

## 基于激光扫描数据的三维可视化建模

路兴昌<sup>1</sup>, 宫辉力<sup>2</sup>, 赵文吉<sup>2</sup>, 张爱武<sup>2</sup>, 李小娟<sup>2</sup>

(1. 中科院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 首都师范大学三维空间信息获取与应用教育部重点实验室 北京 100037)



**摘 要:** 利用地面三维激光扫描仪获取的空间数据, 进行了三维空间地物可视化建模研究, 提出了利用地面固定激光扫描数据建立建筑物三维可视化模型的框架。针对激光扫描数据的特点进行了地物分离和降噪处理, 提取目标建筑物, 去除测量噪声和遮挡物; 应用平面分割和 Hough 变换对目标物识别并提取特征点、线、面, 进行目标建筑物立面整体匹配纠正, 在此基础上, 对原始测量数据进行重新采样和多站点拼接配准, 得到正确的、完整的目标建筑物立面信息; 通过构建三角网建立三维表面模型, 通过进行纹理映射实现三维模型可视化表达。试验结果表明, 利用上述方法可以有效地处理三维激光扫描获取的空间点位数据, 实现对建筑物快速三维可视化建模。

**关键词:** 激光扫描; 数据处理; 三维建模; 可视化**中图分类号:** TP391.9**文献标识码:** A**文章编号:** 1004-731X (2007) 07-1624-06

## 3D Visualization Modelling Based on Laser Scanning Data

LU Xing-chang<sup>1</sup>, GONG Hui-li<sup>2</sup>, ZHAO Wen-ji<sup>2</sup>, ZHANG Ai-wu<sup>2</sup>, LI Xiao-juan<sup>2</sup>(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Changchun 130012, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory on 3D Information Acquisition & Application, Capital Normal University, 105 W. 3<sup>rd</sup> Ring Rd. N., Beijing 100037, China)

**Abstract:** Using the spatial data captured via ground-based 3D (three-dimensional) laser scanner, a 3D visualization modelling study on spatial object was carried out, and the framework of establishing 3D visualization building model using terra laser scanning data was brought forward as well. Separation of ground objects from laser scanning data and denoising were done to extract the target building and to remove the measurement noises and occlusions from the building data acquired before according to the characteristics of laser scanning data. The whole matching correction to the facets of target building was implemented after the target object was recognized and the features of point, line and polygon were extracted by using planar segmentation and Hough transformation. The original measurement data were re-sampled and the multi stations were in register to get the exact and full facet information of the target building. The triangular meshes were built to generate a three-dimensional surface model and the model was visualized through texture mapping. The experiment result shows that the spatial location of points collected by 3D laser scanning can be effectively dealt with and visualization modelling on buildings can be achieved via the technique mentioned above.

**Key words:** Laser scanning; data processing; three-dimensional modelling; visualization

## 引 言

随着GIS向三维领域的不断发展, 三维城市建模日益成为数字城市研究的热点。传统的城市建模方法主要是由航空摄影测量来实现的, 即通过摄影测量直接获取房屋屋顶、树林表面等地物的三维坐标和地形表面的DEM进行几何建模, 通过航空影像提取建筑物和地面纹理进行纹理建模。例如, Grau通过利用航空影像提取三维场景中最小信息重建了建筑物的表面<sup>[1]</sup>, M. Pollefeys等也研究了利用航空影像重建三维场景的方法<sup>[2]</sup>。在国内, 程效军等利用数字摄影测量技术进行了城市三维建模研究<sup>[3]</sup>, 刘亚文等探讨了利用地图与单影像进行建筑物三维重建的新途径<sup>[4]</sup>。但是, 通过这种方式建立几何模型工作量很大, 精度也不高, 不能快速获取三维空间数据、精确地建立城市模型。

三维激光扫描是近年来迅速发展起来的一种新型空间数据获取手段和工具, 利用地面三维激光扫描系统可以进行

城市三维重建, 获取局部区域空间信息, 因而在城市建模研究与应用方面受到越来越广泛的关注。瑞典的TopEye机载系统、加拿大Optech公司的ALTM1020GG系统、美国的Fli—Mapl系统等都已经用于快速获取大面积三维地形数据。日本东京大学的Dinesh研究了直接从距离影像中提取相关几何特征(如道路、建筑物等)和纹理的相关算法及各种模板<sup>[5]</sup>。I. Stamos 和P.Allen<sup>[6]</sup>, S. F. El-Hakim等人<sup>[7]</sup>以及Y.Yu等人<sup>[8]</sup>也在利用激光扫描仪获取真实场景的3D数据并进而构建出具有真实感的3D模型方面作了大量工作。H., Zhao<sup>[9]</sup>和C. Frueh<sup>[10]</sup>则进一步构造了动态的3D数据获取系统以获取三维场景模型。V. Sequeira等人<sup>[11]</sup>通过集成激光扫描数据和CCD影像构建了真实感三维场景模型。J.-Angelo Beraldin等人<sup>[12]</sup>利用激光扫描仪获取的数据建立了真实世界的三维虚拟环境。国内的部分学者也在利用激光扫描数据重建三维模型方面作了大量的研究。例如, 李必军等人<sup>[13]</sup>利用车载激光扫描数据进行了建筑物特征提取研究, 提出了一套基于建筑物几何特征的信息挖掘方案, 可以直接从激光扫描数据中提取建筑物的平面外轮廓信息。张爱武等<sup>[14]</sup>针对激光扫描的特点提出了一种通过自适应采样重建室外场景表面的方法。

**收稿日期:** 2006-03-03**修回日期:** 2006-06-19**基金项目:** 北京市教委科技发展计划项目资助(KM200610028012)**作者简介:** 路兴昌(1972-), 男, 河南人, 博士生, 讲师, 研究方向为三维虚拟建模。

本文以三维城市建模中典型地物——建筑物为研究对象,探讨如何利用三维激光扫描仪获取空间数据并建立相应的地物模型的技术方法。

## 1 技术路线

本文主要研究具有以下特征的规则建筑物:(1)建筑物立面基本垂直于地面;(2)建筑物表面基本平滑;(3)建筑物转角基本为直角。

采用的研究方案是:首先根据已知信息对获取的原始扫描观测值进行地物提取,将地形数据与地物数据分离;其次对建筑物数据进行噪声去除处理,去除测量噪声、遮挡物(如树木等)的影响,得到建筑物整体信息;再次,通过基于平面特征的图像分割对建筑物进行识别,并根据建筑物自身特征,对连续扫描的激光测量断面进行整体匹配纠正,得到建筑物特征点和二维平面特征;之后,再根据总体纠正信息对原始测量数据进行重新采样和计算,得到反映建筑物表面几何特征的三维扫描坐标;最后对三维坐标进行建模与三维可视化处理。

研究采用的技术路线如图 1 所示。

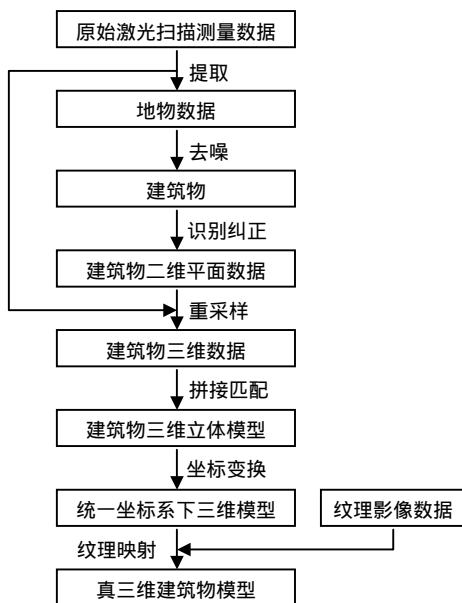


图 1 基于激光扫描的空间地物建模技术路线流程图

## 2 建模过程

### 2.1 数据获取

三维空间信息获取的实质是对空间定位数据采集,利用激光扫描技术可以快速、准确地采集到三维空间数据。本研究中,我们利用软件平台 RiSCAN PRO 控制 RIEGL 三维激光扫描仪对特定的建筑物实体和反射参照点进行扫描,尽可能多地获取实体相关信息。由于需要获取多幅重叠扫描图像,我们选择了 11 个反射参照点对目标实体进行扫描,如图 2 所示。图中白色圆点即为我们选定的反射参照点,右边表格中是反射点相关信息。



图 2 反射参照点及其相关信息

在扫描时,我们从当前视点选择一个矩形区域,然后激光会按照先从上到下(逐行),再从右到左(逐列)的方向来扫描投射在此矩形区域中的实际场景点。由于扫描过程是逐行逐列进行的,就像光栅扫描显示器一样,因此扫描得到的数据自然地表现为一种矩阵形式,每个矩阵单元的值获取的物体表面采样点的三维空间坐标。由于空间坐标反映了扫描点与视点之间的距离,因此扫描得到的图像称为距离图像或深度图像(Range Image)。图3为激光扫描获取数据的示意图。

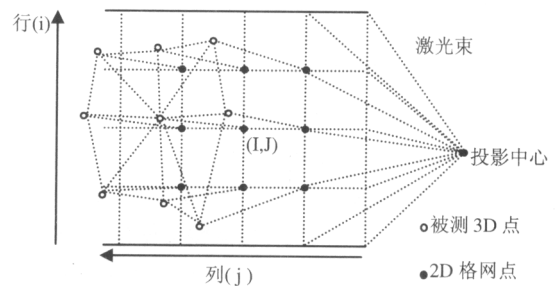


图 3 激光扫描原理示意图

在获取物体表面每个采样点的空间坐标后,得到的是一个点的集合,称之为“点云”(Points Cloud),它的每一个像素所包含的是一个距离值和一个角度值(图4)。三维激光扫描仪最终获取的是空间实体的几何位置信息、点云的发射密度值以及外置相机获取的影像信息,这些原始数据一并存储在特定的工程文件中。

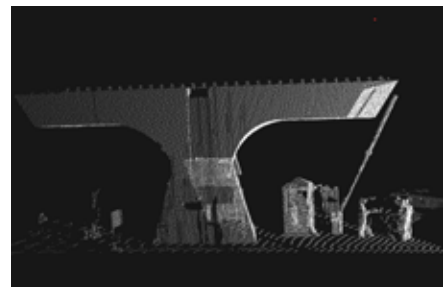


图 4 激光扫描仪获取的点云图像

### 2.2 数据处理

数据获取完毕之后的第一步就是对获取的点云数据和影像数据进行预处理,主要是清除不正确的数据,获取有效数据,为三维建模和可视化做准备。

### 2.2.1 地物提取

激光扫描获取的数据往往包含地形数据、建筑物数据和其它地物数据。地物提取的目的就是为了将目标建筑物从激光测量数据中分离出来,为后续处理提供基础数据。地形数据与地物数据分离法则为:高度值小于仪器高度的点视为地形点数据;高度值大于仪器高度的点作为地物数据。

分离后的地物数据基本上保留了建筑物和其它地物原有的几何信息,在此基础上可以进一步进行数据分离操作,将目标建筑物提取出来。建筑物数据与树木等地物数据的分离比较困难,我们将目标建筑物之外的地物作为噪声进行去噪处理。

### 2.2.2 去噪滤波(Filtering)

树木、行人、车辆等位于三维激光扫描仪与主要被测物之间的遮挡物,通过激光扫描后会在主要被测物之后形成散乱点或者空洞等噪声。对目标建筑物数据去噪滤波就是为了去除测量噪声、遮挡物(如树木等)的影响,得到建筑物数据。滤波去噪过程如下:根据激光扫描回波信号强度辨别,回波信号强度低于阈值时,距离信号值无效;利用中值滤波,剔除奇异点;利用曲面拟合去除前端遮挡物。通过上述方法处理,可以剔除原始点云数据中的错误点和含有粗差的点。

上述地物分离、滤波去噪过程主要利用 RIEGL LMS420i 激光扫描仪所附带的软件 RiSCAN PRO 进行。在完成了建筑物分离、去除无效点、提取目标区等操作之后,目标建筑物被提取出来并以适当的文件形式输出保存以便进行三维建模。图5为去除噪声后的目标建筑物深度点云图像。从图中可以看出,点云数据的上述处理过程可以实现目标地物的快速提取,其精度和准确性可以满足建模与可视化的需要。

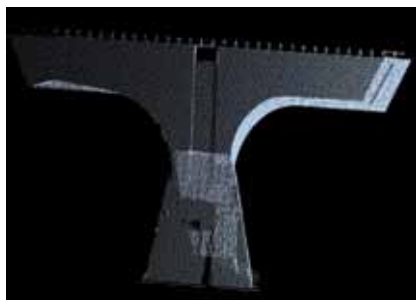


图5 去噪滤波后的目标建筑物点云图像

为了能提供以后处理的数据,所导出的文件中必须至少包含以下信息:(1) 目标区每个点的三维坐标;(2) 目标区每个点在整个扫描视点中的索引;(3) 每个视点的行数和列数。我们通过读取.3PF文件(二进制文件)来获取每个点的坐标和目标区的点数目,再读取两个文本文件来得到每个点在整个视点中的索引。

### 2.2.3 几何纠正

从距离影像中挖掘几何形体特征最重要的就是探测特征点,通过提取目标特征点,如边界点、转角点等,由特征

点构建特征线和特征面,获得经过总体纠正后的建筑物二维平面数据。

我们首先应用基于平面特征的算法进行图像分割。算法描述如下:对深度图像上的每一点 $P$ ,构造其 $k \times k$ 邻域中所有点的协方差矩阵 $A = \sum_{i=1}^N ((v_i - m)^T \cdot (v_i - m))$ ,其中 $v_i$ 是邻域中的点, $m$ 为邻域点集的重心;根据协方差矩阵 $A$ 的最小特征值来衡量点 $P$ 平面拟合的好坏,从中提取出客观表达目标地物形体变化的特征点。通过进行图像平面分割,淘汰了那些拟合不好的点并同时求出了拟合成功的点的法向量。最终我们得到若干集合,同一集合内的点都处于同一平面上,从而实现了点对云数据进行识别分类。通过阈值的调整,可以保证每个点集中的点数足够得多,从而较好地拟合实际的平面,得到很好的分割结果。

然后,我们以特征点为界,利用Hough变换将不连续的边缘像素点连接起来进行直线拟合,在离散点中提取线性信息,得到边界曲线。这样,就保留了大部分主要被测物的特征数据,激光穿过透明物体形成的散乱点被删除。经过处理的点、线,由于顾及了建筑物的整体特征,因此可以更好、更正确地表达建筑物的平面特征,从而对激光扫描测量的各个立面进行了整体匹配纠正。

### 2.3 三维建模

模型是对实体对象的抽象表示,建立模型的几何描述是对被处理对象进行设计、分析、模拟和研究的基础。对空间对象进行三维建模,才能对其进行三维真实表达,进而才可能在计算机中对现实世界进行仿真和模拟。

三维空间对象模型从总体上可分为几何模型和纹理模型两大类,适用于图形表示的几何模型又分为点模型、线模型、面模型和体模型四类。我们应用面向对象技术进行三维建模,下面是基于面向对象的三维目标数学模型的形式化描述:

```
Complex Volume Object = < Volume1, ..., Volumen >
Volumei = < Surface1, ..., Surfacen >
Surfacei = < Triangle1, ..., Trianglen >
Trianglei = < Node1, Node2, Node3 >
Texture = < Texture1, ..., Texturen >
Textureij = < Texturei, Surfacej >
```

对于经过预处理的激光扫描点云数据,需要进一步建立空间数据模型。

#### 2.3.1 重采样

根据建筑物的总体纠正信息对原始测量数据进行重采样,就可得到反映建筑物表面几何特征的三维扫描坐标,主要是正确获得建筑物的立面几何信息。算法为:将每一扫描线看成分段光滑曲线,从上至下(或从左至右),进行局部二次拟合,得到逼近的距离图像;检测深度和拟合点的法向连续性,并生成边缘映射图,提取三维轮廓边缘;由二维网格链码跟踪获取不同的边缘链,沿边缘链搜索并确定边缘拐点,去除小于某一长度的边缘链;根据用户指定将距离图像等分为 $N$ 幅子距离图像,各子图像间有且仅有一重叠边,分



别在子距离图像内进行自适应采样。通过进行数据重采样,可大大减少计算时间代价。

### 2.3.2 拼接匹配

一个完整的实体用一幅扫描图像往往是不能完整地反映实体信息的,因此需要在不同的位置对它进行多幅扫描,将这些从不同位置获取的深度图像配准(Register)到一个坐标系下。因此,多幅扫描结果之间的拼接匹配,实际上就是要找出两个坐标系之间的变换关系,解决坐标变换的问题。这种关系一般用一个  $3 \times 3$  的旋转矩阵  $R$  和 3 维平移向量  $t$  来描述,配准就是要求解出  $(R, t)$ 。为了求出  $R$  和  $t$ ,需要在两幅深度图像中找出若干组对应的特征,根据这些对应特征来求解  $R$  和  $t$ 。假设在实际场景中的某一点  $P$  是我们认为的特征,在两幅深度图像中,我们分别找到两个点  $P$  和  $P'$ ,并认为这两个点是  $P$  分别在两幅图像中的位置。由于扫描仪采样时分辨率的限制以及噪声的存在,  $P$  和  $P'$  往往与实际的  $P$  存在误差,这就会导致求出的  $R$  和  $t$  也存在较大的误差。传统的匹配方法要求待匹配的两点集采样分辨率相同、无遮挡和自遮挡现象,且两点集的数据完全配准,实际上很难满足。因为平面的面积大使得其清晰易辨,因而对应关系很好确定,同时手工选平面也操作简单。另一方面,每一个平面都是对很多扫描点做拟合得到的,因此选择平面作为特征进行图像拼接匹配可快速准确地在有重叠区域的两个位置数据点集间寻找对应点,具有较好的准确性和鲁棒性。

该算法实现过程描述如下:对平面分割得到的若干个平面(每一个点集对应了一个平面)进行平面拟合,得到其法向量。从两组深度点云数据中选取  $k$  对相对应的平面,通过利用对应的法向量最小化  $\sum_{i=1}^k w_i \|n_i - Rn_i'\|^2$  先求解旋转矩阵  $\hat{R}$ 。其中,  $n_i$  和  $n_i'$  分别为第  $i$  个平面的法向,  $w_i$  为第  $i$  对平面的特征权值;再通过最小化  $\sum_{i=1}^k w_i (n_i^T (m_i - (\hat{R}m_i' + t)))^2$  并对  $t$  求导,就可以得到平移向量  $t$ 。其中,  $m_i$  和  $m_i'$  为第  $i$  个平面的重心。

在 RiSCAN PRO 软件中,我们以前述选取的 11 个特定反射参照目标当作地面控制点,利用它们的高对比度特性实现扫描影像的定位以及扫描数据和影像数据之间的匹配,不同位置点获取的多幅点云数据最后被拼接匹配在统一的工程坐标系(Project Coordinate System, PRCS)下。

### 2.3.3 表面重建

激光测距扫描仪只是生成点云图像,而在实际应用中我们需要具有实际意义的三维物体表面。通过全排序操作并考虑所有可能的“约束条件”(例如折线),将表面邻近部分的邻接关系和特殊特征(例如边)加以保留,以确定建筑物表面总的拓扑结构。然后判断并取舍上述邻接关系,生成相应的三角网格,最终将重采样得到的点云转换成一个一致的多边形网格模型。如果以相邻 4 点构成的邻域为一个基本单位,在这个基本单位中,按照一定的判别条件可分别生成 0 个、

1 个或 2 个三角网格,再考虑连接的方向,最终可能生成的网格共有 7 种情况,如图 6 所示。

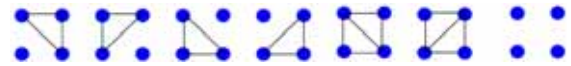


图 6 相邻 4 点的基本单位生成网格的 7 种形式

对每一个基本单位,根据这 4 个点的位置关系,可以生成上述 7 种情况中的一种网格形式,产生的三角化网格要满足一定的质量要求,例如限制网格元素的大小、折线不相交等。

由于室外场景存在遮挡和自遮挡,以及材料表面对激光的不同反射特性,以致主要被测物表面某些区域无法采样而产生许多空洞,故要求网格在生成过程中自动识别空洞。生成四边形网格并进行三角剖分,是解决这一问题的有效办法。四边形网格可按水平和垂直采样顺序将采样点简单连接,并将空洞部位记为背景点。设四边形为  $\{C_{ij}, C_{ij+1}, C_{i+1,j+1}, C_{i+1,j}\}$ ,如果四边形的顶点中有三个或三个以上的顶点是深度不连续点,则放弃此四边形,否则保留;如果四边形的顶点中有一个或一个以上的顶点为背景点,则放弃此四边形,否则保留。这样,在四边形网格剖分过程中自动识别空洞。对一个四边形  $\{C_{ij}, C_{ij+1}, C_{i+1,j+1}, C_{i+1,j}\}$  沿其对角线可分成两三角形,我们以对角线短的剖分为主并进行边缘细节突出处理,使剖分结果既与整体形状分布一致,又适应形状细节变化。

最后生成的三角形网络能较好地逼近三维轮廓表面,采用真实感图形计算的方法分别进行三角面片的划分镶嵌,由线模型生成面模型,并进一步生成体模型。

## 2.4 三维可视化

可视化是指模型或数据在经过一定处理后显示在计算机屏幕上的过程,三维可视化在 GIS 中可以用于增强用户与数据、模型之间的交互操作性能,尤其是在虚拟现实中使用户沉浸于三位场景终于模型、数据直接进行交互操作,具有广泛的应用前景。

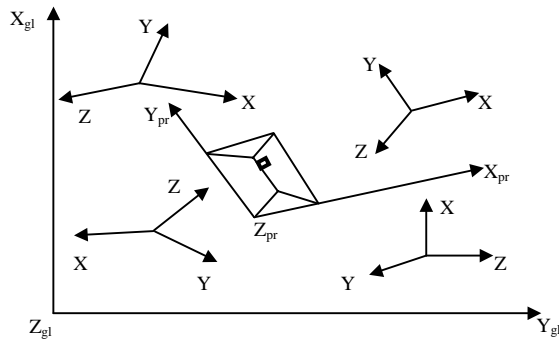
三维可视化是在计算机图形显示设备上通过生成高度真实三维图形实现的。

### 2.4.1 坐标变换

坐标变换是指对需要显示的对象进行平移、旋转或缩放等的数学变换。在激光扫描的同时,采用传统手段(如全站仪测量),获得每幅扫描中控制点的坐标和方位,再进行坐标转换、计算,就得到了空间建筑物实体点云数据在统一的绝对坐标系(Global Coordinate System, GLCS)中的坐标,如图 7 所示。坐标变换是进行正确三维显示的基础。

### 2.4.2 纹理映射

为了增加模型的逼真性和现实性,可以在三维模型的灰度图上增加纹理使其成为具有纹理属性的三维模型。根据物体的材质或自然常识对物体设置一定的颜色或对其贴合一定的自然纹理,可以增强物体的真实感。纹理的意义可简单



先将扫描仪视点坐标系  $S_p$  变换到工程坐标系  $P_r$  下，  
再转换到大地全局坐标系  $G_l$  下

图7 点云数据坐标变换

归纳为：用图像来替代物体模型中的可模拟或不可模拟细节，提高模拟逼真度和显示速度。

建筑物的表面并不是一个简单的平面，而是具有门窗和框架结构的复杂图案表面，这些建筑物模型的细节如果也采用三维模型来表示将大大增加数据量和模型的复杂度，对于速度也是非常不利的。通过纹理映射的方法来模拟出这些细节，则很好地解决了这个问题，兼顾了系统对速度和逼真度的要求。

我们用获取的点云强度信息和同步外置数码相机获取的影像信息对已建立的三维模型进行纹理细节的描述，实现可视化显示。首先，将三维建筑物模型进行投影变换；然后，选取对应点，将二维纹理图像的像素信息赋予相应的三维数据点；最后，通过计算，将三个顶点颜色的平均值赋予此三角面片，这样就得到了有颜色纹理信息的三维模型。

### 3 算法验证与试验结果

我们在试验中采用奥地利产品RIEGL LMS-Z420i，CCD相机传感器在室内标定完成，扫描仪传感器通过室外定标。试验对象为一幢形体比较规整的建筑物，由激光扫描仪直接对建筑物连续进行逐面扫描，CCD数码相机直接获取目标纹理信息，通过编写基于Windows平台的VC++算法程序可输出相应的处理结果。图8为目标建筑物在一个视点下的全景CCD影像，图9、图10和图11分别为对建筑物一侧进行扫描数据处理后的部分算法试验结果。其中，图9中为基于平面特征的图像分割结果，图10和图11分别为点云拼接匹配前后的图像。从图中可以看出，点云数据按照平面特征被识别和分类，配准的结果较为令人满意，表面重建过程既保证了模型边缘质量，有效地去除了冗余数据。

图12为利用场景编辑软件CVREdit实现的建筑物三维可视化场景，图中树木及地面场景用CCD影像数据贴合生成。图12显示结果表明本文所述方案能够快速对建筑物进行三维精准建模。从数据处理结果来看，建筑物总体结构的完整性保持较好，但对建筑物立面几何纹理不能很好表达，少数特征点的判断需要人机交互式处理。



图8 目标建筑物的全景CCD影像

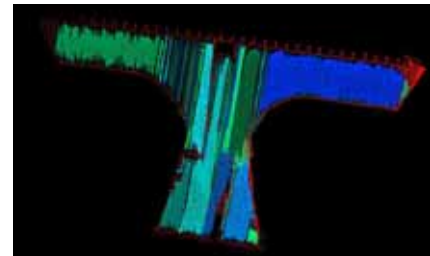


图9 平面分割后结果



图10 配准前的两个视点

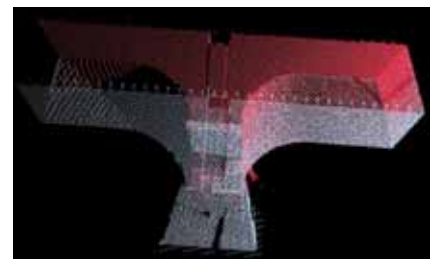


图11 配准后的两个视点



图12 目标建筑物三维场景

### 4 结论

本文通过对用三维激光扫描系统获取的建筑物信息进行特征提取，分析研究了利用点云数据构建三维空间信息模型的技术方法和过程，并在此基础上实现了场景的三维可视化仿真显示。实践证明，本文采用的点云数据处理方法具有如下特点：滤波去噪在扫描仪自带软件中完成，能够快速去

除噪声、提取目标区域;基于平面特征的图像分割和匹配拼接能够较好地实现点云数据的识别分类和快速精确配准;从距离图像中提取特征点能够把握建筑物的总体信息(边界、转角等),并能够从中提取二维平面特征和三维建模信息;自适应重采样有利于减少计算时间;基于四边形网格的三角剖分能够自动识别空洞。所有这些,都是城市规则建筑物点云数据处理和三维重建中关键的技术问题。今后还需要在以下方面做进一步的研究:建筑物的细节(窗户、门廊等)信息与测量误差的识别;点云数据处理的精度与准确性匹配;不规则建筑物边界及立面信息的提取等。随着三维激光扫描技术的迅猛发展,采用激光扫描获取三维空间数据也会越来越成熟,其理论和应用都将促进空间信息采集与处理技术的进一步发展。

### 参考文献:

- [1] Grau O. A Scene Analysis System for the Generation of 3-D Models [C]// Proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Canada. 1997.
- [2] Pollefeys M, Koch R, Vergauwen M, *et al.* Automated Reconstruction of 3D Scenes from Sequences of Images [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (S0924-2716), 2000, 55(4): 251-267.
- [3] 程效军, 朱鲤, 刘俊领. 基于数字摄影测量技术的三维建模 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 37-41.
- [4] 刘亚文, 张祖勋, 张剑清, 等. 利用地图与单影像进行建筑物三维重建的新途径 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(2): 146-149.
- [5] Dinesh M, Ryosuke S. Auto-extraction of Urban Features from Vehicle-Borne Laser Data [C]// Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa. 2002.

(上接第1463页)

足进行改进,同时应用本体模型设计 agent 知识库系统与推理机制,进而实现系统复杂重构机理与协商机制的平台实现。

### 参考文献:

- [1] Mönch L, Stehli M. An Ontology for Production Control of Semiconductor Manufacturing Processes [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence (S0302-9743), 2003, 2744(1): 189-200.
- [2] Borgo S, Leitao P. The Role of the Foundational Ontologies in Manufacturing Domain Applications. [EB/OL]. (2003-03-20) [2005-05-20]. <http://www.loa-cnr.it/Papers/>.
- [3] Suárez S, López B, Melendez J. Towards Holonic Multiagent Systems: Ontology for Supervision Tool Boxes [EB/OL]. (2002-10-20) [2005-04-20]. <http://eia.udg.es/ar1>.
- [4] Vrba P. MAST: Manufacturing Agent Simulation Tool [C]// IEEE Conference of Emerging Technologies and Factory Automation. USA: the IEEE Inc. 2003.
- [5] 李文杰, 冯志勇, 陈钢. 基于本体的自动工艺系统 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(3): 253-257.
- [6] Koren Y, Heidel U. Reconfigurable Manufacturing Systems [J]. Annals of the CIRP (S0007-8506), 1999, 48(2): 527-540.
- [7] Lohse N, Ratchev S, Valtchanov G. Towards Web-enabled Design of Modular Assembly Systems [J]. Assembly Automation (S0144-5154), 2004, 24(3): 270-279.

- [6] Stamos I, Allen P E. 3-D Model Construction Using Range and Image Data [C]// Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Hilton Head Island. 2000.
- [7] El-Hakim S F, Brenner C, Roth G. A Multi-sensor Approach to Creating Accurate Virtual Environments [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (S0924-2716), 1998, 53(6): 379-391.
- [8] Yu Y, Ferencz A, Malik J. Extracting Objects from Range and Radiance Images [J]. IEEE Trans, Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2001, 7(4): 351-364.
- [9] Zhao H, Shibasaki R. A System for Reconstructing Urban 3D Objects Using Ground-based Range and CCD Sensors [C]// In: Urban Multi-Media/3D Mapping workshop, Institute of Industrial Science (IIS), The University of Tokyo. 1999.
- [10] Frueh C, Zakhor A. 3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, USA. 2001.
- [11] Sequeira V, Ng K, Wolfart E, Goncalves J G M, Hogg D. Automated Reconstruction of 3D Models from Real Environments [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (S0924-2716), 1999, 54(1): 1-22.
- [12] Beraldin J Angelo, Blais F, Boulanger P, *et al.* Real World Modelling through High Resolution Digital 3D Imaging of Objects and Structures [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (S0924-2716), 2000, 55(4): 230-250.
- [13] 李必军, 方志祥, 任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(1): 65-70.
- [14] 张爱武, 孙卫东, 李风亭. 基于激光扫描数据的室外场景表面重建方法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(2): 384-391.

ZHANG Ai-wu, SUN Wei-dong, LI Feng-ting. A Method of Surface Reconstruction of Outdoor Scenes from Laser Scanning Data [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(2): 384-391.

- [8] Sprumont F, Muller J P. AMACIOA: a Multi Agent System for Designing Flexible Assembly Lines [J]. Applied Artificial Intelligence (S0883-9514), 1997, 11(6): 573-589.
- [9] Botelho L, Willmott S. Review of Content Language Suitable for Agent Communications [CP/OL]. (2000-03-08) [2004-05-15]. <http://ic2.epfl.ch/publications/>.
- [10] Martinez M, Campagne J P, Ghroud S. Dynamic Assembly Sequences-a Multi Agent Control System [C]// IEEE symposium on Emerging Technology and Factory Automation. USA the IEEE Inc. 1995.
- [11] Carridi M, Sianesi A. Multi-agent Systems in Production Planning and Control: an Application to the Scheduling of Mixed-model Assembly Line [J]. I. J. of Production Economics (S0925-5273), 2000, 28(1): 29-42.
- [12] Bussmann S, Sieverding J. Holonic Control of an Engineer Assembly Plant: an Industrial Evaluation [C]// 2001 IEEE International Conference of Systems, Man, and Cybernetics. USA the IEEE Inc. 2001.
- [13] 黄雪梅. 智能可重构柔性装配生产线基础理论与数字验证平台研究 [R]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2004.
- [14] Horridge M, Knublauch H, Rectori A, *et al.* A Practical Guide to Building OWL Ontologies Using the Protege-OWL Plugin and CO-ODE Tools Edition 1.0 [EB/OL]. (2001-05-08) [2004-12-10]. <http://www.co-ode.org/resources/tutorials/ProtegeOWLTutorial.pdf>.