

# 基于激光扫描技术的三维模型重建

Nguyen Tien Thanh<sup>1,2,3</sup> 刘修国<sup>3,4</sup> 王红平<sup>3,4</sup> 于明旭<sup>5</sup> 周文浩<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> 中国地质大学国际合作学院, 湖北 武汉 430074; <sup>2</sup> 河内矿业与地质大学, 越南 河内 130510

<sup>3</sup> 地理信息系统软件及其应用教育部工程中心, 湖北 武汉 430074; <sup>4</sup> 中国地质大学信息工程学院, 湖北 武汉 430074

<sup>5</sup> 中国地质大学研究生院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 通过分析三维激光扫描系统获取的点云数据,得到了利用点云数据构建三维模型的技术、方法和流程。介绍了利用地面三维激光扫描仪获取点云数据的过程以及结合 RiSCAN PRO 软件和 Geomagic Studio 软件进行建模的方法。对原始测量的点云数据进行处理(去除噪声,平滑,对多站点数据做拼接配准,提取目标建筑物等)得到正确和完整的目标建筑物的表面信息,然后构建三角网建立它的三维表面模型,最后通过所拍的照片进行纹理映射得到真实的三维模型。实验结果表明,利用上述方法可以有效地处理三维激光扫描获取的点云数据,实现对建筑物快速三维可视化建模。

**关键词** 激光光学;三维激光扫描技术;三维建模;点云数据处理;纹理映射

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.081201

## 3D Model Reconstruction Based on Laser Scanning Technique

Nguyen Tien Thanh<sup>1,2,3</sup> Liu Xiuguo<sup>3,4</sup> Wang Hongping<sup>3,4</sup> Yu Mingxu<sup>5</sup>  
Zhou Wenhao<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> Faculty of International Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>2</sup> Faculty of Surveying and Mapping, Ha Noi University of Mining and Geology, Ha Noi 130510, Viet Nam

<sup>3</sup> Engineering Research Center for GIS Software and Applications, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>4</sup> Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>5</sup> Graduate School of China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** The technique, method and workflow of building 3D model through the use of 3D laser scanning system to acquire point cloud data are presented. The point cloud data acquirement process and the combination of RiSCAN PRO software and Geomagic Studio software to build 3D model are discussed. The original measurement data (noise elimination, smoothing, data registration, target object extraction and so on) are processed to get the exact and full facet information of the target, and then a triangular mesh model is built for the target. Finally, through texture mapping done by using photos taken in the data acquirement process, the real 3D model of the target object is got. The experiment shows that the point cloud acquired by 3D laser scanning system can be effectively dealt with and the 3D model can be achieved via the technique mentioned above.

**Key words** laser optics; 3D laser scanning technique; 3D modeling; point cloud process; texture mapping

**OCIS codes** 120.0280; 280.3640; 100.2000; 100.2960; 100.6890

**收稿日期**: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-19

**基金项目**: 储量估算、矿体三维与资源量管理系统开发项目(KZ091905)资助课题。

**作者简介**: Nguyen Tien Thanh(1984—),男,硕士研究生,主要从事三维地理信息系统方面的研究。

E-mail: tdgis\_ntthanh@163.com

**导师简介**: 刘修国(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事三维地理信息系统与遥感等方面的研究。

E-mail: liuxg318@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

## 1 引言

三维激光扫描技术是最近几年迅速发展并成熟的一项高新技术<sup>[1]</sup>,是继 GPS 之后测绘技术的又一新突破。三维激光测量技术的出现克服了传统测量的局限性。它不仅能够量取被测对象的长宽高,还能够对对象进行无接触扫描,可以将所扫描到的空间信息快速转换成计算机可以处理的数据,并且拥有许多独特的优势:1)数据获取速度快,实时性强;2)数据量大,精度较高;3)主动性强,能全天候工作;4)全数字化,信息传输、加工、表达容易<sup>[2]</sup>。

通过三维激光扫描系统能够快速获取区域的三维空间信息,进行三维模型重建,因而它在三维建模研究与应用领域受到越来越广泛的关注,已成为三维空间数据获取的一种重要技术。如瑞典的 TopEye 机载系统,加拿大 Optech 公司的 ALTM1020GG 系统,美国的 Fli\_Map1 系统等都已经用于快速获取大面积三维地形数据。Dinesh 等<sup>[3]</sup>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。Stamos 等<sup>[4~6]</sup>通过激光扫描技术对场景三维数据的获取与三维模型建模进行了深入的研究。Sequeira 等<sup>[7]</sup>利用激光扫描数据和 CCD 影像构建了具有真实感的三维场景模型。在国内许多学者在这方面也做了大量的研究。例如,李必军等<sup>[2]</sup>通过车载激光扫描数据进行了建筑物特征提取研究,张爱武等<sup>[8]</sup>针对激光扫描技术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。

本文以 Riegl 的 VZ-400 激光扫描仪<sup>[9]</sup>为例,结合三维激光扫描仪的工作原理,分析和研究从三维数据获取到三维建模的整个流程。

## 2 三维激光扫描原理

地面三维激光扫描系统由地面三维激光扫描仪和系统软件、电源以及附属设备构成。三维激光扫描仪的构造主要包括:一台高速精确的激光测距仪,一组可以引导激光并以平均角速度扫描的反射棱镜,内置的数码相机,可以直接获得目标物的影像。通过转动装置的扫描运动,完成对物体的全方位扫描,然后进行数据整理,通过一系列处理获取目标表面的点云数据<sup>[10]</sup>。

三维激光扫描仪的工作原理是通过激光发射器发射出一个窄波脉冲,它被分为两部分,一部分发送到接收机并启动时间测量器件,另外一部分发送到目标物体。当激光束到达被扫描目标物体的表面时发生后向反射,并且部分激光束返回到探测器。脉冲的辐射强度转化成了电流,然后在接收机放大并发送到时间辨别器中,时间辨别器进行定时(记录返回脉冲的时刻)并停止时间测量器件。发射脉冲和接收回波脉冲之间的时间间隔  $t$  通过时间数字转换器(TDC)测量。TDC 是一个高频(如 100 MHz)脉冲振荡器,使用数字计算技术及模拟插值方法计算计时器的号码,到达目标的距离为

$$D = ct/2, \quad (1)$$

式中  $D$  是距离,  $c$  是光速。

三维激光扫描仪的原始观测数据包括:1)根据两个连续转动的用来反射脉冲激光的镜子的角度值得到激光束的水平方向角和竖直方向角。2)根据激光传播的时间计算得到仪器到扫描点的距离,再配合激光束的水平方向角和竖直方向角,可以得到每一扫描点相对于仪器的空间相对坐标。3)扫描点的反射强度等。根据前两种数据计算扫描点的三维坐标,扫描点的反射强度则用来给反射点匹配颜色。点的表示形式为  $(x, y, z, I)$ <sup>[11]</sup>,不仅包含点的空间位置还包含点的反射强度  $I$ 。其定位原理如图 1 所示。

三维激光扫描点的坐标  $(x, y, z)$  计算公式为

$$\begin{cases} x = S \cos \theta \sin \alpha \\ y = S \cos \theta \cos \alpha, \\ z = S \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

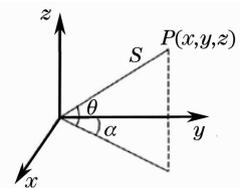


图 1 地面三维激光扫描系统的定位原理  
Fig. 1 Positioning principle of terrestrial laser scanning system

式中  $\theta$  为激光束的竖直方向角,  $\alpha$  为激光束的水平方向角,  $S$  为仪器到扫描点的斜距。

### 3 三维激光扫描系统工作流程

三维激光扫描系统工作流程如图 2 所示, 具体描述如下。

#### 3.1 三维数据获取

本文研究的是中国地质大学(武汉)的化石林中的两棵硅化木化石。应用 Riegl VZ-400 三维激光扫描仪随机附带软件 RiSCAN PRO 控制扫描过程。

1) 贴标靶点: 贴标靶点的目的是扫描得到它们的坐标, 使配准工作更加简单。要确保每一扫描站能扫到最少 3 个共同的标靶点。

2) 站点的设置: 为了可以完整扫描目标物体, 一共设置了 8 个扫描站。这里需要考虑到几个因素: ① 不同站点采集的数据需要拼接到同一坐标系下, 这就要求各站采集的数据要有重叠部分。一般来说重叠范围占 10%~20% 较为合适。② 尽可能使每一站都能扫到至少 3 个标靶点的坐标, 以便于以后的配准工作。③ 从扫描站点到被测对象应该没有遮挡。

3) 扫描阶段: 标靶点贴完, 站点设置好以后可以开始扫描。扫描过程可以分成 4 个阶段: ① 粗略扫描: 粗略扫描是为了确定被测对象大概范围和方位, 可以选择较低分辨率进行粗略扫描。② 精细扫描: 精细扫描是为了得到每个扫描点的坐标和反射强度(三维点云数据)。本研究将扫描的角度分辨率确定为  $0.05^\circ$ 。RiSCAN PRO 软件可以根据参数情况计算出精细扫描所需要的时间。③ 标靶点精细扫描: 精扫标靶点是为了得到标靶点的精确坐标。精扫以后, 在标靶点列表中有许多非标靶点被误检测为标靶点。如果对不在标靶点列表中的所有标靶点进行精扫的话, 将很费时间。可以根据标靶点的实际大小(圆形靶标: 50 mm)把非标靶点删掉, 这样可以节省很多扫描时间。④ 影像获取: 通过固定在激光扫描仪上的 Nikon D300s 数码相机采集照片。照片获取是为了以后做纹理映射工作。可以根据被测对象的开始角度和停止角度以及相邻两张照片之间的重叠范围来拍摄照片, 以减少信息的丢失。

#### 3.2 点云数据配准

由于需要扫描的真实场景的范围一般比较大, 受激光扫描仪视场角的限制以及物体间遮挡的影响, 每次扫描只能获取当前视点下的点云, 其坐标是相对于当前的仪器坐标系而言。为了构建研究区域完整的三维模型, 需要从不同的视点对场景进行扫描, 并将多个视点下获取的点云进行重新定位, 生成一个同一坐标系下的三维数据点集。点云配准实际上就是要找出两个坐标系之间的变换关系。这种关系可以用一个  $3 \times 3$  的旋转矩阵  $R$  和三维平移向量  $t$  来描述, 配准就是要求解出  $(R, t)$ 。为了求出  $R$  和  $t$ , 需要在两个坐标系下的空间数据找出最少 3 个同名点<sup>[12,13]</sup>。

在 RiSCAN PRO 软件中, 配准不同站点的扫描数据可以通过查找同名的标靶点(数量大于等于 3)的功能, 如果没有足够的共同靶标点, 可以通过手动选点选取 3 个以上的共同点(尽可能不在一个平面上的点)进行粗配准, 然后做精配准。配准工作完毕之后可以在 RiSCAN PRO 软件中将被测对象的点云数据输出为 \*.wrl 格式, 然后导入到 Geomagic Studio 软件中进行数据处理和三维建模。

点云数据配准前后的图像分别示于图 3 和图 4 所示。

#### 3.3 点云数据处理

1) 杂点的处理: 杂点就是测量错误的点<sup>[14,15]</sup>, 放大后就可看出, 是明显远离被测对象表面的孤立的点。三维激光扫描仪生成的点云里就有较多的杂点, 散布在物体四周, 轮廓边缘外尤其多。对这样的点, 一般用手工或使用分离点或轮廓功能将其选择后再删除。

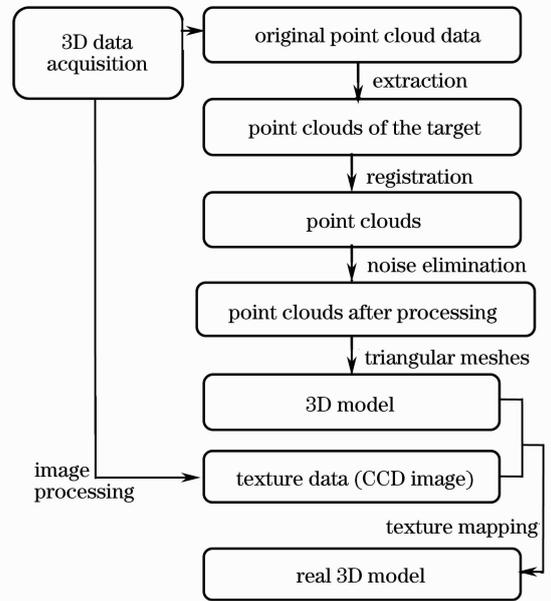


图 2 三维激光扫描系统工作流程图

Fig. 2 3D laser scanning system work-flow

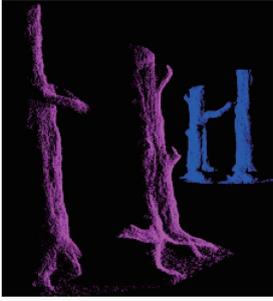


图3 配准之前图像

Fig. 3 Image before registration

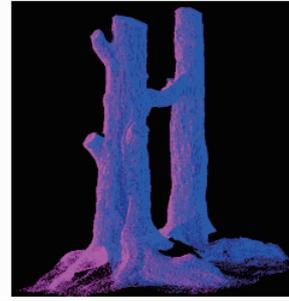


图4 配准之后图像

Fig. 4 Image after registration

2) 噪声去除:产生噪声点的原因是多方面的,包括由被测对象表面因素产生的误差<sup>[15]</sup>(表面粗糙、波纹、表面材质等),由扫描系统本身引起的误差,测量方法的缘故,扫描仪受到震动,测量数据存在系统误差和随机误差,也有可能由偶然噪音引起误差(比如在扫描时突然有一只小鸟从扫描区域飞过)。对于这些噪声点可以用去除噪声功能去除,从而让点云数据更加平滑。

3) 冗余点:冗余点是因拼接或测量角度等问题产生重叠的多余的点。对三角化之后的模型进行多边形修补或者使用去除特征的功能能检测出这些冗余点,然后进行处理。

4) 点云数量优化:因为点云数据是8个站点的点云数据的总和,数量很大,可以通过重采样将点云数据数量进行优化。

### 3.4 三维表面建模

在处理点云数据之后,下一步是建立两棵树化石的三维模型,流程如图5所示。

1) 构建三角网模型:这里的点云数据是由不规则离散点构成的,需要构成被测对象的实际表面。构建三角网模型是一种比较简单而实用的方法,可以恢复被测对象的拓扑关系的真实表面。

2) 多边形的修补:在扫描过程中由于遮挡的原因,致使扫描的点云数据不完整,存在一些数据空洞,这些数据丢失的地方无法构建三角网模型,所以要手工进行数据补充,最终形成较为完整的三角网模型。多余的点[见3.3中的第3)步]构成的多边形很容易相交,这些地方直接影响到模型建立的质量,所以要对它们进行删除然后再处理。

3) 去除多余部分:这一步要对错误的特征或者不要的特征进行去除。根据经验判断,不能去除特征的地方很可能有相交的多边形,这样要回到上一步对这些多边形进行修补然后再去除特征。

4) 多边形数量的调整:由于所扫描的点云数据是离散点,进行三角网建模时难免会产生冗余数据,例如一个平面只要有三个三角形构成,但是由于点云数据过密生成的三角形会远远多于三个,这样就产生了冗余数据,解决办法是对这些地方的三角网进行简化。反之如果点云数据的密度不够,生成三角网模型之后为了尽可能让被测对象的特征真实,可以对这些地方的三角网进行细化。

5) 多边形的平滑:可以使用平滑功能调整三角形之间的折皱角度而不改变三角形的数量。在此过程中可以

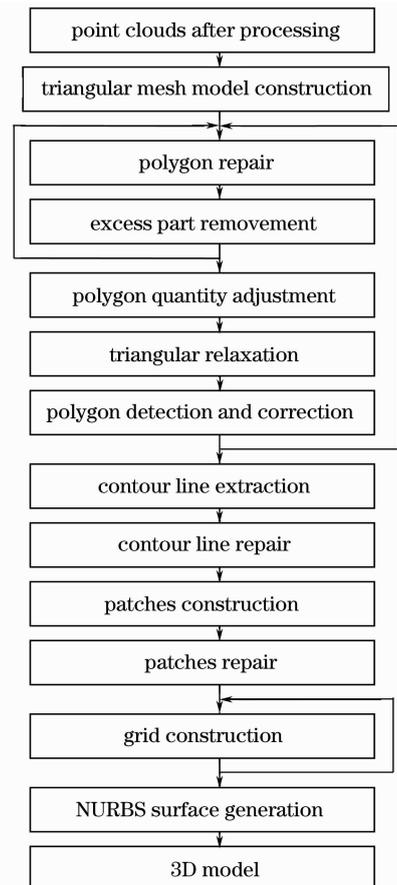


图5 三维表面重建流程

Fig. 5 3D model reconstruction process

对模型的局部或者整体做平滑处理。

6) 多边形检测与校正: 总体上要对整个三角网模型进行一次检测, 以确定是否还有相交的三角形的地方。如果还有要重新做第 2) 步到第 6) 步, 一直到整个三角网模型没有相交的三角形为止。

7) 提取轮廓线: 可以自动提取轮廓线或者手工提取轮廓线。针对不太复杂的对象可以手工提取轮廓线, 针对比较复杂的对象可以自动提取然后再修理。

8) 编辑轮廓线: 可以使用编辑轮廓线功能对错误或者不满意的轮廓线进行修理, 尽可能保持被测对象的自然特征。

9) 构造曲面片: 轮廓线是基准线, 曲面片的包围线是基于轮廓线扩展的。曲面片的构造是为了进一步构造网格。

10) 修理曲面片: 构造曲面片之后一般有 3 个错误类型(曲面片的包围线有相交路径, 较小的曲面片角度, 高度角点)会影响到曲面片的质量。可以用修理曲面片功能对这些错误的曲面片进行修理。针对前两类错误可以用编辑曲面片上的顶点的功能对顶点进行调整, 对于第三类错误而言, 解决办法是把这个高度角点删掉然后再重新生成。直到没有错误的曲面片(曲面片的形状尽可能接近矩形会更好), 就可以构造网格。

11) 构造网格: 基于曲面片生成网格, 带绿颜色的网格表示能比较好地拟合曲面, 带红色的网格是有错误的网格, 针对这种情况需要返回到第 10) 步重新修理曲面片, 调整一下然后再构造网格。

12) 拟合曲面: 网格构造好之后就可以基于每一个曲面片进行曲面拟合工作, 生成 NURBS 曲面, 结果如图 6 所示。

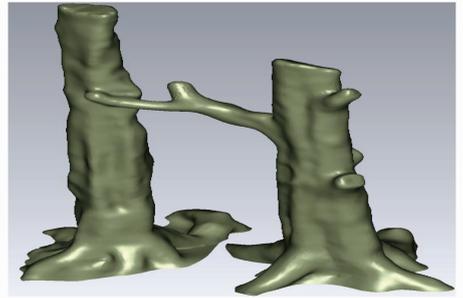


图 6 未映射纹理的三维模型

Fig. 6 3D model before texture mapping

### 3.5 纹理映射

纹理映射<sup>[16]</sup>是利用 RiSCAN PRO 软件中的纹理映射功能实现的, 通过所采集的高分辨率相片获取纹理信息, 并进行映射。因为拍照的过程当中使用的是 20 mm 的广角镜头, 会引起照片变形, 所以要把所拍的照片做无畸变的处理之后才可以做纹理映射工作。

一般来说, 一张照片只能映射一定的区域, 对于整个三角网模型而言要使用多张照片才能完全地覆盖整个模型, 所以把模型分开做纹理映射是一种很好的解决办法。分开模型做纹理映射时有两个问题要解决, 即裂缝和亮度差。为了避免裂缝的问题, 在纹理映射时可以把没有纹理的地方删除, 不过不要删除得过多, 要确保纹理映射之后的分块模型有一定的重叠度。照片的色调偏差问题可以通过 Photoshop 软件进行调整。最后把纹理映射之后的所有分块的模型拼在一起, 结果如图 7 所示。



图 7 纹理映射后的三维模型

Fig. 7 3D model after texture mapping

## 4 结 论

对三维激光扫描系统获取的点云数据处理进行了探讨, 阐述了利用点云数据构建三维模型的整个流程。研究了 RiSCAN PRO 软件和 Geomagic Studio 软件结合建模的方法, 对点云数据进行预处理、多站点拼接、三维几何建模、三维模型修补和纹理映射。三维激光扫描测量技术具有独特的优势, 将来会在数字城市、考古勘探、矿山监测等领域发挥更大的作用。但还有很多问题需要做进一步的研究, 例如: 原始数据大, 数据冗余, 点云数据处理的精度与拼接精度, 工程坐标系与地大坐标系之间的快速转换等。

## 参 考 文 献

- 1 Dai Shengshan, Li Tianfeng. Terrestrial laser scanning technology development and application prospects[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2009, **32**(4): 11~15  
戴升山, 李田风. 地面三维激光扫描技术的发展与应用前景[J]. *现代测绘*, 2009, **32**(4): 11~15
- 2 Li Bijun, Fang Zhixiang, Ren Juan. Extraction of building's feature from laser scanning data[J]. *J. Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, **28**(1): 65~70  
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
- 3 M. Dinesh, S. Ryosuke. Auto-extraction of urban features from vehicle-borne laser data[C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, **34**(4): 650~655
- 4 I. Stamos, P. E. Allen. 3-D model construction using range and image data[C]. Hilton Head Island; *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000, (1): 531~536
- 5 S. F. El-Hakim, C. Brenner, G. Roth. A multi-sensor approach to creating accurate virtual environments[J]. *J. Photogrammetry & Remote Sensing*, 1998, **53**(6): 379~391
- 6 Y. Yu, A. Ferencz, J. Malik. Extracting objects from range and radiance images[J]. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 2001, **7**(4): 351~364
- 7 V. Sequeira, K. Ng, E. Wolfart *et al.*. Automated reconstruction of 3D models from real environments[J]. *J. Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, **54**(1): 1~22
- 8 Zhang Aiwu, Sun Weidong, Li Fengting. A method of surface reconstruction of outdoor scenes from laser scanning data[J]. *J. System Simulation*, 2005, **17**(2): 384~391  
张爱武, 孙卫东, 李凤亭. 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
- 9 Zang Ke. A preliminary research based on Riegl 3D laser scanning data[J]. *J. Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2007, **28**(1): 77~82  
臧克. 基于 Riegl 三维激光扫描仪扫描数据的初步研究[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2007, **28**(1): 77~82
- 10 Han Guangshun, Feng Zhongke, Liu Yongxia *et al.*. Forest measurement principles and precision analysis of three-dimensional laser scanning system[J]. *J. Beijing Forestry University*, 2005, **27**(2): 187~190  
韩光瞬, 冯仲科, 刘永霞等. 三维激光扫描系统测树原理及精度分析[J]. *北京林业大学学报*, 2005, **27**(2): 187~190
- 11 Xu Zhiqin, Sun Changku, Zheng Yizhong. Structure parameters' optimization design of the color 3D laser scanning measurement system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 839~842  
许智钦, 孙长库, 郑义忠. 彩色三维激光扫描系统结构参数的优化设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 839~842
- 12 Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 533~536  
张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 533~536
- 13 Guan Yunlan, Cheng Xiaojun, Zhang Ming *et al.*. Three dimension laser scanning data registration method[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2008, (1): 53~57  
官云兰, 程效军, 张明等. 三维激光扫描数据配准方法[J]. *工程勘察*, 2008, (1): 53~57
- 14 S. Sotoodeh. Outlier detection in laser scanner point clouds[C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, **36**(5): 297~302
- 15 T. Vögtle, S. Wakaluk. Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (Leica) caused by different object materials[C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2009, **38**(3/W8): 68~74
- 16 B. Fausto, M. M. Ioana, R. Holly. High quality texture reconstruction from multiple scans[J]. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 2001, **7**(4): 318~332