

基于激光与可见光同步数据的室外场景三维重建

张爱武¹, 胡少兴², 孙卫东³, 李风亭³

- (1. 首都师范大学三维空间信息获取与地学应用教育部重点实验室, 北京 100037;
2. 北京航空航天大学机械工程余自动化学院, 北京 100083;
3. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 本文根据 TH-3DLCS 2001 三维成像扫描仪可同步扫描激光与可见光数据的特点, 提出了室外场景三维重建的系统方法. 推导了激光与可见光采样点的配准关系, 给出了每一激光采样点的 RGB 值; 引入马氏距离, 提出了基于反向投影的多机位三维数据快速配准算法, 将多机位三维数据无缝拼合在同一坐标系内; 依据 Hough 变换和模糊子集, 划分室外三维数据场为房顶、墙面、窗户、地面、树木、其他物体等 6 类, 并给出了网格剖分方法. 实验证明本文所提出的方法有效地解决了室外场景三维重建的基本问题.

关键词: 激光与可见光同步数据; 配准; 分割; 纹理映射; 三维建模

中图分类号: TNT391 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)05-0810-06

3D Reconstruction of Outdoor Scenes from Synchronized Laser Range Data and Visual Image Data

ZHANG Ai-wu¹, HU Shao-xing², SUN Wei-dong³, LI Feng-ting³

- (1. Ministry of Education Key Lab of 3D Information Acquisition & Application, Capital Normal University, Beijing 100037, China;
2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: We propose an engineering approach to creating 3D models of outdoor scenes from laser range data and visual image data. According to the features of TH-3DLCS-2001 Scanner which can capture the 3D geometry and texture data synchronously, we deduce the formulas of registration between laser points and visual points, and give the RGB values of each laser points. We propose a fast registration algorithm of multiple range images based on the reverse projections, and all range images are aligned into a common coordinate system. Using the Hough Transform and Fuzzy theory, we classify the outdoor scene into six major groups including roof, wall, window, ground, tree, and others, and give a triangulation algorithm. This proposed method has been applied to the 3D reconstruction of some outdoor scenes; the results show that this method can be able to solve the basic problems of 3D reconstruction of outdoor scenes from laser range data and visual image data.

Key words: synchronized laser and visual data; registration; segmentation; texture mapping; 3D modeling

1 引言

大型场景三维重建作为适应数字化城市建设和文物古迹保护需要的重要支撑技术之一, 已经成为计算机视觉和计算机图形处理领域最具挑战性的研究课题, 在城市规划、三维识别、数字导航、虚拟现实、文物遗址的数字化保护等方面有着广阔的应用前景.

过去常利用立体视觉原理根据星载或机载图像建立三维模型^[1-3], 最大的缺点是仅能获取场景顶部数据, 无法获取侧面数据. 近年来, 随着空间信息社会化服务的需求, 准确详实的室外场景几何与纹理描述倍受重视. 根据几何数据的获取方式, 三维重建方法分为两类: 基于图像的方法、基于距离的方法.

基于图像的建模方法是根据立体视觉或运动图像自动或半自动地提取场景的几何信息. Debevec, et al^[4]利用少许图像, 提出了关于室外建筑交互式建模和渲染方法. MIT 在城市扫描项目^[5]中, 开发了根据球形图像融合, 自动重建城市场景纹理 CAD 模型系统. 此外, 牛津大学^[6]、比利时 Leuven 大学^[7]和国内武汉大学^[8]在此方面做了很多工作. 概括起来, 基于图像的建模方法很难从图像中提取高精度的三维数据, 适合简单场景的几何描述, 不支持三维测量.

基于距离的建模方法是利用激光测距仪和 CCD 摄像机直接获得场景准确详细的三维几何和纹理信息, 在大型场景三维重建方面具有不可替代的发展潜力. 美国 Berkeley 等 5 所大学联合开发了 MURI 系统^[9], 通过两个正交的一维激光扫描测距仪获取数据, 以导航系统加地图匹配作为坐标基准,

收稿日期: 2003-09-25; 修回日期: 2004-12-10

基金项目: 国家 863 计划(No. 2001AA131021); 教育部科学技术研究重点项目(No. 03008); 三维空间信息获取与地学应用教育部重点实验室开放基金

表面纹理由摄影机另行获取. 东京大学开发了车载城市三维建模系统^[10,11], 采用三个在竖直面作一维扫描的激光测距仪、6个线阵 CCD 相机、差分 GPS 加惯导导航, 取得阶段性成果. 哥伦比亚大学在街区项目^[12]中开发了导航机器人, 它由一个彩色 CCD 摄像机、一个 CyraX 激光测距仪和一个 GPS 接受机组成, 主要目的是建立自动生成室外场景真实感的精确的三维模型系统, 现已取得一些阶段性成果. 斯坦福大学利用激光测距仪, 结合彩色图像, 对米开朗基罗雕像进行了数字化工作^[13]; 加拿大的 Canadian Conservation Institute, Canadian Museum of Civilization 与 National Gallery of Canada 三家联合开发了 NRC's 3D Imaging 系统^[14], 利用近距离激光扫描仪、Biris 3D Laser Camera 和大范围激光扫描仪, 收集考古遗址、古代建筑和大型雕刻的原始数据. 北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室也在此方面作了大量工作, 取得了一些阶段性成果^[29].

尽管激光测距仪可以直接准确快速获取三维场景稠密的三维点云, 仍存在许多亟待解决的基本问题. 在数据获取方面, 当测量复杂大型物体时, 测量机位点的布置设计是准确详实获取数据的关键技术. 在重建算法方面, 多机位三维数据配准仍无合适的解决方案, 网格生成也无通用方法. 在数据获取系统平台方面, 目前多采用由激光测距仪和 CCD 摄像机分别获得几何与纹理数据, 导致几何与纹理数据很难准确配准.

本文以清华大学自主开发的、激光与可见光可同步扫描的 TH-3DLCS-2001 三维成像扫描仪为数据获取平台, 提出了生成室外场景三维模型的系统方法, 并通过室外场景建模实验说明本文所提出的方法能够有效解决基于激光与可见光数据的室外场景三维重建的基本问题.

2 激光与可见光数据的精配准

TH-3DLCS-2001 三维成像扫描仪不同于国际上其他的三维激光扫描仪, 直接由设备硬件实现激光与可见光行同步扫描, 为激光与可见光数据的精确配准奠定了基础.

2.1 激光与可见光采样点行配准原理

图 1 是 TH-3DLCS-2001 三维成像扫描仪的外观结构, 它由一个激光传感器和一个线阵 CCD 组成. 在垂直扫描方向, 激光传感器靠双平面镜的旋转而扫描; 在水平扫描方向激光传感器和线阵 CCD 固定在同一旋转平台上, 随着平台转动激光传感器和线阵 CCD 同步扫描. 且因在垂直扫描方向激光传感器和线阵 CCD 的光轴平行, 保证每一行激光采样点对应一行可见光采样点, 直接实现了激光与可见光采样点的行配准.



图 1 TH-3DLCS-2001 三维成像扫描仪

局部坐标系 XYZ , 如图 2 所示.

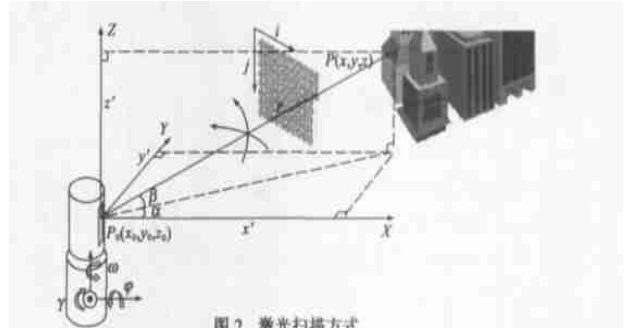


图 2 激光扫描方式

假设数据获取系统垂直于 XY 平面做垂直扫描, 绕 Z 轴做水平扫描, 每个激光采样点 (i, j) 对应一个距离数据 r 、一个水平扫描角 α 和垂直扫描角 β , 那么球坐标 (r, α, β) 就可转换

$$\begin{aligned} x &= r \cos \beta \cos \alpha \\ y &= r \cos \beta \sin \alpha \\ z &= r \sin \beta \end{aligned} \quad (1)$$

为笛卡儿坐标, 即
这里, 激光传感器的垂直扫描范围是 $-20^\circ \sim 90^\circ$, 水平扫描范围大于 360° , 最远测距距离大于 250m, 测量精度 $5\text{mm}/250\text{m}$. 一旦调整好参数, 在几秒钟便可得到成千上万的数据点. 根据激光采样点的排列顺序和各采样点 (i, j) 对应的距离值, 可形成一幅 2D 图像, 称之为距离图像.

2.2 激光与可见光采样点点配准

因为 TH-3DLCS-2001 三维成像扫描仪本身已经实现了激光点与可见光点行配准, 传统的 3D 几何数据与 2D 纹理数据的配准便简化为 2D 激光点与 1D 可见光点的对应问题.

图 3 是激光点与可

见光点的关系图. $z_0 o_c x_c$ 是线阵 CCD 的坐标系, $o_c x_c$ 是线阵 CCD 的光轴, z_0 是图像切片的中心; $z_1 o_l x_l$ 激光传感器的坐标系, $o_l x_l$ 是激光传

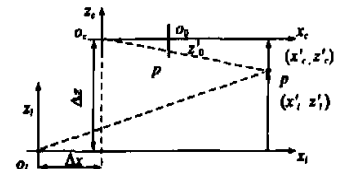


图 3 激光与可见光采样点对应的关系图

感器的光轴. o_c 与 o_l 的距离在水平扫描方向是 Δx , 在垂直扫描方向是 Δz . (x'_c, z'_c) 是 p 点在 $z_0 o_c x_c$ 坐标系的坐标; (x'_l, z'_l) 是 p 点在 $z_1 o_l x_l$ 坐标系的坐标, p' 是 p 点的像点, z'_0 是像点 p' 的物理坐标. 如果 f 是线阵 CCD 的焦距, 而 v 是 p' 的图像坐标, 那么,

$$\frac{z'_0}{z'_c} = \frac{f}{x'_c} = \frac{f}{x'_l - \Delta x} \quad (2)$$

$$z'_0 = \frac{f}{x'_l - \Delta x} \cdot z'_c = -\frac{f(\Delta z - z'_l)}{x'_l - \Delta x} \quad (3)$$

如果 $z'_0 = v/\alpha_c$, α_c 表示每单位长度的像素数, 则有,

$$v = f\alpha_c \cdot \frac{z'_l - \Delta z}{x'_l - \Delta x} \quad (4)$$

$$\text{令 } f\alpha_c = s, \text{ 则有 } x'_l v - \Delta x v = s z'_l - s \Delta z \quad (5)$$

$$\text{同时, 令 } s \Delta z = a_1, s = a_2, \Delta z = a_3, \text{ 则有,} \quad (6)$$

这样利用不少于三个已知点就可利用式(6)计算出 a_1 ,

$$a_2, a_3 \text{ 三个参数, 那么, } v = \frac{a_2 z'_l - a_1}{x'_l - a_3} \quad (7)$$

这里, $z'_l = r \sin \beta$, $x'_l = r \cos \beta$.

利用式(7), 每一 3D 激光点对应的 2D 图像点便可计算出来, 同时给出了对应的 RGB 值和相应的纹理坐标.

3 多机位三维数据的快速配准

一般来讲, 为了获得室外场景完整的几何描述, 需要多机位多角度全方位获取场景三维数据, 并将其转换到同一坐标系内. 经典的最近点迭代算法(ICP)^[15]要求待配准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. 因此, 本节提出了基于反向投影的最近点迭代(ICP)算法, 该方法可快速准确地地在有重叠区域的两机位数据点集间寻找对应点.

3.1 最近点定义

三维激光扫描仪在直接获取场景的三维几何数据的同时, 也得到了与之完全配准的采样点的激光反射率强度值, 所以每一激光采样点有两重属性: 3D 点位和 1D 反射率. 为保证配准精度, 本文引入马氏距离, 直接利用采样点的两重属性, 在相邻两点集内寻找最近点.

设相邻两机位点(s_1, s_2)的扫描点集分别为 S_1, S_2 . 如果点 $p = (x_p, y_p, z_p, f_p) \in S_1$, C_p 是与点 p 相联系的特征向量协方差矩阵, 点 p 到 S_2 的最近点 $q \in S_2$ 的马氏距离为,

$$r^2(p, S_2) = \min_{q \in S_2} (p - q)^T C_p^{-1} (p - q) \quad (8)$$

显然, 利用马氏距离定义最近点距离可同时考虑向量的多重属性, 反映了点群的分布规律.

3.2 反向投影

若已知 3D 点 $p = (x(i, j), y(i, j), z(i, j))$, 则由式(1)计算出 (α_i, β_j) , 便可在 2D 距离图像上找到对应的像素点 (i, j) , 这就是三维点在 2D 距离图像的反向投影. 设从点集 S_1 到点集 S_2 的转换矩阵为 $T = [R, t]$, 则 $\forall p \in S_1$ 转换到点集 S_2 所在坐标系, 有

$$p' = Rp + t \quad (9)$$

通过式(1)计算出 p' 相对机位点 s_2 的扫描方位角 (α', β') , 这样可以确定机位点 s_1 相对于机位点 s_2 的扫描范围 $(\alpha'_{s_1 \min} \sim \alpha'_{s_1 \max}, \beta'_{s_1 \min} \sim \beta'_{s_1 \max})$, 则点集 S_1 与点集 S_2 的重叠区为,

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{overlap min}} &= \max(\alpha_{s_2 \min}, \alpha'_{s_1 \min}) \\ \alpha_{\text{overlap max}} &= \min(\alpha_{s_2 \max}, \alpha'_{s_1 \max}) \\ \beta_{\text{overlap min}} &= \max(\beta_{s_2 \min}, \beta'_{s_1 \min}) \\ \beta_{\text{overlap max}} &= \min(\beta_{s_2 \max}, \beta'_{s_1 \max}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $(\alpha_{s_2 \min} \sim \alpha_{s_2 \max}, \beta_{s_2 \min} \sim \beta_{s_2 \max})$ 是激光测距仪在机位点 s_2 的扫描范围, $(\alpha_{\text{overlap min}} \sim \alpha_{\text{overlap max}}, \beta_{\text{overlap min}} \sim \beta_{\text{overlap max}})$ 是点集 S_1 与点集 S_2 的重叠区的范围. 若 p' 是点 p 转换到机位点 s_2 坐标系后的相应点, 且 $p' \in (\alpha_{\text{overlap min}} \sim \alpha_{\text{overlap max}}, \beta_{\text{overlap min}} \sim \beta_{\text{overlap max}})$, 如图 4 所示, 则从机位点 s_2 发出且通过 p' 的射线穿过距离图像 rs_2 得投影点 (w, h) . 考虑到两机位点获得的距离图像 rs_1 和 rs_2 的分辨率不同, 在点集 S_2 内以 (w, h) 为中心, 在 $m \times m$ 邻域范围内找点 p 的最近点, 即,

$$r^2(p', S_2(m \times m)) = \min_{q \in S_2(m \times m)} (q - p')^T C_p^{-1} (q - p') \quad (11)$$

那么, q 就是 p' 的最近点.

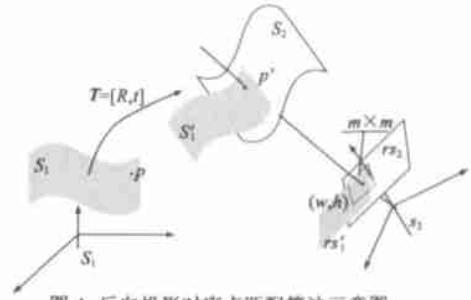


图 4 反向投影对应点匹配算法示意图

3.3 最近点插值

因为激光测距仪到被测物体的距离较大、采样分辨率低, 因此采样分辨率将直接影响三维数据配准精度, 本文采取内插方法, 进一步确定最近点, 避开采样分辨率对配准精度的限制.

设待配准的两点集为 S_1 和 S_2 , 相应的测量机位点为 s_1 和 s_2 , 点 p' 是点 $p \in S_1$ 转换到机位点 s_2 坐标系后的相应点, 而点 $q \in S_2$ 是 p' 的最近点, 则最近点插值办法如下.

(1) 首先估计点集 S_2 的切平面.

点 $q \in S_2$ 的切平面可以通过 q 和它的 k 个最近邻点组成的点集 $Nbhd(q)$ 确定, 记为 $Tp(q) = (o, \hat{n})$, 其中 o 是点集 $Nbhd(q)$ 的中心, \hat{n} 是点 q 切平面的单位法向. \hat{n} 可利用主成分分析法求得^[22]. 设 $Nbhd(q)$ 的协方差矩阵为 CV , 是一 3×3 的对称半正定矩阵.

$$CV = \sum_{y \in Nbhd(q)} (y - o) \odot (y - o) \quad (12)$$

这里符号 \odot 定义为两个向量的外积操作符. 由协方差矩阵 CV 可以求出它的三个特征值, 记为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, 对应的三个特征向量记为 v_1, v_2, v_3 . 根据主成分分析方法可知, 最小特征值所对应的特征向量作为拟合出来平面的法向量是最好的, 即最小特征值 λ_3 所对应的特征向量 v_3 为所求的切平面向量.

(2) 计算 p' 在 q 的切平面的投影. 如果 $Nbhd(q)$ 点集内的点共面, 则由主成分分析方法可知, 最小特征值 λ_3 是个很小的值. 因此, 若 $\lambda_3 < thresh_\lambda$ 则计算 p' 在 q 的切平面的投影 z ^[15],

$$z = o - [(p' - o) \cdot \hat{n}] \hat{n} \quad (13)$$

那么, p' 的最近点 q 就由 p' 在 q 的切平面的投影 z 代替.

若 $\lambda_3 \geq thresh_\lambda$, 说明 $Nbhd(q_i)$ 点集内的点不共面, q 有可能是边界点. 此时 p' 的最近点仍为 q 点 (本文取值 $thresh_\lambda = 0.008$).

3.4 迭代配准

给定两个有重叠区域的点集 S_1 和 S_2 , 其相应的测量机位点为 s_1 和 s_2 , 则配准步骤如下.

- (1) 利用反向投影确定两点集的重叠区;
- (2) 根据马氏距离, 计算给定点到另一点集的最近点;
- (3) 采用插值方法, 优化最近点;
- (4) 计算转换矩阵, 以保证对应点对间的距离最小, 即,

$$\min_i (Rp_i + t - q_i)^T C_{p_i}^{-1} (Rp_i + t - q_i) \quad (14)$$

(5) 迭代运算直到收敛。

4 室外场景几何与纹理三维模型生成

室外场景建模不同于室内场景或单一物体的几何建模, 其原因是: (1) 三维激光扫描仪到被测物体的距离较大, 数据点间隔大, 含有噪声; (2) 存在严重的遮挡和自遮挡, 如主要景物前的行人、车辆、树木等, 尤其与主要景物相距甚近的高大树木; (3) 室外场景结构复杂, 不仅含有平面组成的结构, 更含有复杂曲面组成的结构, 如文物古建筑等; (4) 测量机位点多, 数据量十分庞大。常用的建模方法如基于网格^[25, 26]和基于体^[27, 28]的建模方法不能直接用于室外场景的几何建模。为了解决以上问题, 本文将室外场景的三维建模分为两个阶段: 三维数据分割和模型生成。

4.1 三维数据分割

首先将室外三维数据场分成前景层与背景层, 接着进一步划分出房顶、墙面、窗户、地面、树木、其他物体或曲面等主要类别。

4.1.1 划分前景层与背景层 激光测距仪采用逐行逐列的方式进行扫描, 设每行激光采样点为 $z = (x, y_0)$, y_0 固定, 利用 Hough 变换可检测出直线 $l_i = a_i x + b_i$, 通过分析斜率 a_i 即可识别出墙面所在的直线段 l_w 。以 l_w 作为分界线, 从图 5 可以看出, l_w 之前的景物为前景层, l_w 之后的景物为背景层。并根据直线的检测情况和直线的高度进一步识别出屋顶、墙面、窗户、地面、其他曲面。另外, 由于窗户为透明物体, 激光穿过玻璃会打在室内物体上, 在窗户区域的后边出现散乱点, 那么, 在 $l_w \in [c, d]$ 长度范围内去除其后的散乱点, 便可修正窗户区域。

4.1.2 前景层物体分割 前景物体一般是位于地面上的树木、车辆、行人等物体, 其中树木不属于面数据结构, 而属于体数据结构。考虑到树木、车辆、行人等不同物体的表面激光反射率差别较大, 本文利用采样点的激光反射率 (f_p)、法向 (n_p)、位置 (p) 三重属性, 确立模糊隶属关系, 快速分割前景层不同区域。

如果每个点与其 8 邻域点(按距离图像索引)的连接权为 $w = \{w(i, j) | j = 1, 2, \dots, 8\}$, 连接权描述了该点与邻域点的相似程度。给定两个子集 A 和 B , 若 A 象 B 的程度通过 $\mu_B(A) \in [0, 1]$ 表示, 那么相邻两点的连接权则为 $w(i, j) = \min\{\mu_i(j), \mu_j(i)\}$ 。其中,

$$\mu_i(j) = \left\{ 1 - a \frac{|f(i) - f(j)|}{f(i)} \right\} b \quad (15)$$

$$\mu_j(i) = \left\{ 1 - a \frac{|f(i) - f(j)|}{f(j)} \right\} b \quad (16)$$

和
$$a = \begin{cases} \alpha/90, & 0 \leq \alpha < 90 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$b = \begin{cases} e^{-\frac{\|P_i - P_j\|_2^2}{2\sigma_p^2}}, & \|P_i - P_j\| < r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

这里, $\alpha = \arccos(n_i \cdot n_j) \times 180/\pi$ 是相邻两距离点法向夹角, $\|P_i - P_j\| \in R^3$ 是相邻两点的距离, r 是相邻两点的距离的阈值, σ_p 是 p_i 与其 8 邻域距离的标准方差。

根据连接权及采样点的排列顺序, 将二维序列标号法应用在距离数据分割上, 从前景图像的左上角开始, 遍历所有的采样点, 计算该点(p_i)与其 8 邻域各点的连接权, 即 $w(i, j), j = 1, 2, \dots, 8$ 。如果 $w(i, j) < thresh_w$, $thresh_w$ 是给定的阈值, $p_i \in p_j$, 前景被分成若干区域 $G_1, G_2, \dots, G_n, G_i \cap G_j = \emptyset$ 每一区域代表物体表面。

4.2 几何建模

本文主要研究最关心的是背景层建筑物的几何建模。激光采样点被组织在 2D 网格上, 每一个 2D 点对应着一个 3D 点, 每一个 2D 三角形对应一个 3D 三角面片, 因此可采取 2D 网格划分投影到 3D 的方式。本文期望在网格划分的同时, 减少数据量。对于一个 $m \times n$ 的 2D 网格具体划分办法如下。

(1) 判断四边形所覆盖的三维点是否共面, 如果共面, 判断四边形边长都是否小于等于阈值 d_{thresh} 。

③ 若小于等于 d_{thresh} , 则停止划分;

③ 若有一条大于 d_{thresh} 或相邻两条边长大于 d_{thresh} , 则沿对角线连成三角形, 有 4 种三角形, 如图 6(a), 判断三角形覆盖的三维点是否共面, 三角形的边长是否小于等于 d_{thresh} , 若只有一种三角形满足条件, 则保留划分, 并停止; 若有两种以上的三角形满足条件, 则计算计算对角线长度, 保留对角线短的三角形, 并停止划分; 若 4 种情况都不满足条件, 则沿四边形中间分成四个矩形返回(1);

(2) 如果四边形所覆盖的三维点不共面否, 则沿对角线剖分成两个三角形(有两种剖分三角形的方法, 记为①和②, 如图 6(b))。

③ 如果①或②划分的两三角形覆盖的三维点分别共面且三角形边长小于等于 d_{thresh} , 则划分停止。

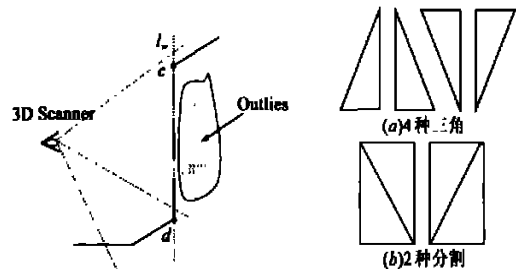


图 5 激光线扫描情况示意图 图 6 三角形剖分情况

③ 如果①和②划分的三角形覆盖的三维点都共面, 且三角形边长都小于等于 d_{thresh} , 则计算对角线长度, 以短的划分为主。

③ 若两种情况均不满足条件, 否则沿四边形中间分成四个矩形, 对每个四边形重复(1), 直到达到一定的分辨率为止。

(3) 按 1 节纹理坐标的计算结果, 将 2D 真实纹理映射在 3D 几何模型上, 最终生成纹理几何三维模型。

5 实验

本文提出的三维重建方法除少量的人机交互(多机位三维数据配准所需的初始矩阵是通过手工选取三对同名点计算得到)外全自动。

图 7 是三维数据分割结果, 7(a) 为清华大学主楼的实测三维点云, 图 7(b) 为分离后的背景层, 图 7(c) 为前景层, 图 7

(d) 为前景层分割结果。

图 8(a) 是清华大学主楼的激光与可见光数据点配准结果, 图 8(b) 是故宫昭德门的激光与可见光数据点配准结果。图中某些边缘处所出现的伪彩色, 是可见光图像获取受被测物体的太阳光反射影响。

图 9(a) 是清华大学主楼三个机位点的配准结果, 图 9(b) 为图 9(a) 中心部、圆圈标示部分为配准后的放大结果, 可以由细部看出重叠处结合得十分紧密。本文所提出的配准算法以点为配准单元, 不受被测物体几何特征的限制, 适用于任何结构的三维场景配准。图 9(c) 是故宫昭德门古建的两机位数据配准结果。

图 10(a) 是清华大学主楼真实纹理映射后的 3D 实体模型, 图 10(b) 是故宫昭德门真实纹理映射后的 3D 实体模型。图中三维模型表面残留的一些空洞是因遮挡或自遮挡以及激光穿过透明物体造成数据丢失形成的。

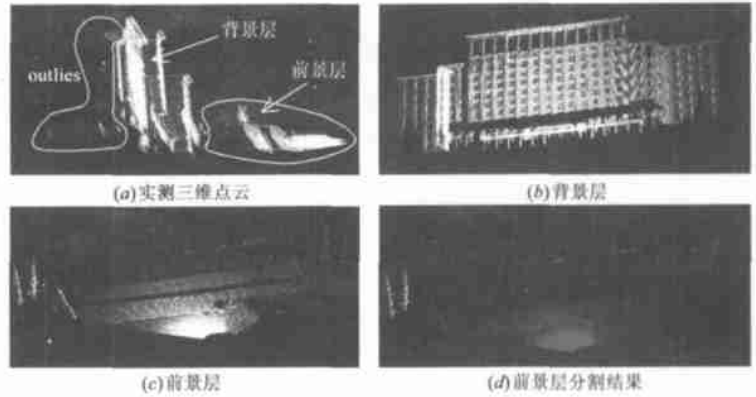


图 7 清华大学主楼三维数据分割结果



图 8 激光与可见光数据点配准结果

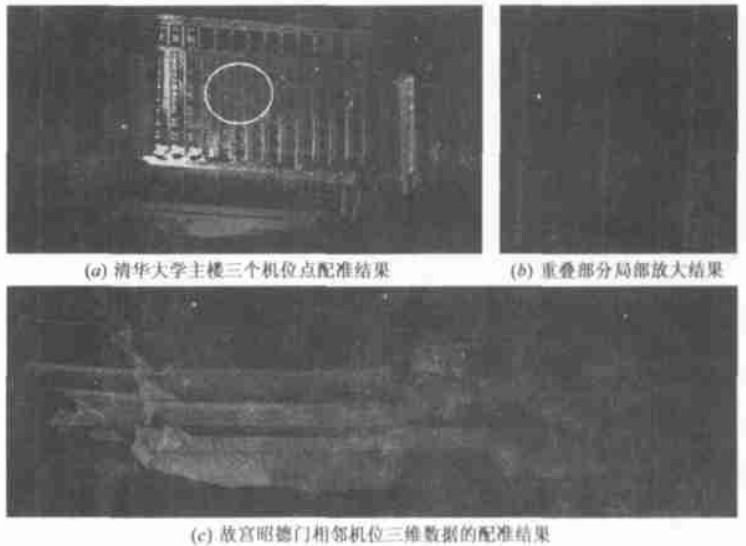


图 9 多机位三维数据配准结果

处理应用上的突破将为城市空间信息等的采集与处理提供新的技术手段。

参考文献:

- [1] Z Kim, et al. Automatic description of buildings with complex rooftops from multiple images [A]. Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Kauai, 2001. 272-279.
- [2] S B Kang, R Szeliski. 3D scene data recovery using omnidirectional multibaseline stereo [R]. Cambridge Research Lab: Digital Equipment Corporation, October, 1995.
- [3] 陈爱军, 史元春. 基于城市航空立体像对的全自动 3 维建筑物建模[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 54-59.

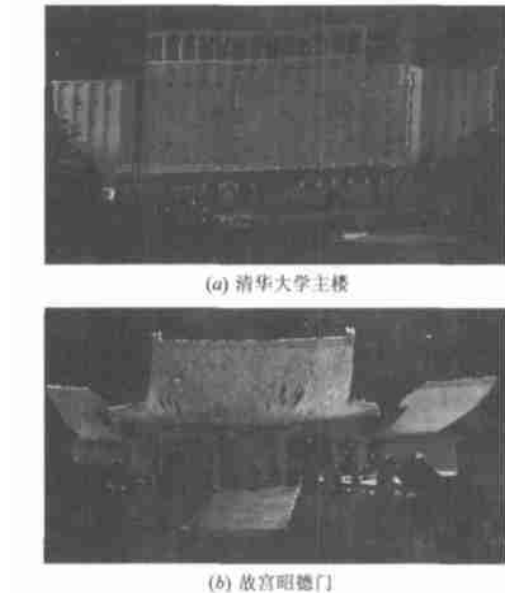


图 10 真实纹理映射后 3D 实体模型

6 结论

本文以激光与可见光同步扫描的 TH 3DLCS-2001 三维成像扫描仪为数据获取平台, 重点突破基于激光与可见光数据室外场景三维重建的关键技术, 解决了激光与可见光数据配准、多机位三维数据配准、三维数据分割、大型场景几何建模等核心问题, 初步形成了室外场景三维重建的方法体系。

室外场景三维重建不同于室内场景或单一物体的三维重建, 涉及诸多处理技术, 本文仅研究了最核心的若干基本问题。如何通过各机位点网格合并形成单一的几何模型、如何在各机位三维数据配准之后进一步整合纹理数据、不完整数据填补、光照模型生成等诸多问题还有待进一步研究完善。总之, 室外场景三维重建是极具挑战和创新性的工作, 其理论和

- [4] Debevec P E, et al. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry and image based approach[J]. Computer Graphics, 1996, 30: 11- 20.
- [5] MIT City Scanning Project: Fully Automated Model Acquisition in Urban Areas[DB/ OL]. <http://city.les.mit.edu//city.html>, 2002-09-18.
- [6] Visual Geometry Group[DB/ OL]. <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/>, 2004-09-02.
- [7] Marc Pollefeys. Obtaining 3D models with a hand held camera[A]. Lecture Notes SIGGRAPH Course[C]. ACM SIGGRAPH, 2001.
- [8] 武汉大学道路测量车[OB/ OL]. <http://www.whu.edu.cn/cn/cybz/qyjj.htm>, 2000-11-28.
- [9] 4D Distributed Modeling and Visualization[DB/ OL]. <http://www-video.eecs.berkeley.edu/vismuri/murindex.html>, 2002-07-17.
- [10] Huijing Zhao, Ryoosuke Shbasaki. Reconstructing textured CAD model of urban environment using vehicle borne laser range scanners and line cameras[A]. International Workshop on Computer Vision Systems Proceedings[C]. Lecture Notes In computer Science, 2001. 2095. 284-297.
- [11] Huijing Zhao, Ryoosuke Shbasaki. Reconstruction of textured urban 3D model by fusing ground-based laser range and CCD images[J]. IEICE Trans Inf & Syst, 2000, E83-D(7): 1429- 1440.
- [12] The AVENUE Project of Columbia University[DB/ OL], <http://www.cs.columbia.edu/robotics/projects/avenue>, 2005-01-28.
- [13] The Digital Michelangelo Project[DB/ OL]. <http://graphics.stanford.edu/projects/micel/>, 2004-08-15.
- [14] Visual Information Technology Group[C]. Canada. <http://www.vit.iit.nrc.ca/VIT.html>, 2002-02-10.
- [15] P J Besl, N D McKay. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Trans. PAMI, 1992, 14(2): 239- 256.
- [16] Y Chen, G Medioni. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145- 155.
- [17] A Johnson, S B Kang. Registration and integration of textured 3d data[A]. International Conf on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling Proceedings[C]. Ottawa, Ontario, Canada, 1997. 234-241.
- [18] K Nishino, K Ikeuchi. Robust simultaneous registration of multiple range images[A]. In ACCV2002: The 5th Asian Conference on Computer Vision Proceedings[C]. Japan, 2002. 454- 461.
- [19] C V Stewart. Covariance Based Registration[R]. Department of Computer Science Technical Report RPF-CS-TR 02-8, Rensselaer Polytechnic Institute, June 2002.
- [20] Yizhou Yu, et al. Extracting objects from range and radiance images[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(4): 351- 364.
- [21] Y Zhang, et al. Impact of intensity edge map on segmentation of noisy range images[A]. Conference on Three Dimensional Image Capture and Applications III, Proceedings[C]. San Jose, Ca: SPIE, 2000. 3958. 260- 269.
- [22] H Hoppe, et al. Surface reconstruction from unorganized points[A]. Proc SIGGRAPH' 92 Proceedings[C]. ACM SIGGRAPH, 1992. 71- 78.
- [23] P K Saha, et al. Scale based fuzzy connected image segmentation: Theory, algorithms and validation[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000: 145- 174.
- [24] Prabir Bhattacharya, et al. Hough transform detection of lines in 3-D space[J]. Pattern Recognition Letters, 2000, 21: 843- 849.
- [25] G Turk, M Levoy. Zippered polygon meshes from range images[A]. SIGGRAPH 94 Proceedings[C]. ACM SIGGRAPH, 1994. 311- 318.
- [26] V Sequeira, et al. Automated reconstruction of 3D models from real environments[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999. 54(1): 1- 22.
- [27] B Curless, M Levoy. A volumetric method for building complex models from range images[A]. SIGGRAPH' 96 Proceedings[C]. ACM SIGGRAPH, 1996. 303- 312.
- [28] I Stamos, P K Allen. Geometry and texture recovery of scenes of large scale[J]. Computer Vision and Image Understanding, July 2002. 88: 94- 118.
- [29] 胡少兴. 大规模场景三维重建[R]. 博士后研究报告, 北京: 北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室, 2001.

作者简介:



余篇, E-mail: zhangaw@163.com.

张爱武 女, 1972 年出生于内蒙古, 首都师范大学三维空间信息获取与地学应用教育部重点实验室教授, 2002 年, 吉林大学获工学博士学位, 2002 年~ 2004 年, 清华大学电子工程系博士后, 主要研究领域为三维信息获取与处理、三维激光、计算机视觉与模式识别、图像处理、目标检测、科学计算可视化、虚拟现实, 发表学术论文 20



胡少兴 男, 1972 年出生于吉林省, 北京航空航天大学无损检测中心副教授, 2001 年, 吉林大学获工学博士学位, 2002 年~ 2004 年, 北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室博士后, 主要研究领域为三维信息获取与处理、计算机视觉与模式识别、图像处理、目标检测、无损检测, 发表学术论文 30 余篇。



术论文 60 余篇。

孙卫东 男, 1960 年 4 月 29 日出生于山东, 清华大学电子工程系遥感研究室教授, 博士生导师, 1988 年 3 月获日本东京大学工学博士学位, 1992 年、1997 年、1998 年曾任日本东京大学客座研究员, 2001 年 7 月起兼任国家 863 计划信息获取与处理技术主题专家组成员, 主要研究领域为卫星遥感图像处理、图像处理、模式识别, 发表学