

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.01.05

基于 VTK 的激光跟踪测量可视化软件设计

张润宇^{1,2}, 李月强¹, 张滋黎², 袁江², 周维虎²

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192; 2. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

摘 要: 测量数据的三维可视化是激光跟踪测量数据处理的关键步骤之一。结合大型激光跟踪测量软件系统的开发实践, 对 VTK 技术特点和体系结构进行深入研究, 设计实现了对测量数据进行处理和显示的类和接口。在此基础上, 基于 Microsoft Visual Studio 2010 平台, 利用 C++ 和 VTK 技术开发了一款三维测量数据处理及可视化软件, 实现了测量点云拟合、三维图形显示以及交互功能, 并通过实例验证了软件的有效性和可用性, 证明了 VTK 在工业测量可视化领域具有很大的应用价值。

关键词: VTK; 三维可视化; 测量软件; 点云; 交互

中图分类号: TB92; TP311.52; TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2015)01-0021-05

Design of Laser Tracking Measurement Visualization Software Based on VTK

ZHANG Runyu^{1,2}, LI Yueqiang¹, ZHANG Zili², YUAN Jiang², ZHOU Weihu²

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: 3D visualization of measurement data is one of the key approaches in laser tracking measurement data processing. Combining with the development of laser tracking measurement software system, technical characteristics and architecture of VTK are studied in this paper. The classes and interfaces for measurement data processing and displaying are also designed and implemented. Furthermore, based on the platform of Microsoft Visual Studio 2010, a measurement data processing and 3D visualization software is developed using C++ and VTK, achieving functions of point cloud fitting, 3D graphics display and user interaction. The effectiveness and usability of the software are testified by experiments which show that VTK has great application value and potential in the field of industry measurement visualization.

Key words: VTK; 3D visualization; measuring software; point cloud; interaction

0 引言

对大尺寸部件的几何特征点、空间尺寸和表面形貌的精密测量在航空航天、汽车、造船等工业领域具有广泛应用。在常见的大尺寸部件的工业测量系统中, 激光跟踪测量系统以其便携性、高精度、测量范围大、实时跟踪测量等优点^[1], 逐渐成为工业测量领域研究的焦点。同时, 随着可视化和三维显示技术的快速发展, 工业测量三维可视化软件也成为激光跟踪测量系统中不可或缺的得力工具。截至目前, 国外有诸多公司推出了工业测量三维可视化软件, 例如美国的 NRK

公司的 SA (Spatial Analyzer) 软件^[2]、美国的 Geomagic 公司的 Geomagic Studio 软件^[3]等。本文采用面向对象技术设计并实现了一套应用于激光跟踪测量的三维可视化测量软件, 该软件基于 VTK 和 MFC 框架平台开发而成, 其设计良好, 操作简便, 并最终用实例进行了有效性验证。该软件是为数不多的将 VTK 技术应用在工业测量领域的国内软件, 为其他可视化项目提供了很好的指引和借鉴。

1 VTK 技术及其特点

1.1 VTK 简介

现有的三维可视化开发工具主要有 OpenGL, DirectX, VTK 等, 其中 VTK 是由美国 Kitware 公司负责维护, 在医学、能源、地质等领域颇受重用。VTK 在 OpenGL 基础上用 C++ 语言开发而成, 采用面向对象设计, 并含有对 Python, Java, Tcl 等语言的接口^[4],

收稿日期: 2014-11-18; 修回日期: 2014-11-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120022)

作者简介: 张润宇(1989-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电测量软件; 李月强(1968-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光电测量技术及仪器。

具有开源和跨平台的特性,发展速度很快。

1.2 VTK 特点

1) 专注于功能: VTK 封装了复杂的底层环境代码和算法处理,并提供了大量的编程接口,使开发人员更专注于高级功能的实现。

2) 易于开发: 由于采用面向对象设计, VTK 封装性很好,可视化管道中各个阶段的数据、处理器均以类和对象的形式使用,大大增强代码的正确性、可读性,便于开发和维护。

3) 独一无二的可视化管道设计: VTK 与 OpenGL, OSG 等其他三维可视化开发工具的主要区别就在于 VTK 采用管道式设计(Pipeline)实现三维显示^[5]。原始数据在管道中通过各种过滤器和映射器得到对应的图形结构,再通过相应的图形绘制器绘制成三维图形显示出来,节约大量设计和开发时间,效率高。

可以看出, VTK 能应用于如今大多数三维可视化项目中,逐渐成为三维可视化领域中的流行技术。

2 软件框架设计

2.1 VTK 和 MFC 框架的建立

微软基础类库 MFC 为编写在 Windows 系统下的 VTK 程序提供了良好的平台基础。在 MFC 的视图类窗口上关联 VTK 窗口,即在 VTK 绘制窗口函数接口与 MFC 视图类窗口函数接口之间建立调用关系,以实现初始化 MFC 和 VTK、设置环境变量、复杂交互等功能,具体步骤如图 1 所示。

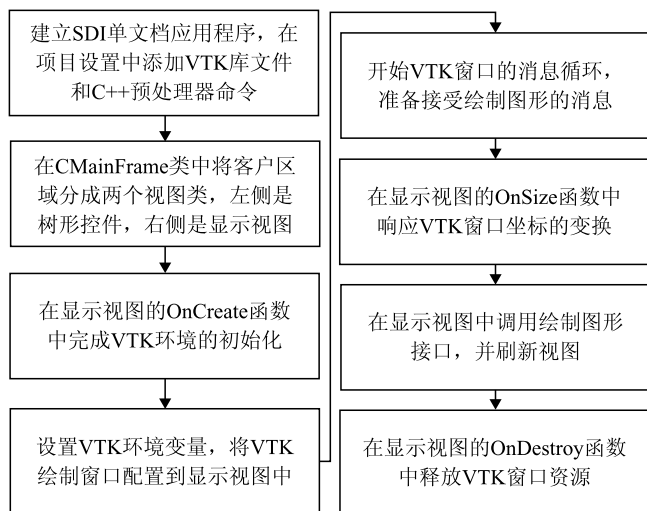


图 1 建立 VTK 和 MFC 程序框架流程

2.2 软件的设计要求

激光跟踪测量可视化软件主要用于实现用户对激光跟踪仪测量的点云数据的操作,包括数据传输、误

差处理、点云拟合、数据库管理,以及三维显示和交互。其中,三维显示包括对点云、直线、平面、圆、球、圆柱、圆锥、曲面等图元的显示,以及误差分析的可视化;交互操作包括平移、旋转、缩放、定位、悬浮信息、生成报表等;数据库管理包括点云数据和各个拟合图形数据的新建、插入、编辑、删除,以及数据库的新建、连接、更新等。

2.3 三维显示和交互模块设计

在三维显示和交互模块中主要设计了两个类,分别是类 CVtkSetup 和类 CVtkEntity。类 CVtkSetup 负责完成 VTK 窗口初始化、环境设置和交互操作,而类 CVtkEntity 负责完成三维显示的实现以及三维显示相关的数值计算、数据构建和条件检查等功能。

作为初始化和交互类,类 CVtkSetup 定义了 VTK 窗口及其初始化函数,还包括坐标轴、悬浮信息、误差可视化等交互工具,以及鼠标拖拽查看、选取元素等交互方式。三维显示模块与软件主体的接口也在类 CVtkSetup 中定义,通过窗口句柄和指针的方式,软件主体可以访问三维显示和交互模块的操作,这样用户在数据处理和三维交互操作之间频繁切换时就做到直接、无缝。

作为三维显示实现类,类 CVtkEntity 描述了点、直线、平面、球、圆柱、圆锥等图元的属性,包括位置坐标、尺寸、ID 号、颜色、误差信息等;此外,针对不同的图元,设计实现了不同的图元数据构建方式,通过与数据库建立连接,导入数据到标准库数据结构中进行显示。具体的类和接口设计如图 2 所示。

类 CVtkSetup	类 CVtkEntity
窗口句柄 m_hWnd	条件检查 ConditionTest()
初始化 VtkInitialize()	计算角度 getVecsAngle()
适应窗口 VtkResize()	绘制点云 SetPointsData()
坐标轴 VtkCoordinate()	绘制直线 SetLinesData()
悬浮窗 VtkBalloonInit()	绘制球体 SetSpheresData()
释放资源 VtkRelease()	绘制圆柱 SetCylindersData()
交互方式 InteractorStyle	绘制平面 SetPlanesData()
其 他	其 他

图 2 三维显示和交互模块中主要的类和接口示意图

3 软件可视化管道的设计

在完成软件框架和模块设计之后,要实现从数据

到三维图形的构建和显示流程。之前提到，VTK 主要的特色就是采用可视化管道流程进行三维图形显示。在三维可视化软件里具体分为三个部分，分别是 VTK 绘制环境构建、图形数据构建、VTK 三维可视化，其中图形数据的构建是关键步骤，以下是各部分详细设计流程。

3.1 VTK 绘制环境构建流程

构建 VTK 绘制环境的主要工作在图 2 中的 VtkInitialize 函数里实现。绘制器对象 Renderer、绘制窗口 RenderWindow、交互器对象 Interactor、交互方式 InteractorStyle 以及相机对象 Camera、光照对象 Light 共同构成了绘制环境，其中绘制器对象设置 Camera、Light 和背景，RenderWindow 指定关联的父窗口，并在绘制环境创建完成后开始 VTK 消息循环。

3.2 图形数据构建流程

图形的显示是三维可视化软件的关键部分，不同类型的图形有不同的数据构建方法。VTK 使用数据流方法将原始数据变换成图形数据，构建好的具有正式结构的数据叫做数据集 (DataSet)，数据集对象由几何和拓扑结构以及属性数据组成^[6]。单元格 (Cell) 是拓扑结构的组成原子，点 (Point) 是几何结构的组成原子，属性 (Property) 是单元格与点的附加的属性信息，如误差、测量值等。数据集按结构可分为规则格网 (StructuredGrid)、不规则格网 (UnstructuredGrid) 和多边形数据集 (PolygonalData)^[7]。对于散乱不规则点云，可用不规则格网表示；而对于有结构的规则的点云，可用多边形数据集或规则格网表示，从而组成三维图形。数据集的分类和结构组成如图 3 所示。

数据集 DataSet	分 类	多边形数据集 PolygonalData 规则格网 Structured Grid 不规则格网 UnstructuredGrid	
	结构组成	几何结构	点 Point
		拓扑结构	单元格 Cell
		属性数据	附加信息

图 3 数据集的分类和结构组成

数据集的构建工作主要在图 2 中的各个图形显示接口中实现，不同的图形数据需要不同的数据集来表示，一般来说，先用标准库容器 Vector 读入原始点云数据，然后通过循环按照点的 ID 将点依次插入到单个图元里，将各个图元插入到单元格阵列 (CellArray) 中

组成拓扑结构，最后创建数据集，并指定其几何结构和拓扑结构^[8]。

下面是创建图形数据步骤的主要代码的伪码：

```
//创建二维 Vector 接收原始数据
std::vector < std::vector < double > > vEntityData
(countEntity);

//for 循环存储原始数据
for(…)
{ vEntityData[i].pushback(…) ;}

//创建几何结构
vtkSmartPointer < vtkPoints > points =
vtkSmartPointer < vtkPoints > ::New();

//创建图元
vtkSmartPointer < vtkEntity > entity =
vtkSmartPointer < vtkEntity > ::New();

//创建拓扑结构
vtkSmartPointer < vtkCellArray > cellArray =
vtkSmartPointer < vtkCellArray > ::New();

//for 循环，将数据导入拓扑结构中
for(…)
{ //将点插入几何结构中
  points->InsertPoint(i,vEntityData[i][0], vEn-
  tityData
  [i][1], vEntityData[i][2]);
  //按照 ID 依次将点插入图元中
  entity->GetPointIds()->SetId(0, i);
  //将图元插入拓扑结构中
  cellArray->InsertNextCell( entity);}

//创建数据集对象
vtkSmartPointer < vtkDataSet > DataSet =
vtkSmartPointer < vtkDataSet > ::New();

//为数据集指定几何结构
DataSet->SetPoints( points);

//为数据集指定拓扑结构
DataSet->SetEntities( cellArray);
```

3.3 VTK 可视化管道

数据集构建好之后就可以建立可视化管道，数据集依次通过过滤器 (Filter) 和映射器 (Mapper) 对数据集进行滤波、映射处理^[9]，用图形对象 (Actor) 接收映射后的数据，从而完成了数据集到图形对象的转换，最后把图形对象添加到绘制器中，再由绘制窗口绘制并刷新即可完成三维图形显示。全部的三维可视化管道构建总流程如图 4 所示。

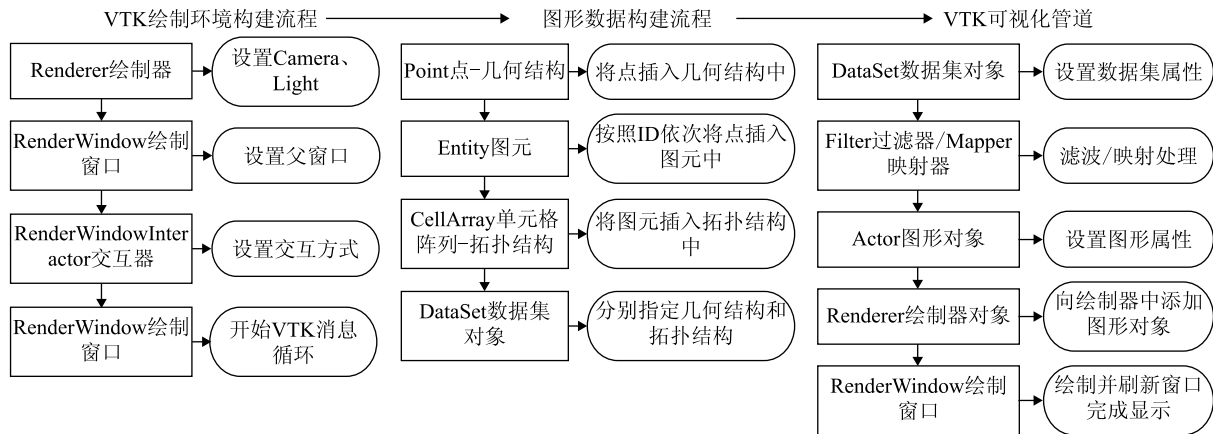


图4 三维可视化管道构建总流程

4 系统实现

4.1 软件系统界面

本软件在 Visual Studio 2010 平台上基于 C++、MFC 和 VTK 共同开发而成, 数据库操作通过 ADO 方式访问 Access 数据库实现, 目前已完成数据读取和编辑、测量点云拟合计算、基本图形的三维显示及人机交互操作等功能。软件界面上方为系统菜单栏和工具栏, 下方主视图的左侧是资源浏览视图, 右侧是三维显示视图。加载数据库后的软件界面如图 5 所示。

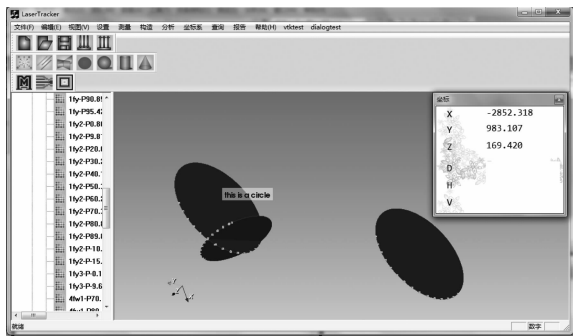


图5 软件总体界面

4.2 测量数据的处理与显示

4.2.1 数据读取和编辑

本软件可以实现对多种格式点云数据的读取, 包括 excel 格式和 txt 格式等。同时对系统数据库中的数据可以在菜单项中进行参数编辑、增加、删除等操作。

4.2.2 点云拟合算法的选择

本软件当前采用的拟合算法是最小二乘拟合法, 当测量的数据点具有代表性, 尤其是在已知形状求取参数的情况下使用非常有效^[10]。由于激光跟踪测量的点中有许多是特征点, 且大多数被测物形状已知, 测

量点并不太多, 因此采用最小二乘拟合算法拟合基础图形是较为合适的。其思想是测量数据和真实数据之间存在一个误差 v , 也叫残差。使所有测量点的误差的平方和最小, 此时求得的参数为无偏估计值, 满足条件的方程成为正规方程。

以球面拟合为例, 拟合步骤如下:

1) 给出球的一般方程:

$$(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2 - R^2 = 0 \quad (1)$$

式中: (X_0, Y_0, Z_0) 为球心坐标; R 为球半径。

2) 按半径 R 进行最小二乘计算, 以 (X_0, Y_0, Z_0, R) 为待估计参数, 线性化得到第 i 个测量点的误差方程:

$$v_i = \frac{X_0^0 - X_i}{R_i^0} \delta X_0 + \frac{Y_0^0 - Y_i}{R_i^0} \delta Y_0 + \frac{Z_0^0 - Z_i}{R_i^0} \delta Z_0 - \delta R - R^0 + R_i^0 \quad (2)$$

式中: v_i 为第 i 次观测的残差; X_0^0, Y_0^0, Z_0^0 为解算出的球心坐标作为真实值; X_i, Y_i, Z_i 为球面坐标的观测值; R_i^0 为解算出的球半径的观测值。

3) 建立正规方程 $A^T A X = A^T V$, 其中 A 为向量 X 的参数矩阵, $X = (X_0, Y_0, Z_0, R)^T$, $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T$ 。由此解算出待估计参数 (X_0, Y_0, Z_0, R) , 具体计算过程不再赘述。

4.2.3 实验测量数据与三维显示

本软件通过实验用激光跟踪仪测试观测直线、圆、球等得到测量所得点云数据, 共 203 个点, 导入数据库后显示所用时间为 0.01284 s, 点云及其所拟合图形的显示效果如图 6 所示。

软件根据三维图形整体计算一个包围盒, 进行全局显示和缩放, 当坐标系或计算单位发生变化时, 软件会调用绘制函数应对视图的变化。当鼠标悬停在图

形上方时,会显示半透明的悬浮窗描述当前图形的位置、误差信息,用户也可以自定义要显示的信息。当数据库发生变化时,如插入、删除、新建等,软件会进行相应的函数调用,如绘制图形、释放图形资源、清理可视化窗口等。

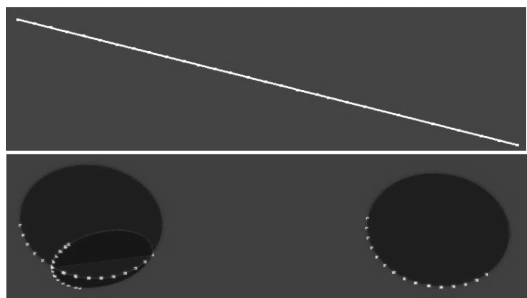


图6 点云拟合直线及空间中的圆

4.3 交互操作

本软件采用鼠标和快捷键结合的操作方式实现人机交互。用户可通过鼠标完成三维图形的旋转、缩放、平移、拾取、悬停查看等操作;通过工具栏的图标,用户可以打开图形编辑、坐标数据等窗口,操作简洁、流畅。以平移和旋转为例,系统的人机交互操作效果如图7所示,显示坐标系、坐标数据窗口及鼠标悬浮窗口如图8所示。

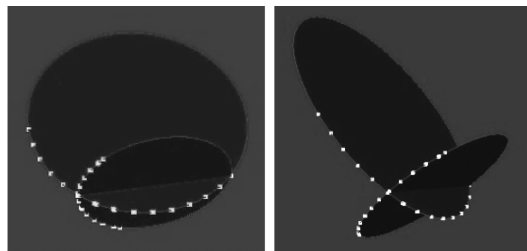


图7 平移+旋转前后效果

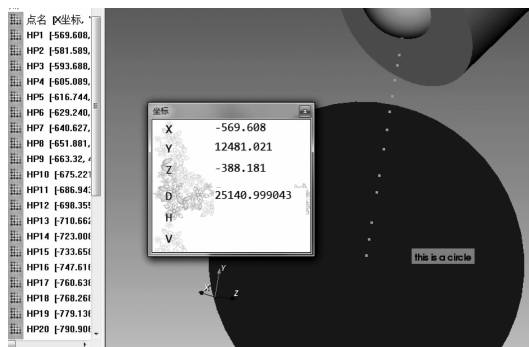


图8 坐标系、坐标数据窗口及悬浮窗口的显示

5 结语

本文设计开发的三维测量数据可视化软件实现了

测量数据的读取和编辑、数据拟合及图形的三维显示、人机交互等基本功能。软件运行流畅、有效,操作简洁,易于使用。相对于其他可视化工具,VTK能在较短的时间内开发出更复杂的显示和交互功能,显示效果更好,运行流畅度更高。应该注意到软件目前还达不到 SpatialAnalyzer 软件的高度,在通用性、集成度、功能性上仍存在差距,但其作为自带软件已有不错的应用,且会持续开发。本软件目前已成功应用于激光跟踪测量系统中,其研发也可为其他工业测量可视化项目提供借鉴,同时也助于发掘 VTK 在工程测量数据可视化领域的价值。

参考文献

- [1] 张博,彭军.激光跟踪测量系统[J].计测技术,2006,26(4):5-6,41.
- [2] New River Kinematics (NRK). Overview of Spatial Analyzer [EB/OL]. [2014-10-20]. <http://www.kinematics.com/spatialanalyzer/index.php>.
- [3] Geomagic. Overview of Geomagic Studio [EB/OL]. [2014-10-28]. <http://www.geomagic.com/en/products/studio/overview>.
- [4] Kitware Inc. Visualizing with VTK a Tutorial [J]. IEEE CG & A, 2000, 9: 20-27.
- [5] Frédéric Magoulès, Roman Putanowicz. Visualization of large data sets by mixing Tel and C++ interfaces to the VTK library [J]. Computers and Structures, 2007, 85: 536-552.
- [6] 毕林,王李管,陈建宏,等.基于VTK的矿体三维可视化研究与实现[J].计算机工程与应用,2008,44(10):78-81.
- [7] Kitware Inc. The VTK User's Guide [M]. New York: Published by Kitware Inc., 2010.
- [8] 余翔宇,徐义贤,王彬彬.基于VTK的地质体三维建模实现[J].工程勘察,2014(2):64-72.
- [9] 罗火灵,许永忠,陈世仲.基于VTK和MFC的医学图像三维重建研究与实现[J].生物医学工程学进展,2010,31(1):23-28.
- [10] 贺磊,黄桂平,李广云,等.工业测量数据的可视化方法研究[J].信息工程大学测绘学院学报,2004,12(4):305-308.

订阅本刊可通过邮局或直接与编辑部联系。邮发代号:80-441。全年定价60元。

本刊优先刊登受各类基金资助产出的论文,欢迎赐稿!

欢迎发布技术和产品信息!