

面向三维测量的空间标志点高稳定实时匹配方法

翁金平 程筱胜 崔海华 杨 柳 范敬利

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 为了提高多自由度扫描三维拼接的稳定性,提出一种用于实时三维测量拼接的标志点高速、高稳定匹配方法。该方法综合考虑标志点间的距离关系、标志点与其周围标志点间的空间分布关系,提出标志点空间能量概念,实现了当前标志点的唯一性描述,从而利用能量唯一最大的特性实现多视角间的特征点匹配和三维拼接,有效解决了传统方法普遍存在的匹配歧义性问题。实验统计数据表明,两视角间匹配时间平均小于2 ms,正确率接近100%,满足多视角实时三维测量的应用需求。

关键词 测量; 三维测量; 匹配; 拼接; 能量; 标志点

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.021201

Robust Matching Algorithm for Real-Time 3D Measurement Based on Spatial Marked Points

Weng Jinping Cheng Xiaosheng Cui Haihua Yang Liu Fan Jingli

*School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and
Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*

Abstract A robust matching algorithm based on spatial marked points is proposed to improve the reliability of three-dimensional (3D) scanning registration. This methodology defines the spatial energy to describe the uniqueness of the marked points, which is based on the distance and the spatial relationship between the marked points. Besides, the uniqueness of the energy can be applied to match the marked-points and stitch them together in different views. Compared with the traditional methodology, this algorithm can significantly avoid the ambiguity problem in the process of stitching. According to the experimental results, it only takes less than 2 ms to reach the accuracy of 100% when matching the marked-points in two views, which can realize the 3D data registration of multiple-view in the real time.

Key words measurement; three-dimensional measurement; matching; registration; energy; marked point

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 150.1135

1 引 言

三维测量技术是逆向工程、产品质量检测、人工智能、虚拟现实等技术^[1-5]的前提。随着科学技术的发展和市场需求的不断扩大,基于光学的非接触式三维物体形貌测量技术得到了长足的发展,该技术已经广泛应用于各个领域。

三维扫描的过程受许多因素的影响,如测量范围受限制,物体形貌复杂形成视觉死区等,因此单个结构光扫描仪并不能一次性完成物体三维形貌的测量,必须先进行局部测量,再将局部数据拼接,最终得到物体的整体三维形貌。常用的三维拼接方法是利用两个视角的公共区域中对应特征点的三维信息进行拼接。传统的支架式扫描仪需要不停移动位置,通过拼接多个视角下的数据来获取物体的三维数据,但是其难以完成大型物体或者表面遮挡较多的物体三维形貌的扫描。近年国外兴起的手持扫描设备体积小,可多自由

收稿日期: 2015-08-25; 收到修改稿日期: 2015-09-05; 网络出版日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51305201)、江苏省自然科学基金(BK20130793)、江苏省博士后科学基金(1301104C)

作者简介: 翁金平(1991—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉和工业检测方面的研究。E-mail: 979045934@qq.com

导师简介: 程筱胜(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事 CAD/CAM/CAPP、制造业信息化等方面的研究。

E-mail: smcadme@nuaa.edu.cn(通信联系人)

度扫描,在大型物体、狭窄空间的扫描上有独特的优势,因此手持式扫描设备成为了现在研究的热点。以手持激光扫描为例,相机每秒能获取30帧图片,因此激光扫描需要每秒完成30次图像处理和三维数据的拼接,完成整个物体的扫描则需要经过上千次拼接,这种扫描方式对拼接方法的速度与准确性有更为严格的要求。

国内外学者对三维拼接技术展开研究,主要可归纳为以下两种:1) 基于物体表面特征的三维拼接方法^[6-7]。利用尺度不变特征变换(SIFT)算子或其他方法完成两个视角图像特征点的匹配,从而完成测得三维模型的拼接,该方法无需在物体表面粘贴人工标记点,但是在测量特征极少的曲面时无法找到足够图像特征点来完成拼接,且在高速实时三维扫描的过程中,该方法并不适用;2) 基于距离矩阵的拼接方法^[8]。该方法需要在物体表面粘贴人工标志点,利用标志点空间不变特性^[9],对标点之间的距离,建立距离矩阵,通过迭代找出匹配标志点。这种方法从一定程度上实现标志点拼接的自动化,但是没有利用周边信息,准确性比较差,如果有距离相等的巧合情况就会出现错误匹配。文献[10]提出了结合编码点与非编码点的改进,提高了准确性,该方法要求至少有一个编码点,若编码点识别错误就会产生错误拼接,且由于需要提取编码,速度较慢,无法完成实时扫描过程中的实时拼接。

以上两种方法拼接正确率不高,速度较慢,难以满足实时多视角三维扫描的需求。实时三维扫描对特征点获取的稳定性有较高要求,因此选取人工标志点作为特征点来完成三维拼接。本文基于松弛算法^[11-12]思想,利用“唯一性”约束、“空间特征不变”约束和“连续性”约束,提出空间标志点能量的概念,通过计算标志点能量来完成两个视角的拼接。在有足够重叠区域的条件下,只需1~2次迭代,即可找出绝大部分匹配点。

2 扫描系统拼接模型

本文所用扫描系统模型如图1所示。 C_1 、 C_2 和 L_1 组成了一个激光扫描系统,其中, C_1 和 C_2 表示两个相机, L_1 表示激光发射器,标志点由 C_1 和 C_2 的两个相机组成的双目系统完成重建,激光条由 C_1 和 L_1 组成的三角系统完成重建, I 和 II 分别表示扫描过程中扫描系统的两个位置。

首先利用Zhang提出的基于平面靶标的标定方法^[13]对双目测量系统进行标定。如图1所示,双目测量系统分别在视角 I 和视角 II 获取物体表面粘贴标志点的三维坐标,并保证两视角有足够公共区域,然后找到视角 I 和视角 II 中对应的标志点,利用奇异值分解(SVD)方法^[14]求解出视角 II 到视角 I 的旋转矩阵 R 和平移向量 T ,以视角 I 为全局坐标系,将视角 II 中所有标志点转入全局坐标系下,以此类推,直至将所有标志点转入全局坐标系^[15]下。

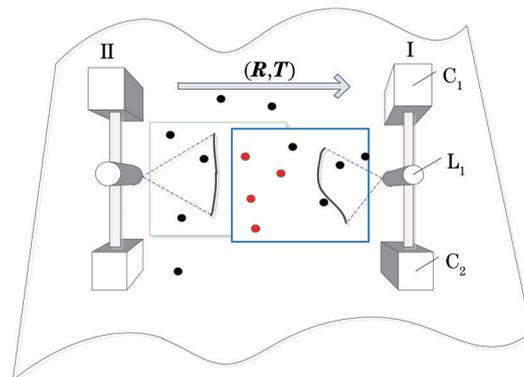


图1 扫描系统模型

Fig.1 Model of scanning system

全局坐标系构建完毕,打开激光器,获取单个视角中的激光三维数据和标志点三维数据,找到这些标志点在全局坐标系中的对应关系,利用SVD奇异值分解求解出单个视角到全局坐标系的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T ,将激光三维数据转入全局坐标系中,直至扫描出整个模型的外貌。

3 空间标志点能量匹配方法

假设三维扫描仪在两个不同视角下测得的三维点云 I 和点云 II 有公共区域,点云 I 中标志点以集合 P 表示,点云 II 中标志点以集合 Q 表示。标志点匹配就是找到两个视角下的相同标志点对。使用松弛算法的思想,将待匹配集合 P 与 Q 自我解散,自我重新配对,使得“唯一性”约束、“空间特征不变”约束和“连续性”

约束条件得到最大的满足,从而排除误匹配。“唯一性”约束是指在集合 P 中的元素 p_1 ,集合 Q 中最多只有一个点与其为正确匹配点。“空间特征不变”约束是指集合 P 中存在元素 p_1 、 p_2 ,若集合 Q 中与其匹配的元素为 q_1 、 q_2 ,则 p_1 与 p_2 的欧式距离一定等于 q_1 与 q_2 的欧式距离。“连续性”约束是指正确的匹配对周围通常存在较多其他的正确匹配对,而错误的匹配对则相反,周围通常存在很少其他正确匹配对。

3.1 空间标志点的能量

首先定义空间标志点能量。考虑候选匹配集合 N 中的一个候选匹配 (p_i, q_j) ,其中 p_i 是集合 P 中的点, q_j 是集合 Q 中的点。令 $M(p_i)$ 、 $M(q_j)$ 分别为 p_i 、 q_j 的半径 r 邻域内的点,即

$$M(p_i) = \{p_k | d(p_k, p_i) < r\}, \quad (1)$$

$$M(q_j) = \{q_l | d(q_l, q_j) < r\}. \quad (2)$$

如图2所示, p_i 、 q_j 为正确匹配点,则 $M(p_i)$ 、 $M(q_j)$ 存在较多正确匹配点,则可以说 q_j 对于 p_i 的能量最大,反之, p_i 、 q_l 为错误匹配, $M(p_i)$ 、 $M(q_l)$ 中很少会有正确匹配点,甚至一个没有。

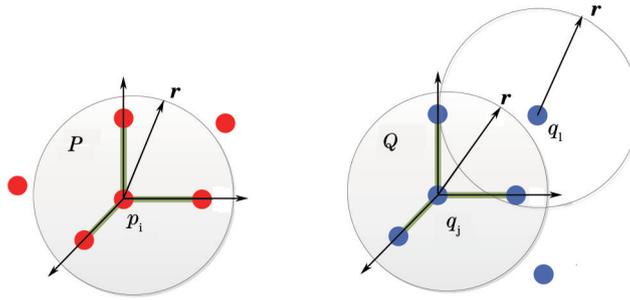


图2 候选匹配集合

Fig.2 Collection of candidate matching points

因此定义候选匹配点的能量为

$$E(p_i, q_j) = \sum_{\substack{p_k \in M(p_i) \\ q_l \in M(q_j)}} \Phi(p_i, q_j, p_k, q_l) \times \frac{1}{M_1 + M_2}, \quad (3)$$

式中

$$\Phi(p_i, q_j, p_k, q_l) = \begin{cases} 0, & d > k \\ 1, & d < k \end{cases}, \quad (4)$$

$$d = |d(p_i, p_k) - d(q_j, q_l)|, \quad (5)$$

$d(p_i, p_k)$ 示 p_i 与 p_k 的欧式距离, M_1 表示 $M(p_i)$ 元素的个数, M_2 表示 $M(q_j)$ 元素的个数。由于标志点重建过程中有一定的误差,当两者误差小于一个距离阈值 k 时既认为两者相等,即 Φ 等于1。阈值可根据相机标定的逆模型误差确定。 $\frac{1}{M_1 + M_2}$ 是考虑 $M(p_i)$ 和 $M(q_j)$ 中元素有不对称情况。

3.2 迭代松弛流程

用双目相机重建出两个视角的标志点,分别用 P 、 Q 表示两个视角标志点集合。在 P 中取任意点作为 p_0 ,根据松弛法思想,认为 Q 中所有点为 p_0 的候选匹配点,用(3)式描述 Q 中所有点,计算出 Q 中所有点关于 p_0 的能量,寻找正确匹配点的过程即选出能量最大且唯一一点的过程。具体流程如下:

1) 在 P 中取任意点作为 p_0 ,根据(3)式计算出 Q 中所有点关于 p_0 的能量;

2) 根据“唯一性”约束,采用“赢者通吃(WTA)^[16]”策略,即认为 Q 中能量最大且唯一最大点作为 p_0 的正确匹配点。若最大能量不唯一,则返回上一步,否则执行下一步;

3) 假设2) 中选出关于 p_0 的正确匹配点为 q_0 ,令 $M(p_0)$ 和 $M(q_0)$ 分别表示 p_0 的半径 r 邻域点的集合, r 为双目相机视场对角线长度。首先去除 $M(p_0)$ 中相等元素,以 p_0 为顶点,任意选取 $M(p_0)$ 中两个邻域点 p_1 、 p_2 构成的三角形记为 Δp ;去除 $M(q_0)$ 中相等元素;以 q_0 为顶点,任意选取 $M(q_0)$ 中两个邻域点 q_1 、 q_2 构成的三角形记为 Δq ,当 Δp 与 Δq 全等,即 p_1 与 q_1 为正确匹配点, p_2 与 q_2 为正确匹配点;否则更换 p_1 、 p_2 、 q_1 、 q_2 ,重复步骤3),以此类推直至找到所有正确匹配点。

4 算法分析与验证

以手持式激光三维扫描仪为例,激光扫描每秒需要数十次三维拼接,通常整个扫描过程需要上万次拼接,错误的拼接会直接破坏所得三维数据的质量,因此实时三维测量系统对拼接速度和准确性有较高要求。错误的拼接主要来自于标记点距离相等的巧合情况,本节将对所提出的能量算法与距离矩阵算法进行对比分析。

4.1 三维拼接歧义性分析

所用实验系统有两个 DMK 23G445 相机、两个焦距 12 mm 的光学镜头以及投影仪组成,扫描对象为表面粘贴圆形标记点的石膏模型,如图 3 所示。



图3 石膏模型

Fig.3 Plaster model

图 4 为在两个视角下测得两片有重叠区域的点云,两个视角下物体表面粘贴的标志点三维坐标分别由集合 P 和集合 Q 表示,如表 1 所示。

表 1 不同坐标系下标志点三维坐标

Table 1 3D coordinates of marked points in different coordinate systems

P	X	Y	Z	Q	X	Y	Z
p_1	-40.647	30.224	339.947	q_1	207.746	-112.072	218.235
p_2	-13.136	16.172	323.315	q_2	193.111	-129.902	229.766
p_3	-63.411	14.162	356.193	q_3	249.951	-125.873	185.175
p_4	9.292	4.497	318.244	q_4	231.022	-144.196	198.631
p_5	-34.910	-2.886	334.940	q_5	201.046	-159.215	222.676
p_6	-62.644	-15.698	357.115	q_6	182.009	-155.844	250.615
p_7	-40.500	-31.844	346.301	q_7	222.589	-177.421	208.417
p_8	-7.688	-33.795	332.504	q_8	209.161	-195.816	227.107
p_9	17.233	-49.277	328.726	q_9	190.668	-186.858	248.807

由于中心提取和相机标定存在误差,所以两点距离小于距离阈值 k ,即认为两对点距离相等, k 的选择受相机标定后反投影误差影响,文中所用相机标定后反投影误差能保证在 0.1 mm 以内,因此选择 $k=0.1$ mm。如图 4 所示,从 P 中选出点 p_6 、 p_7 、 p_8 ,从 Q 中选出 q_3 、 q_4 、 q_7 ,不难发现 Δp_{678} 和 Δq_{347} 全等,再从 Q 中选出

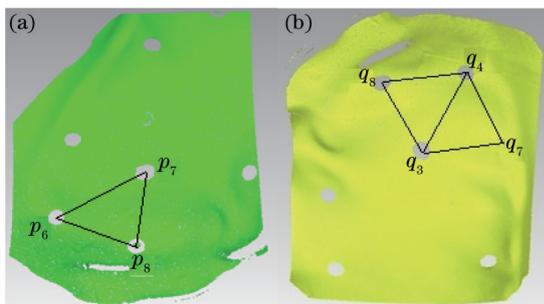


图 4 两个视角下三维点云。(a) 视角 I; (b) 视角 II

Fig.4 3D data in different view-point. (a) View-point I; (b) view-point II

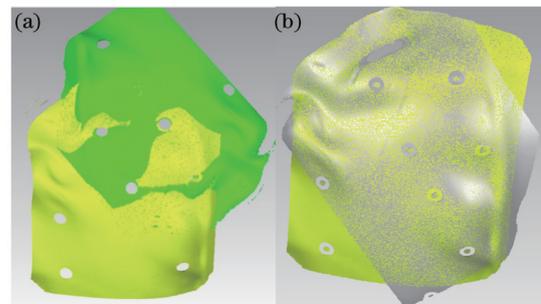


图 5 拼接所得点云。(a) 距离矩阵法; (b) 能量法

Fig.5 3D data after registration. (a) Algorithm of energy; (b) algorithm of distance-matrix

q_3 、 q_4 、 q_8 , 计算可得 Δp_{678} 全等于 Δq_{348} , 如果仅用距离来匹配就会产生歧义, 拼接结果如图 5(a) 所示。用所述方法来进行空间标志点的匹配: 以 p_7 为例, 取邻域半径 $r=200$ mm 以覆盖 Q 中大部分点, 计算出 Q 中所有点关于 p_2 的能量:

$$E(p_7) = \{E_j | E_j = \sum_{\substack{p_k \in M(p_2) \\ q_l \in M(q_j)}} \Phi(p_7, q_j, p_k, q_l) \times \frac{1}{10}\},$$

$$j = 1, 2, \dots, 10, \quad l = 1, 2, \dots, 10, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10. \quad (7)$$

计算可得 $E(p_2) = \{0, 0.1, 0.99, 0, 0.3, 0, 0.1, 0.3, 0.3, 0.1, 0.1\}$, 易知 q_3 为 p_7 正确匹配点, 由计算过程可见, 正确匹配点的能量接近于 1, 而错误匹配点的能量接近于 0。由此可见, 所用方法消除了匹配中难以解决的匹配歧义, 消除了距离矩阵法的缺陷, 拼接结果如图 5(b) 所示。

4.2 重叠标记点数量的影响

由能量的计算公式可以得出, 两片点云重叠区域越大, 或者说两视角共同标志点越多, 正确匹配点的能量越接近 1, 而反之则越接近于 0, 因此设计实验观察了重叠标志点个数对正确匹配点能量的影响, 并且对比了重叠标志点个数对两种方法误匹配率的影响。同时, 定义误匹配率 (FAR, R_{FA})^[17] 为

$$R_{FA} = \frac{|\widehat{M} \setminus M|}{|M|}, \quad (8)$$

式中 M 表示存在正确匹配标志点的集合, \widehat{M} 表示实际找到正确匹配的标志点集合, $|\cdot|$ 表示集合中元素个数。图 6 中绿色表示能量法错误匹配率, 蓝色表示距离矩阵法误匹配率。由折线图可得, 随着公共标志点个数的增加, 距离矩阵法错误匹配率不断增加, 而本文方法错误匹配率不断减小, 这是由于公共标志点越多, 距离相等的随机情况就会增多, 因此会造成距离矩阵法的误匹配率增加。结合图 7 可得, 公共标志点数量越

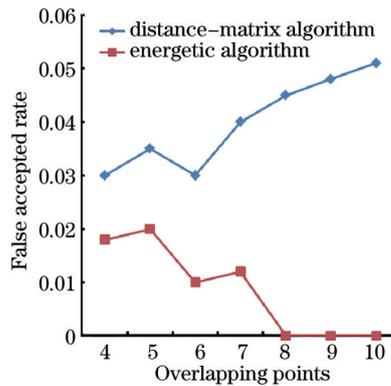


图 6 能量法和距离矩阵法误匹配率

Fig.6 FAR of energetic algorithm and distance-matrix algorithm

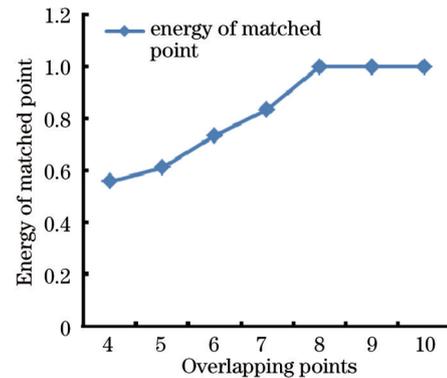


图 7 能量变化趋势图

Fig.7 Tendency of the energy

多, 正确匹配点能量越大, 最终接近 1, 同时错误匹配点能量接近于 0, 所以错误匹配率接近于 0。

4.3 参数的讨论

算法涉及两个参数: 距离阈值 k 和候选匹配点半径 r 。选匹配点半径 r 由相机覆盖视场决定, 其选择以覆盖该视角下大部分标记点为准。距离阈值 k 的选取由相机标定反投影精度决定, 文中相机标定反投影精度能保证小于 0.1 mm, 故选取 k 为 0.1 mm, 既能尽量避免距离相等的随机情况, 也能保证能量法三维匹配的稳定进行。本文也尝试了大于 0.1 mm 的阈值, 在能量的计算过程中距离相等的随机情况会增多, 但是所占比例并不大, 所以依然能够通过本文算法找出正确匹配点, 结果与 $k=0.1$ mm 相差并不大, 这说明了本算法匹配准确率并不依赖距离阈值 k 的选取。

4.4 轮毂扫描验证

为了更直观地表现方法的优越性, 利用汽车轮毂盖对算法拼接速度、精度进行测试。实验数据由自主研发的手持式激光三维扫描仪获得, 该系统的硬件主要包括两个 DMK 23G445 相机、两个焦距 12 mm 的光

学镜头、一个激光发射器和控制电路。相机分辨率 1280 pixel×960 pixel, 单次测量误差 0.02 mm, 拼接所用标志点是人工贴在物体表面的黑底白面的圆形标志点, 贴在物体曲率较小的位置。

如图 8 所示, 汽车轮毂盖直径为 40 cm, 本实验所用相机分辨率 1280 pixel×960 pixel, 帧频为 30 frame/s, 单次扫描区域为 225 mm×250 mm。



图 8 汽车轮毂盖实物图

Fig.8 Automobile wheel hub

若采用同样视场的传统扫描仪至少需要经过 30 次拼接才能测出轮毂盖全貌, 平均单次测量后处理耗时 60 s, 整个扫描过程至少需要 30 min。而采用本文所提出方法研发的手持式激光扫描仪扫描全程需 1050 次实时测量, 耗时 35 s, 无错误拼接。图 9 为扫描系统软硬件, 可见该拼接方法完全能够满足实时三维扫描对速度和准确度的严格要求。



图 9 扫描系统软硬件。(a) 手持式激光三维扫描仪; (b) 扫描中软件界面

Fig.9 Software and hardware of scan system. (a) Handy laser scanner; (b) user interface of the software in scanning

扫描所得模型如图 10 所示。



图 10 扫描模型

Fig.10 Output model through scanning

标志点拼接过程为局部坐标到全局坐标系的转换, 拼接精度决定了扫描的最终精度, 表 2 为单次拼接局部坐标系转换到全局坐标系后的三维坐标以及其全局坐标系中对应点的三维坐标, 平均拼接误差为 0.019 mm。

从上述扫描过程中抽取 5 组, 每组分别表示连续的 10 次拼接, 拼接时间具体如表 3 所示。拼接时间有轻微波动是因为区域中标志点个数较多时需要更多时间计算, 较少则反之, 单次定位时间在 2 ms 左右, 时间较短, 实现了三维数据的实时拼接。

表2 拼接误差

Table 2 Error of registration

unit: mm

Number	X	Y	Z	x	y	z	Errors
1	-4.195	29.596	292.112	-4.191	29.589	292.132	0.022
2	-35.942	14.798	302.139	-35.940	14.792	302.120	0.020
3	-20.105	-1.824	293.277	-20.127	-1.821	293.271	0.026
4	-3.295	-31.543	297.462	-3.288	-31.539	297.468	0.010
5	-37.051	-39.491	316.405	-37.059	-39.481	316.421	0.021

表3 平均拼接时间

Table 3 Average time of registration

unit: ms

Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average time
1	1.5	1.4	1.2	0.9	1.2	1.8	1.1	2.3	1.5	2.2	1.51
2	2.5	3.1	3.0	1.5	1.1	1.4	1.5	1.2	2.0	1.6	1.89
3	2.5	3.2	3.3	2.6	3.2	2.4	3.0	3.4	2.9	2.5	2.90
4	1.4	1.1	1.4	1.3	1.5	1.3	1.1	1.2	1.0	1.8	1.31
5	1.5	1.2	1.0	1.1	1.5	1.5	1.2	1.0	1.1	1.2	1.18

5 结 论

使用松弛算法的思想,使得匹配标志点对“唯一性”约束、“空间特征不变”约束和“连续性”约束条件得到最大的满足,从而解决了标志点匹配出现歧义的问题。传统空间标志点匹配方法只利用了标志点之间的距离关系来确定匹配关系,而标志点与其周围标志点之间的关系并没有加以利用,因此在遇到标志点距离相等和错误标志点的情况下会造成错误匹配。该方法利用标志点周围信息,不仅能够剔除标志点对多的误匹配,也能剔除标志点一对一情况下的错误匹配,且速度快,不需要进行大量迭代,一次遍历就基本可以找出所有匹配点,计算结果稳定,为实时高速扫描提供了保障。

致谢 感谢江苏省数字化设计制造工程技术研究中心。

参 考 文 献

- 1 Shao Jie, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Research on fusion of 3D laser point clouds and ccdimage[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0514001.
邵 杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001.
- 2 Yan Jingjie, Yang Qinghua, Song Yupeng, *et al.*. The study of reconstruction auricle long-term changes by 3D laser scan technology[J]. Chinese Journal of Otology, 2013, 11(4): 524-528.
艳静杰, 杨庆华, 宋宇鹏, 等. 三维激光扫描技术应用于再造耳廓远期变化的研究[J]. 中华耳科学杂志, 2013, 11(4): 524-528.
- 3 Zhao Jing, Wang Yongchang, Liu Kai. New method of restraining the saturated error in phase measuring profilometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1008001.
赵 静, 王永昌, 刘 凯. 一种抑制相位测量轮廓术饱和误差的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1008001.
- 4 Takeda Mitsuo, Mutoh Kazuhiro. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.
- 5 Li Yunpeng, Tian Qingguo, Zhang Xiangyu, *et al.*. Multi-sensor synchronous calibration method for line laser human-body 3D scanner[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1008006.
李云鹏, 田庆国, 张翔宇, 等. 线激光人体三维扫描仪多传感器同步标定方法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1008006.
- 6 Tang Minghui, Cheng Xiaosheng, Cui Haihua, *et al.*. A high stability mapping stitching method for structured light three dimensional measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112006.
汤明辉, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112006.
- 7 Wu Mengqi, Li Zhongwei, Zhong Kai, *et al.*. Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0215002.
伍梦琦, 李中伟, 钟 凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 2015, 35(2): 0215002.
- 8 Liang Yunbo, Deng Wenyi, Lou Xiaoping, *et al.*. Automatic registration method of multi-view 3D data based on marked points

- [J]. Beijing Information Science and Technology University, 2010, (1): 30–33.
梁云波, 邓文怡, 娄小平, 等. 基于标志点的多视三维数据自动拼接方法[J]. 北京信息科技大学学报, 2010, (1): 30–33.
- 9 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1872–1876.
郑继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. 光学学报, 2009(7): 1872–1876.
- 10 Gen Yun, Sun Junhua, Liu Qianzhe, *et al.*. 3D matching of marked points for free-form surface vision measurement[J]. measurement & Control Technology, 2011, 30(7): 105–109.
耿云, 孙军华, 刘谦哲, 等. 自由曲面视觉测量标志点三维匹配方法研究[J]. 测控技术, 2011, 30(7): 105–109.
- 11 Okutomi M, Kanade T. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1994, 16(9): 920–932.
- 12 Zhang Z, Deriche R, Faugeras O, *et al.*. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry[J]. Artificial Intelligence, 1994, 78(12): 87–119.
- 13 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2000, 22(11): 1330–1334.
- 14 Weiliang L U, Jiang K, Lin J. Multi-view 3D data registration based on global control codeless points[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014.
- 15 Xie Guanghui, Sun Junhua, Yang Zhen, *et al.*. 3D data registration method for vision measurement[J]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(7): 877–881.
谢光辉, 孙军华, 杨珍, 等. 一种自由曲面视觉测量三维数据拼接方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 877–881.
- 16 Scharstein D, R Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two frame stereo correspondence algorithms[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1–3): 7–42.
- 17 Zhang Hui. Research on the Key Techniques and System of Binocular Stereo Measurement Based on Random Illumination [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
张辉. 基于随机光照的双目立体测量关键技术及其系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

栏目编辑: 何卓铭