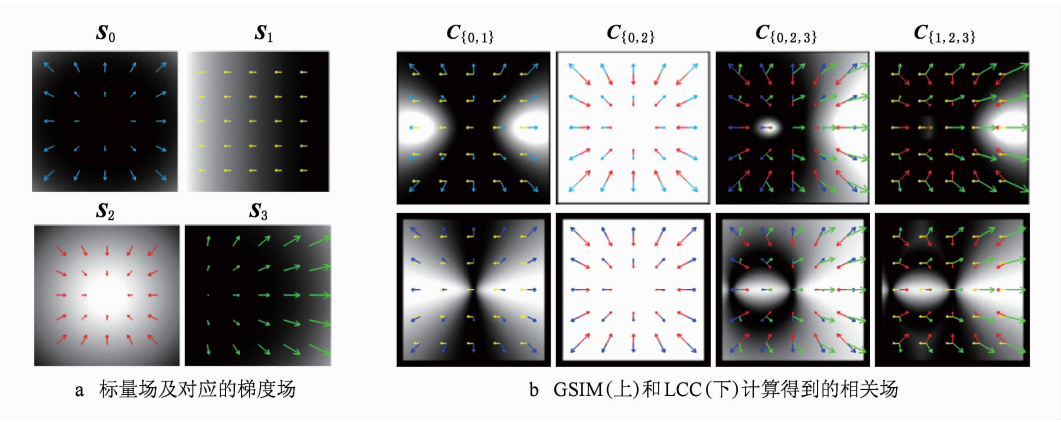


图 4 标量场间的关系度量与计算

2.2 投影变换和降维去噪

多变量空间数据可视化的降维操作通常有 2 种途径:低维空间嵌入,以便在低维检测高维数据空间的特征;特征变量选择,以便减少数据空间的维度而保留数据属性的关系和重要特征^[23]. 自组织映射、多维尺度分析、主元分析、等距特征映射和快速映射是应用较多的降维方法. Paulovich 等^[24]对上述投影和降维技术进行了简要分类和介绍,通过计算效率角度进行对比和讨论,提出部分线性多维投影方法,有效地提升了多变量数据维度投影的性能. Konig^[25]总结了降维、投影变换和特征抽取在多变量可视化方面的应用. Yuan 等^[26]以平行坐标表达多变量数据,对用户选中的坐标轴所代表的数据属性使用多维尺度分析进行降维,再以散点图进行低维表达,将平行坐标、散点图和维度投影集成到一个窗口. Guo 等^[27]将基于多维尺度分析的维度投影与平行坐标相结合,使用多视图关联和画刷选取等交互技术有助于凸显用户感兴趣的区域和特征,帮助分析和对比多维数据间的关联. Zhao 等^[28]使用局部线性嵌入将多变量数据从高维度空间降维到二维空间,再用 K 均值聚类对降维后的数据进行分类,以简化传输函数设计. Fout 等^[29]从数据压缩的角度,使用向量量化方法的变种,依据变量之间的相关性直接对多变量数据进行编码和解码,实现了边解码、边绘制,并且在解码过程中构建数据的梯度场用于光照计算.

对应于特定的应用,必须根据数据自身特点为其选择和设计适用的特征抽取方法和可视化表达方式,这将直接影响最终的成像质量,进一步影响用户的感知和理解.

3 多变量三维空间数据场的可视化与交互

3.1 多变量空间数据场可视化

多变量空间数据场可视化的手段分为 2 类:用

不同视觉通道映射和编码各个属性及其相互之间的关系和关联;分别可视化各个数据场的数据属性,再进行融合. 两者都可以归结为将数据属性和特征映射到不同的视觉通道(图标信息、纹理信息、颜色和透明度、轮廓、形状、隐喻等),再以合理的方式进行结合;如数据处理阶段的数据融合、绘制阶段的混合绘制、图像处理阶段的图像融合等. 下面围绕视觉通道和图像融合、数据融合和混合绘制 2 个主题进行论述.

3.1.1 视觉通道和图像融合

图标信息和纹理信息作为强大的、可携带以及编码丰富信息的表达载体,在多变量可视化技术中最为常见. 图标法可清晰编码多个变量属性,尤其是可表达方向信息,因此它被广泛用于向量场和张量场可视化^[5,21]. Ropinski 等^[30]详细总结了图标及其在医学可视化中的应用,并提出应用图标编码多属性信息的 8 条指导方针. Kraus 等^[31]通过具体应用研究了使用组合图元等进行多变量数据可视化^[31],如图 5a 所示. Kindlmann^[32]提出了一种新的超二次曲面的张量场图标,其在一些应用场合可有效地解决传统的椭球和立方体图标表示张量场所可能产生的非对称性和模糊性. 对于纹理,Ware 等^[33]认为,人类感知的 3 个主要视觉通道是模式、大小和方向. Interrante^[34]使用自然纹理可视化多变量数据场,其认为自然纹理可编码大量信息并且信息集中紧凑,对于视觉系统的压力较小. Tang 等^[35]则使用自然纹理的特征编码多变量气象数据的不同属性,并结合多层次的纹理合成技术实现最终的可视化. 相反, Laidlaw^[36]认为,结合人类艺术创造的过程分析艺术家不同笔触所包含的信息,可以利用艺术化的人工纹理支持多变量场的可视化. 结合颜色和纹理^[37-38]进行多变量数据可视化也是常用的方法. Taylor^[39]设计了一个用于在同一表面上可视化多个数据场层次的系统,并且研究了传统层次混合方法的局限性,即由于层次之间的遮挡和视觉混乱,使

用带透明度的颜色混合最多只能处理 4 个层次。Urness 等^[40]提出了色织的概念,克服了传统颜色混合的缺点,理论上可以处理如图 5 b^[40]所示任意

数目的颜色重叠,强化了颜色编码和纹理的混合应用。其他典型的图像处理阶段的混合技术可见 Wong 等^[41]对多变量气象数据可视化的研究结果。

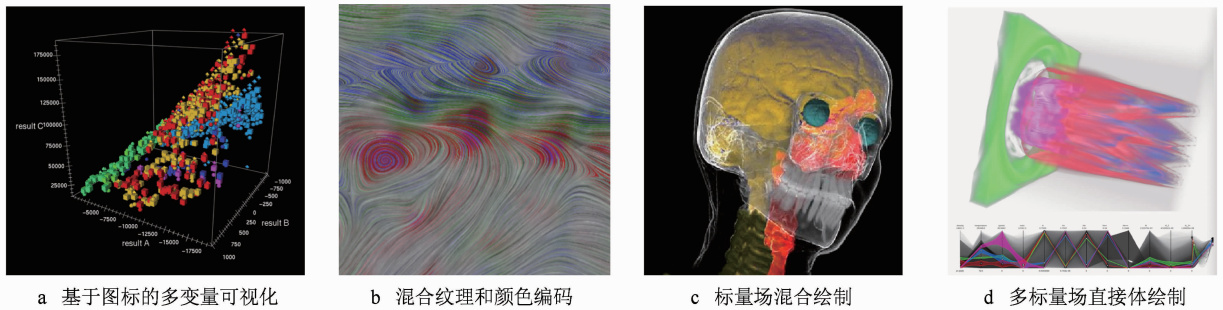


图 5 多变量空间数据场可视化技术实例

在数据属性较密集时,基于视觉通道的方法容易出现严重的遮挡问题;而且它难以适用于属性维度较高的数据。基于图像融合的技术直观简单,能很好地处理数目较少的多变量数据,却严重受限与图像融合的层次数目,处理不好往往导致视觉混乱、甚至误导用户得出错误的观察和分析结果。

3.1.2 数据融合和混合绘制

在科学和工程领域,经常需要将或来源不同、或尺度不同、或类型不同的数据进行数据融合,以便观察某些数据和属性在以其他数据和属性为背景下的变化过程以及两者之间的相互关系和作用,同时防止信息的不完整展示可能带来的理解误导。多个数据集的融合产生各种类型的多变量数据,针对其特点,通常采用混合绘制进行可视化;因此数据融合和混合绘制是多变量可视化的另一个重要研究方向。Hauser 等^[42]提出了 2 级体绘制技术,如图 5 c 所示,在数据分割的基础上,结合最大强度投影、直接体绘制或非真实感渲染等技术,将之应用于数据集中不同的子区域,每一个分割区域都可以选择使用特定的渲染方法。Kreeger 等^[43]描述了一个混合体绘制和半透明的多边形面绘制的快速绘制方法;这是一种多标量数据的混合渲染技术,它将面绘制技术应用于血管结构,应用体绘制技术渲染其余组织,对一个人头部的磁共振数据进行可视化。上述 2 项工作虽不是直接面向多变量可视化,但是其技术和方法可以移植到多变量可视化领域。Rossler 等^[44]设计了一个灵活的、基于 GPU 的、面向对象的多体绘制框架,允许对任意数量的体数据进行正确的融合,并且其实现对每一个体的视觉属性和绘制方法独立可控。此外,也有针对不同数据类型和属性采用不同绘制风格进行混合绘制的研究。Stompel 等^[45]使用表意性和非真实感绘制的手法,将某些变量编

码成视觉元素,使之凸显另外一些变量所表达的特征。Rautek 等^[46]提出了语义层次的概念,允许用户使用领域的自然语言建立数据属性和不同的表意性视觉风格之间的映射关系。

基于数据融合和混合绘制为基础的多变量可视化方法直接处理数据属性,可以有机地结合统计分析以及特征抽取等数据处理手段进行可视分析,因而研究手段更加丰富。尽管可以借助基于平行坐标的高维传输函数使用单一的可视化技术直接对如图 5 d 所示多变量数据场进行可视化,但多变量空间数据场自身的特点决定了多变量数据可视化作为一种广义的混合绘制的必然性,尤其是在分析真正复杂的混合数据场多变量数据时。如标量场数据之间的混合绘制(包括体绘制与面绘制的混合),标量场数据与向量场、张量场的混合绘制,多种视觉通道的混合应用,不同绘制风格的混合绘制,以及图像处理阶段的层次和图像融合。由于各种绘制技术和视觉通道之间往往互相影响,应当依据特定的应用和数据场自身特点,将对应的可视化技术进行组合,在降低多变量多数据场所带来的信息和视觉混乱以及相互之间遮挡的前提下,尽量同时展示所有变量中包含的信息,以避免部分信息展示带来的数据理解偏差和误导。

3.2 交互探索

围绕准确、直观、高质量地展示数据场中多个属性及其相互关系,并且帮助用户简便地进行交互分析这一主线,本文分 3 个时间段对多变量空间数据场的交互技术^[47-48]进行梳理,如表 1 所示。

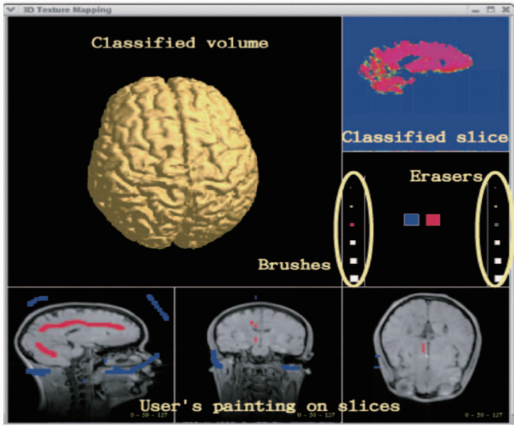
多变量可视化领域的交互基本上已经形成了以多关联视图为基础、二维视图用于显示和分析属性关系、三维视图用于显示物理数据空间、使用高维传输函数和画刷及其衍生技术为特征选取技术、以焦点+上下文或其变种为数据和特征显示方法的基本框架。

表 1 多变量空间数据可视化交互技术

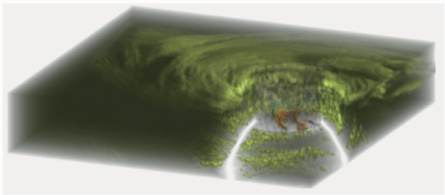
发表时间	交互目标	
	特征选取	数据属性及关联分析
1990~1999	—	多关联视图+切片 ^[59]
2000~2005	多维传输函数 ^[49-50] ,画刷选取 ^[51] ,焦点+上下文+画刷选取 ^[52-54] ,焦点+上下文 ^[55] ,机器学习+画刷 ^[56]	多关联视图+统计分析 ^[60] ,多关联视图 ^[61-62]
2006~2012	焦点+上下文 ^[57] ,机器学习+画刷选取 ^[58]	多关联视图+多场图 ^[17] ,多关联视图+平行坐标+维度投影 ^[27] ,多关联视图+算子 ^[63] ,多关联视图+机器学习 ^[64] ,多关联视图+平行坐标 ^[65]

众多学者对于画刷技术及其变种进行了全面而深入的研究,例如 Doleisch 等^[52]提出了光滑画刷的概念,其实质是一种平滑的数据子集选取技术,将完全选取和非选取之间的数据设定为部分选取,以此实现数据子集的光滑选取.为了方便用户选取多个属性以观察和分析数据属性之间的关联,Doleisch 等^[53]又提出了一种特征定义语言,通过组合不同属性视图和逻辑操作的画刷来捕获一个特定的特征.Tzeng 等^[56]和 Fuchs 等^[58]的工作则代表了这一技术的新趋势,前者设计了一个智能的体数据分类系统,如图 6 a^[56]所示将神经网络和支撑向量机等机器学习的方法与基于画刷的交互可视分析相结合,帮助用户进行特征选取,进而实现体数据分类;后者将机器学习和以画刷为主的交互手段相结合,对于

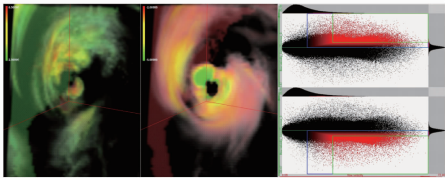
用户给定的特征描述和检测标准,使用启发式的策略帮助选择最符合标准的特征.除此之外,比较重要的多变量数据特征选取方法还有高维传输函数.Kniss 等^[49]设计了一个适用于多变量可视化的多维传输函数,使用梯度等衍生信息构建多维直方图,并将其应用于一个多变量气象数据实例^[66];随后他们又进一步提出了一种直接适用于复杂的多变量数据的高斯传输函数^[50].焦点+上下文是多变量可视化领域常用的显示方法,它常用于凸显用户感兴趣区域、弱化显示不感兴趣区域.不同的焦点特征的定义和绘制手法可以获得不同的技术组合;如图 6 b^[55]所示,Viola 等^[55]通过视点的位置以及特征的描述定义数据的重要性,其中重要性高的区域作为显示的焦点进行凸显;反之则作为上下文背景.



a 结合机器学习的体数据交互分类系统界面



b 重要性驱动的焦点+上下文技术



c 多关联视图和画刷选取

图 6 多变量可视化交互探索

Novotny 等^[57]将焦点+上下文技术应用于平行坐标,以离群特征保持作为其重要特点,不仅保留了焦点数据以及作为上下文的趋势数据,同时保留和关注了离群数据和特征.作为多变量可视化的基础模式,多关联视图^[17,27]是多变量可视化交互的基础而重要的手段,其在分析变量之间相互关系以及建立数据空间和各种抽象特征空间的联系方面作用

显著.Gresh 等^[60]第一次显式地集成三维物理空间视图和统计表达视图,并在统计表达视图中提供关联画刷.Piringer 等^[62]使用多关联视图将二维散点图和三维散点图连接起来,并使用颜色、点大小等深度隐喻帮助用户强化特征认知.Keefe 等^[65]则在其生物力学运动数据可视化系统中集成应用了包括多关联视图、平行坐标等交互技术.

由表 1 结果和上述分析可知,在多变量可视化的初期,由于数据不是非常复杂,变量间的关联分析的重要性并不十分突出,这个阶段研究人员致力于研究多变量数据场的特征选取上. 由于近年来多变量数据越来越复杂、数据分析越来越抽象,人们的研究重心逐渐偏向于对数据属性之间关系和变化趋势的分析. 从方法来看,无论是特征选取还是数据属性和关联分析,基于统计分析和机器学习的可视分析方法在近年的研究工作中所占的比重越来越大,并且成为主流.

4 结论与展望

本文介绍了多变量三维空间数据场的概念及其与传统三维空间数据场的差异,从多变量三维空间数据场的数据分析与表达、多变量三维空间数据场的可视化与交互 2 个方面,结合多变量空间数据场可视化流水线对已有研究工作进行论述;其中,对于多变量数据分析与表达以及多变量可视化与交互,进行了全面深入的梳理和总结.

从分析和论述结果不难看出,随着近年来多变量数据越来越复杂、特征越来越抽象,可以预见基于统计分析和机器学习的特征抽取、分析和交互将是多变量空间数据可视化的极具潜力和研究价值的方向^[67]. 对于多变量可视化,如何针对不同数据类型和属性以及衍生特征采用恰当的可视化技术,如何更好地混合不同数据属性和数据场的绘制结果,以降低多变量多数据场所带来的信息和视觉混乱以及相互之间的遮挡,并且建立一套有普适意义的评估架构是亟待解决的问题.

参考文献(References):

- [1] Hansen C D, Johnson C R. The visualization handbook [M]. Orlando: Academic Press, 2004
- [2] Max N. Progress in scientific visualization [J]. The Visual Computer, 2005, 21(12): 979-984
- [3] Hibbard B. Top ten visualization problems [C] //Proceedings of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1999: 21-22
- [4] Johnson C. Top scientific visualization research problems [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(4): 13-17
- [5] Raphael B, Helwig H. Visualization of multivariate scientific data [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(6): 1670-1690
- [6] Akiba H, Ma K L. A tri-space visualization interface for analyzing time-varying multivariate volume data [C] // Proceedings of the 9th Joint Eurographics/IEEE VGTC conference on Visualization. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 115-122
- [7] Crawfis R A, Max N. Texture splats for 3D scalar and vector field visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1993: 261-266
- [8] Kirby R M, Marmanis H, Laidlaw D H. Visualizing multivalued data from 2D incompressible flows using concepts from painting [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999: 333-340
- [9] Treinish L A. Multi-resolution visualization techniques for nested weather models [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 513-516
- [10] Wong P C, Bergeron R D. 30 years of multidimensional multivariate visualization [C] //Proceedings of Scientific Visualization, Overviews, Methodologies, and Techniques. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1997: 3-33
- [11] Love A L. Visualizing spatial multivalued data [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25(3): 69-79
- [12] Correa C, Chan Y H, Ma K L. A framework for uncertainty-aware visual analytics [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 51-58
- [13] Potter K, Wilson A, Bremer P T, *et al.* Ensemble-Vis: a framework for the statistical visualization of ensemble data [C] //Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining Workshops. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 233-240
- [14] Kehrer J, Filzmoser P, Hauser H. Brushing moments in interactive visual analysis [J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(3): 813-822
- [15] Jänicke H, Wiebel A, Scheuermann G, *et al.* Multifield visualization using local statistical complexity [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1384-1391
- [16] Jänicke H, Böttinger M, Tricoche X, *et al.* Automatic detection and visualization of distinctive structures in 3D unsteady multi-fields [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(3): 767-774
- [17] Sauber N, Theisel H, Seidel H P. Multifield-graphs: an approach to visualizing correlations in multifield scalar data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 917-924
- [18] Tzeng F Y, Ma K L. Intelligent feature extraction and tracking for visualizing large-scale 4d flow simulations [C] // Proceedings of Conference on Supercomputing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 6-17
- [19] Johansson J, Ljung P, Jern M, *et al.* Revealing structure within clustered parallel coordinates displays [C] // Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 125-132

- [20] Heiberg E, Ebbers T, Wigstrom L, *et al.* Three-dimensional flow characterization using vector pattern matching [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, 9(3): 313-319
- [21] Post F H, Vrolijk B, Hauser H, *et al.* The state of the art in flow visualization: Feature extraction and tracking [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(4): 775-792
- [22] Scheuermann G, Tricoche X. Topological methods for flow visualization [M] //The Visualization Handbook, 1st ed. Orlando: Academic Press, 2004: 341-358
- [23] Kaski S, Peltonen J. Dimensionality reduction for data visualization [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(2): 100-104
- [24] Paulovich F V, Silva C T, Nonato L G. Two-phase mapping for projecting massive data sets [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1281-290
- [25] König A. Dimensionality reduction techniques for multivariate data classification, interactive visualization, and analysis-systematic feature selection vs. extraction [C] //Proceedings of the 4th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 44-55
- [26] Yuan X, Guo P, Xiao H, *et al.* Scattering points in parallel coordinates [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1001-1008
- [27] Guo H, Xiao H, Yuan X. Multi-dimensional transfer function design based on flexible dimension projection embedded in parallel coordinates [C] //Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 19-26
- [28] Zhao X, Kaufman A. Multi-dimensional reduction and transfer function design using parallel coordinates [C] //Proceedings of IEEE/EG International Symposium on Volume Graphics. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2010: 69-76
- [29] Fout N, Ma K L, Ahrens James. Time-varying, multivariate volume data reduction [C] //Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Applied computing. New York: ACM Press, 2005: 1224-1230
- [30] Ropinski T, Preim B. Taxonomy and usage guidelines for glyph-based medical visualization [C] //Proceedings of the 19th Conference on Simulation and Visualization (SimVis). SCS Publishing House, 2008: 121-138
- [31] Kraus M, Ertl T. Interactive data exploration with customized glyphs [C] //Proceedings of WSCG (Posters). 2001: 20-23
- [32] Kindlmann G. Superquadric tensor glyphs [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 147-154
- [33] Ware C, Knight W. Using visual texture for information display [J]. ACM Transactions on Graphics, 1995, 14(1): 3-20
- [34] Interrante V. Harnessing natural textures for multivariate visualization [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, 20(6): 6-11
- [35] Tang Y, Qu H M, Wu Y C, *et al.* Natural textures for weather data visualization [C] //Proceedings of the 10th International Conference on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006: 741-750
- [36] Laidlaw D H. Loose, artistic “textures” for visualization [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(2): 6-9
- [37] Healey C, Enns J. Large Datasets at a Glance: Combining textures and colors in scientific visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(2): 145-167
- [38] Shenass H H, Interrante V. Compositing colour with texture for multi-variate visualization [C] //Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia. New York: ACM Press, 2005: 443-446
- [39] Taylor R M. Visualizing multiple fields on the same surface [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(3): 6-10
- [40] Urness T, Interrante V, Longmire E, *et al.* Effectively visualizing multivalued flow data using color and texture [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 151-121
- [41] Wong P C, Foote H, Kao D L, *et al.* Multivariate visualization with data fusion [J]. Journal Information Visualization, 2002, 1(3-4): 182-193
- [42] Hauser H, Mroz L, Bischl G I, *et al.* Two-level volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(3): 242-252
- [43] Kreeger K, Kaufman A. Mixing translucent polygons with volumes [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999: 191-198
- [44] Rossler F, Tejada E, Fangemimer T, *et al.* GPU-based multi-volume rendering for the visualization of functional brain images [C] //Proceedings of the 18th Conference on Simulation and Visualization. SCS Publishing House, 2006: 305-318
- [45] Stoppel A, Lum E B, Ma K L. Visualization of multidimensional, multivariate volume data using hardware-accelerated non-photorealistic rendering techniques [C] //Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 394-402
- [46] Rautek P, Bruckner S, Groller M E. Semantic layers for illustrative volume rendering [J]. IEEE Transactions Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1336-1343
- [47] Hauser H. Interactive visual analysis-an opportunity for industrial simulation [C] //Proceedings of the 18th Conference on Simulation and Visualization. SCS Publishing House, 2006: 1-6

- [48] Kehrler J, Hauser H. Visualization and visual analysis of multi-faceted scientific data: a Survey [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 19(3): 495-513
- [49] Kniss J, Kindlmann G, Hansen C. Interactive volume rendering using multi-dimensional transfer functions and direct manipulation widgets [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 255-262
- [50] Kniss J, Premoze S, Ikits M, *et al.* Gaussian transfer functions for multi-field volume visualization [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 65-73
- [51] Hauser H, Ledermann F, Doleisch H. Angular brushing of extended parallel coordinates [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 127-130
- [52] Doleisch H, Hauser H. Smooth brushing for focus+context visualization of simulation data in 3D [J]. Journal of WSCG, 2001, 10(1): 147-154
- [53] Doleisch H, Gasser M, Hauser H. Interactive feature specification for focus + context visualization of complex simulation data [C] //Proceedings of Symposium on Data Visualization. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2003: 239-248
- [54] Doleisch H, Mayer M, Gasser M, *et al.* Interactive feature specification for simulation data on time-varying grids [C] // Proceedings of the Conference on Simulation and Visualization. SCS Publishing House, 2005: 291-304
- [55] Viola I, Kanitsar A, Groller M E. Importance-driven feature enhancement in volume visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(4): 408-418
- [56] Tzeng F Y, Lum E, Ma K L. An intelligent system approach to higher-dimensional classification of volume data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(3): 273-284
- [57] Novotny M, Hauser H. Outlier-preserving focus + context visualization in parallel coordinates [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 893-900
- [58] Fuchs R, Waser J, Groller M E. Visual human + machine learning [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1327-1334
- [59] Wijk J, Liere R. Hyperslice: visualization of scalar functions of many variables [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1993: 119-125
- [60] Gresh D, Rogowitz B, Winslow R, *et al.* WEAVE: a system for visually linking 3D and statistical visualizations applied to cardiac simulation and measurement data [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 489-492
- [61] Roberts J C. Multiple-view and multiform visualization [C] // Proceedings of Visual Data Exploration and Analysis. 2000: 176-185
- [62] Piringer H, Kosara R, Hauser H. Interactive focus+context visualization with linked 2D/3D scatterplots [C] //Proceedings of the 2nd International Conference on Coordinated & Multiple Views in Exploratory Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 49-60
- [63] Woodring J, Shen H W. Multi-variate, time-varying, and comparative visualization with contextual cues [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 909-916
- [64] Blaas J, Botha C P, Post F H. Interactive visualization of multi-field medical data using linked physical and feature-space views [C] //Proceedings of the 9th Joint Eurographics/IEEE VGTC conference on Visualization. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 123-130
- [65] Keefe D, Ewert M, Ribarsky W, *et al.* Interactive coordinated multiple-view visualization of biomechanical motion data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1383-1390
- [66] Kniss J, Hansen C, Grenier M, *et al.* Volume rendering multivariate data to visualize meteorological simulations: a case study [C] //Proceedings of the Symposium on Data Visualisation. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2002: 189-194
- [67] Ma K L. Machine learning to boost the next generation of visualization technology [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2007, 27(5): 6-9