

引用格式:郭晶晶,贺赛先.手持式激光扫描仪激光点云数据拼接方法[J].电光与控制,2018,25(1):88-91. GUO J J, HE S X. A laser point cloud data splicing method for hand-held laser scanners[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1):88-91.

## 手持式激光扫描仪激光点云数据拼接方法

郭晶晶, 贺赛先

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

**摘要:** 现有的手持式激光扫描仪在使用过程中多使用定位标志点,会遮盖部分数据。针对此问题,基于单应矩阵和霍夫直线提取提出了一种新的线结构光点云数据拼接方法,可以避免在扫描过程中粘贴标志点。实验结果证明,该方法能准确得到目标三维点云数据,拼接误差小于1 mm。

**关键词:** 激光扫描仪; 线结构光; 扫描; 数据拼接; 点云

中图分类号: TB96; TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.019

## A Laser Point Cloud Data Splicing Method for Hand-Held Laser Scanners

GUO Jing-jing, HE Sai-xian

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Positioning mark points are often adopted when operating the existing hand-held laser scanners, which may shelter some of the data. To solve this problem, a new method based on the homography matrix and the Hof line extraction method is proposed for data splicing, which can avoid sticking the mark points in the scanning process. The experimental results show that the 3D-point cloud data can be obtained accurately by using this method, and the splicing error is below 1 mm.

**Key words:** laser scanner; linear-structured light; scanning; data splicing; point cloud

### 0 引言

三维激光扫描仪通过对物体的扫描,将被测物体的三维点坐标采集到电脑中,可以很快重构出被测物体的三维模型,在文物保护、工程测量、工业铸件、逆向工程等领域均有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。市场上主流的扫描产品的计算精度已经达到0.5 mm,扫描速度也达到50000点/s,但是,这些产品的价格普遍较高,制约了激光扫描仪的普及。因而,低成本、便携式的激光扫描仪成为研究热点。

近年来,许多学者对三维激光扫描仪做出了大量的研究。文献[6]设计了两套便携式激光扫描仪,具有较好的扫描效果;文献[7]设计了一个基于机器视觉的激光条纹扫描系统;文献[8]研究了手持式三维激光扫描仪定位算法;文献[9]对双目立体视觉自定位线扫描技术进行了研究,并研制了一套三维测量系统;文献[10]设计并实现了一套线结构光扫描系统,

计算三维坐标信息的误差低于1.15 mm。

目前,大多数手持式激光扫描技术都粘贴标志点来完成空间定位,而标志点会遮盖部分数据。针对此问题,本文基于单应矩阵和霍夫直线提取提出了一种新的线结构光点云数据拼接方法,可以避免粘贴标志点,并且计算精度可以满足一般测量需要。

### 1 系统硬件设计

扫描系统由工业相机(2台)、半导体激光器、支架以及手柄组成,如图1所示。

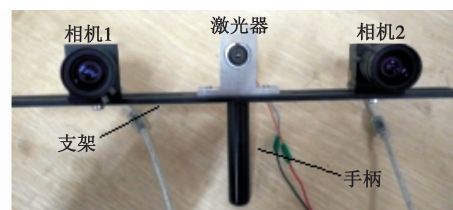


图1 系统硬件组成

Fig. 1 System hardware composition

其中,工业相机的最大分辨率是1280×1024,130万像素。将相机和激光器固定在支架上,手持手柄对被测物体进行扫描,2台相机同时采集帧图像,激光器

收稿日期:2017-03-06

修回日期:2017-10-19

作者简介:郭晶晶(1993—),女,湖北潜江人,硕士生,研究方向为机器视觉与图像处理。

则用于扫描。

## 2 系统测量原理

测量系统的软件实现流程如图2所示。

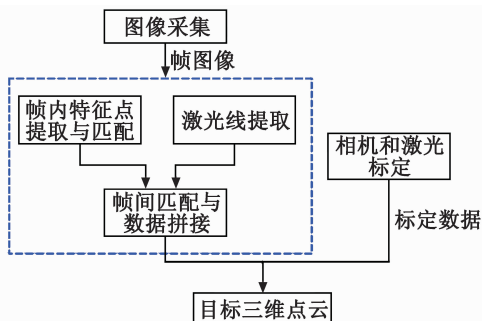


图2 系统实现流程

Fig. 2 System implementation process

双目相机采集扫描图像,根据双目视觉原理求取空间特征点坐标,每台相机与激光器组成激光三角系统,求取激光中心线的三维数据,最后根据相邻两帧的空间特征点计算坐标转换矩阵,将激光中心线数据拼接在一个坐标系下。

### 2.1 双目测量原理

如图3a所示,空间中一点 $P$ 在摄像机 $C_1, C_2$ 所得图像上对应的点分别是 $p_1(u_1, v_1), p_2(u_2, v_2)$ ,2台摄像机标定之后的投影矩阵分别是 $M_1, M_2$ 。

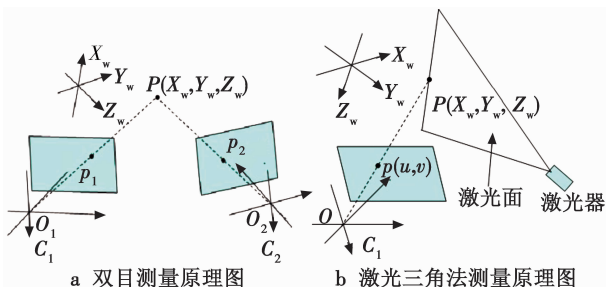


图3 测量原理图

Fig. 3 Diagram of measuring principle

假设 $P$ 点在世界坐标系下的坐标是 $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,则

$$\begin{cases} s_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ s_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

消去比例因子 $s_1, s_2$ 后得到关于 $X_w, Y_w, Z_w$ 的4个线性方程式,矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

简写为 $AX_w = B$ ,由最小二乘法可得

$$X_w = (AA^T)^{-1}A^T B \quad (3)$$

由此便得到了空间点的三维坐标。

### 2.2 激光三角法测量原理

当用光学投射器代替图3a中的一个摄像机时,光学投射器投射出一定的光模式,从而对场景对象的空间位置进行约束,同样可以获得被测对象在空间的唯一三维坐标值。如图3b所示,空间点 $P$ 处于线激光器投射的平面上,同时 $P$ 点在摄像机 $C_1$ 所摄图像上的对应点为 $p(u, v)$ 。经过标定,得到摄像机的投影矩阵为 $M$ ,激光面的方程为 $aX + bY + cZ + d = 0$ 。

设 $P$ 点在世界坐标系下的坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,则可以得到如下方程

$$\begin{cases} s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ aX_w + bY_w + cZ_w + d = 0 \end{cases} \quad (4)$$

消去比例因子 $s$ ,得如下矩阵方程

$$\begin{bmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ vm_{31} - m_{21} & vm_{32} - m_{22} & vm_{33} - m_{23} \\ a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} - um_{34} \\ m_{24} - vm_{34} \\ -d \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式可简写为

$$AX_w = B \quad (6)$$

则有

$$X_w = A^{-1} B \quad (7)$$

于是可以计算出空间点的三维坐标。

### 2.3 拼接方法

对帧图像提取线激光,根据式(7)得到激光中心线的空间坐标之后,需要计算两帧之间的坐标转换矩阵,从而将两帧的激光线统一在同一个坐标系下。本文坐标转换矩阵计算方式如图4所示。

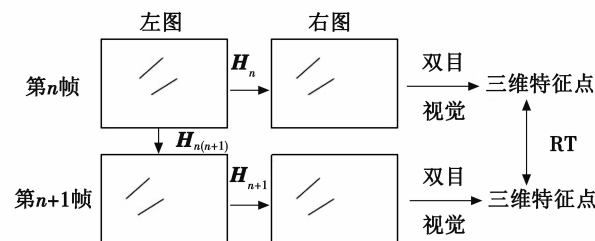


图4 计算RT矩阵示意图

Fig. 4 Diagram of RT matrix calculation

具体过程如下:

1) 对第  $n, n+1$  帧左右图像提取 surf 特征点进行匹配并剔除误匹配, 利用 opencv 中的 findHomography 函数和匹配点对求出左右图像之间的单应矩阵  $H_n, H_{n+1}$ , 对第  $n, n+1$  帧左(右)图像提取 surf 特征点进行匹配并剔除误匹配, 得到单应矩阵  $H_{n(n+1)}$ ;

2) 对第  $n$  帧左(右)图像进行霍夫直线提取, 并根据直线两端点和中点与激光线的距离关系, 删除激光线所在的直线, 得到直线集  $L_n$ ;

3) 将 2) 中的直线集  $L_n$  与单应矩阵  $H_n$  相乘, 得到对应的右图像中的直线集  $R_n$ , 在转换的过程中, 若直线的端点为负数, 说明左图像中的直线在右图像中不能全部或者部分显示, 删除直线集  $L_n$  和  $R_n$  中的这些直线;

4) 从 3) 中得到的直线集  $L_n$  和  $R_n$  是一一对应关系, 设有  $m$  条直线, 对于每一条直线, 等分成  $s$  份, 这样每条直线能得到  $s+1$  个点, 每个直线集能得到  $(s+1) * m$  个点, 利用左右直线集中的点, 根据双目视觉原理, 即可求出这些点的空间坐标, 得到空间点集  $P_n$ ;

5) 将 2) 中的直线集  $L_n$  与单应矩阵  $H_{n(n+1)}$  相乘, 得到在第  $n+1$  帧左图像中与直线集  $L_n$  相对应的直线集  $L_{n+1}$ ;

6) 将直线集  $L_{n+1}$  与单应矩阵  $H_{n+1}$  相乘, 得到第  $n+1$  帧右图像中对应的直线集  $R_{n+1}$ ;

7) 同 4), 根据直线集  $L_{n+1}$  和  $R_{n+1}$  上的点和双目视觉原理, 求出点的空间坐标, 得到空间点集  $P_{n+1}$ ;

8) 将空间点集  $P_n$  和  $P_{n+1}$  代入四元数法, 得到 RT

$$H_{LR1} = \begin{bmatrix} 1.871049297676609 & 0.253197771035046 & -448.8878494807428 \\ 0.325048553206768 & 1.499362239765863 & -230.3373294542121 \\ 0.000653254648264 & 0.000050324799939 & 1 \end{bmatrix};$$

$$H_{LR2} = \begin{bmatrix} 1.839389959895782 & 0.239592935222728 & -444.7367841026629 \\ 0.306977267423027 & 1.461281990420797 & -211.5755144058216 \\ 0.000636865554580 & 0.000037114914022 & 1 \end{bmatrix};$$

$$H_{L12} = \begin{bmatrix} 0.9964354445333065 & 0.003713109313372 & -10.9122075975987 \\ -0.003021814116720 & 0.997599726289275 & 11.17639936498116 \\ 0.0000524207944544 & -0.00000021402199 & 1 \end{bmatrix}。$$

对第 1 帧左图进行霍夫直线提取, 得到 19 条直线。只选择背景和物体上的直线, 删掉激光线所在直线, 剩余 12 条直线。根据单应矩阵  $H_{LR1}, H_{LR2}$  和  $H_{L12}$  将第 1 帧左图中的直线转换到其他 3 幅图中, 结果如图 5 所示。

将每一条直线等分成 5 份, 得到 6 个点, 6 条直线共 36 个点。根据双目视觉原理, 图 5 中 4 个子图分别可得到 36 个空间点坐标, 这 36 对点一一对应, 如图 6 所示, 根据四元数法即可求出坐标转换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 0.999911 & -0.00946438 & -0.00940095 & 1.95834 \\ 0.00951008 & 0.999943 & 0.00482773 & -6.7346 \\ 0.00935473 & -0.00491671 & 0.999944 & -2.43247 \end{bmatrix}。$$

转换矩阵。

采用逐帧模式进行帧间匹配, 只需进行相邻两帧的特征点匹配, 利用变换矩阵的传递最终将所有线激光数据统一到基准坐标系下。设第 1 帧的系统坐标系为基准坐标系, 将系统坐标系到基准坐标系的变换矩阵  $T$  设为单位阵  $I$ , 从第 2 帧开始利用四元数法计算该帧到前一帧的转换矩阵  $T_n$ , 则第  $n$  帧到第 1 帧(基准坐标系)的转换矩阵  $T_s = T_n T_{n-1} \cdots T_2$ , 则可将该帧系统坐标系下的激光点转换到第 1 帧系统坐标系下。

### 3 实验数据与分析

实验采用 VS2013 作为开发平台, 结合 OPENCV 2.4.13 计算机视觉库编写程序。系统的运行环境是 Windows7 32 位系统, 处理器是奔腾双核 E5300 2.6 GHz, 运行内存是 2.96 GB。先对实验系统进行标定, 获取双目参数和激光平面参数, 然后采集图像, 对图像进行预处理、提取特征点、提取激光中心线、计算坐标转换矩阵等工作, 最终得到三维点云数据。

#### 3.1 计算坐标转换矩阵

对第 1 帧左右图像提取 surf 特征点并删掉激光线附近的特征点。匹配特征点, 得匹配点对 132 对, 剔除误匹配后, 剩余匹配点对 106 对。利用 findHomography 函数和匹配点求出两幅图之间的单应矩阵  $H_{LR1}$ 。同理可求, 第 2 帧左右图像的单应矩阵  $H_{LR2}$  和前后两帧左图像之间的单应矩阵  $H_{L12}$ , 结果如下:

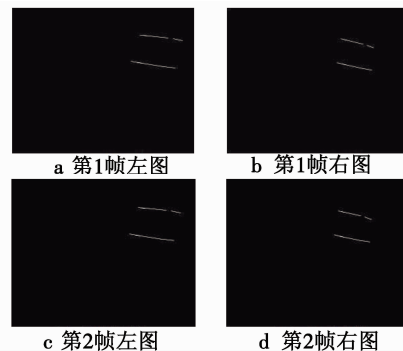


图 5 直线提取结果

Fig. 5 Line extraction results

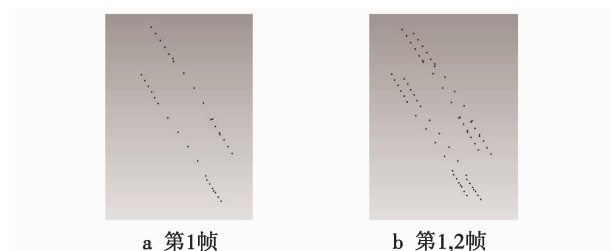


图6 空间特征点

Fig. 6 3D feature points

### 3.2 扫描结果

实验过程中,被测物体、相机与被测物体的距离等因素都会对扫描结果产生影响,下面对不同的扫描对象,在不同距离对物体进行扫描,说明本文拼接方法的可行性。

#### 3.2.1 不同物体的扫描

为了测试系统对不同形状物体的扫描效果,对不规则物体眼镜盒和规则物体长方体盒子进行了扫描实验,由于采集帧数较少,点云数据较为稀疏。实验中,扫描眼镜盒得到左右各31帧图像,处理图像共耗时941.378 s,平均每帧耗时30.367 s。眼镜盒点云数据如图7a所示,含4572个点。扫描盒子得左右各53帧图像,处理图片耗时1655.985 s,平均每帧耗时31.245 s。盒子点云数据如图7b所示,含11072个点。若适当增加扫描时间或者扫描次数可以获得更多数量的点。

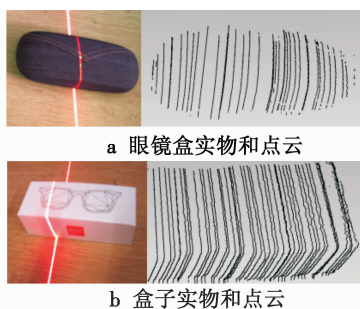


图7 眼镜盒、盒子点云图

Fig. 7 Point cloud of glasses box and cuboid box

#### 3.2.2 不同距离的扫描

为了测试本文拼接方法在不同扫描距离时的有效性,分别距离眼镜盒40 cm,60 cm和80 cm使用扫描系统进行扫描,结果如图8所示。

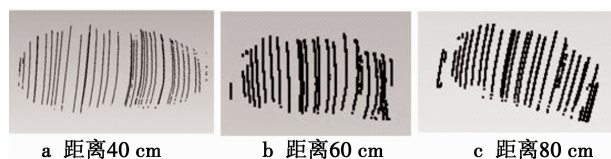


图8 不同距离的眼镜盒点云

Fig. 8 Point cloud of glasses box at different distances

由图8可以看出,在距离被测物体80 cm内,都可以有效地获取目标轮廓,证实此拼接方法在一定的视

场范围内都是有效的。

#### 3.2.3 扫描精度测试

为了测试拼接方法的精度,选择标准长方体和眼镜盒进行点云测量和手工测量。点云测量3次取平均值,结果如表1所示;手工测量采用精度为0.01 mm的电子数显卡尺测量3次取平均值,以此值为约定真值。从表1中可知误差低于1 mm。

表1 不同部位点云测量值和约定真值

Table 1 Measured value and actual value of point

	cloud at different parts						mm
	长方体			眼镜盒			
	长	宽	高	长	宽	高	
第1次	175.65	70.85	58.78	141.95	86.84	56.83	
第2次	175.27	70.83	58.88	142.07	86.80	56.12	
第3次	175.56	70.73	58.80	142.03	86.73	56.40	
平均值	175.50	70.80	58.82	142.02	86.79	56.45	
约定真值	175.95	71.47	59.31	142.65	86.35	56.95	
误差	-0.45	-0.67	-0.49	-0.63	0.44	-0.50	

## 4 结语

针对现有的手持式扫描系统使用过程中需要粘贴标志点的问题,提出了一种基于单应矩阵和霍夫直线提取的线激光点云数据拼接方法,实验表明,该方法能准确地将图像中提取的激光线拼接成完整的目标点云,为后面的三维重建工作奠定了良好的基础。

### 参考文献

- [1] 刘建勇,TRIBBLE J. 三维检测技术在金属模铸造产品研发中的应用[J]. 铸造技术,2015,36(3):820-825.
- [2] 臧伟,钱林,孙宝军,等. 地面三维激光扫描技术在工程测量中的应用[J]. 北京测绘,2015(3):130-135.
- [3] 彭勇. 三维激光扫描仪在石质文物保护中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- [4] 张洪吉,罗勇,裴尼松,等. 基于三维激光扫描的古建筑文物三维数字化保护研究—以四川乐山文庙大成殿为例[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(7):42-44.
- [5] 陈德立,陈航. 三维激光扫描技术应用于建筑基坑变形监测[J]. 福建建筑,2014(7):88-90.
- [6] 王丽鑫. 高性能便携式激光扫描仪的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [7] 李博阳,耿楠,张志毅. 基于机器视觉的激光条纹扫描系统[J]. 计算机仿真,2015,32(6):241-255.
- [8] 秦绪红,赵杰,程俊廷. 手持式三维激光扫描仪定位算法的研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(23):6692-6696.
- [9] 殷玉龙. 双目立体视觉自定位线扫描三维测量技术[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [10] 袁聪聪. 线结构光扫描装置的设计与实现[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.