

面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法

汤明辉 程筱胜 崔海华 戴 宁

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 基于自由视角测量的三维拼接大大提高了测量的便捷性,为了提高视角间三维映射的稳健性,提出了一种改进的高稳定映射拼接方法。根据图像间匹配的特征点实现视角重合,利用结构光相位信息完成特征点三维映射和空间定位。针对特征点相位缺失无法重建的普遍问题,提出利用邻域点插值恢复特征点方法,虚拟重建视角间有效映射点,通过四元数法实现视角间点云的刚性变换和拼接。实验表明,相较传统的方法,该方法平均能将有效特征点数量提升 20%,有效提高了映射拼接的稳定性。

关键词 测量;结构光;映射拼接;高稳定

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1112006

A High Stability Mapping Stitching Method for Structured Light Three-Dimensional Measurement

Tang Minghui Cheng Xiaosheng Cui Haihua Dai Ning

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The registration for free viewpoint measurement highly improved the efficiency of three-dimensional measurement, in order to improve the robustness of three-dimensional mapping between viewpoints, a modified method for mapping stitching with high stability is proposed. The viewpoints is coincided via image features. Spatial points are calculated through the phase positions. Aiming at those image features without phase positions, the interpositions of adjacent points are used to take the place of these points, so that effective mapping points between different viewpoints are virtually reconstructed. The rigid transformation is calculated by using unit quaternions. Experimental results show that this method can improve the number of the feature points by 20 percent and the robustness of mapping stitching.

Key words measurement; structured-light; mapping stitching; high stability

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 100.2000

1 引 言

随着计算机技术、光电技术的发展,非接触式测量技术逐步得到实用,相较于传统的接触式测量方法,结构光三维测量能方便地在短时间内获得大量精确(微米级)的物体表面信息,因此在实际生产应用中得到了广泛应用。受限于测量仪器的视场以及物体自身的遮挡,采用结构光三维测量一次只能获

取物体部分表面的一部分三维信息,因此,需要将多个视角获取的三维信息整合形成完整的数据,寻找点云或者网格数据之间的位置变换关系,将多片点云或者网格数据统一到全局坐标系下,称为三维点云配准,也称为重定位或者三维点云拼接。

非接触式测量的广泛应用,使得人们对点云拼接技术的需求也越来越迫切。点签名^[1]算法通过指

收稿日期: 2014-05-04; **收到修改稿日期:** 2014-07-03

基金项目: 国家 863 计划(SS2013AA040802)、国家自然科学基金(51305201)、中国博士后科学基金(2012M521075)

作者简介: 汤明辉(1990—),男,硕士研究生,主要从事为图像处理、非接触三维几何测量、三维拼接等方面的研究。

E-mail: vbtang@vip.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)

定某一点为球心,固定半径,求解出球面与网格交点至该点的切平面有向距离,将这些距离作为称作点签名,通过在另一片网格数据上查找具有类似点签名的点,从而建立点的对应关系,获得三对以上的点时即可对点云进行刚性变换,该方法仅需要利用网格自身数据即可获得点对点关系,但是计算量较大,且易受噪声影响。Spin 图像^[2]则利用曲面上一点到指定点的法矢和切平面的距离作为二维特征来描述该点周围的曲面形状,该方法也存在与点签名类似的问题。标签法^[3]是在实际中得到广泛应用的方法,它通过在物体表面粘贴标记点对点云进行定位。该方法实现简单,精度较高,但是对有些表面不能粘贴标记点的物体不适用。转台法^[4]则利用事先进行精确标定的机械转台获得测量数据的初始位置,在系统得到良好标定的情况下,能得到较好的初始位置,但是该方法受转台的限制,适用范围并不广。迭代最近点(ICP)算法及其改进算法^[5]是目前应用最广泛的无特征拼接,它将另一个点集中的最近点作为匹配点,计算获得使点对距离偏差最小的刚性变换,反复选取点进行迭代直至算法收敛。ICP 算法能取得令人满意的拼接精度,不足之处是点云需要一个良好的初始位置,而且算法也易陷入局部极值。对一些不能在表面贴标记点并且不适合使用转台法测量的物体,同时又对拼接速度有一定要求的场合,上述方法并不能胜任。部分学者利用二维特征,提出了映射拼接方法,韦虎等^[6]利用物体表面的随机纹理图像实现了点云的粗匹配,Cui 等^[7]也实现了基于尺度不变特征转换(SIFT)特征的特征点快速匹配,陶海驹等^[8]则实现了一种基于法向量的点云自动配准方法。

本文提出了一种面向三维结构光测量的高稳定性映射拼接方法,该算法根据已有的二维特征点,利用特征点邻域插值恢复部分无法重建的二维特征点,获得充足的三维点对,经由提出的点过滤方法,获得正确的点对。实验结果表明相较以往的映射拼接方法更加稳定,能获得更好的拼接效果。介绍了结构光中应用映射拼接的方法,详细叙述了提出的插值过程以及滤除错误点的方法,通过实验展示了访方法能有效提高映射拼接的稳定性,获得精度较高的拼接结果。

2 结构光测量中的映射拼接原理

2.1 基于结构光测量的映射拼接

结构光三维测量是一种主动式光学测量技术,

基本原理是由结构光投射器向被测物体表面投射可控制的光点、光条或光面结构,由图像传感器获得图像,利用三角原理得到物体表面的三维坐标,其原理示意图如图 1 所示。

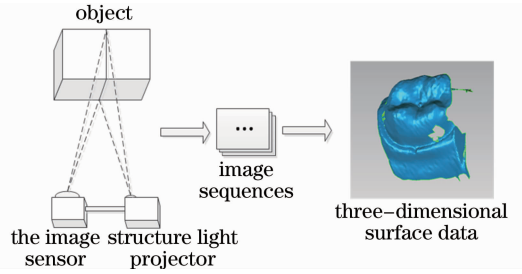


图 1 结构光三维测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structured light three dimensional measurement

图像匹配大致可以分为两大类:基于灰度值的方法和基于特征点的方法,后者由于计算速度快,精确度较高,对灰度变换等有良好的适应性,得到了广泛的应用。用来检测的特征点一般有 Moravec 角点^[9],Harris 角点^[10],SIFT 特征点^[11]。

映射拼接则是利用结构光测量时获得的图像,通过匹配图像中的特征点进行拼接,该方法的原理叙述如下:

两个不同视角下获得的图像为 M 和 N 。在图像 M 和 N 中检测特征,并对两张图像中获得的特征点进行匹配,其中的一对特征点为 m_i 和 n_i ($i=0, 1, 2, \dots, k$, 即总共有 k 对特征点), $m_i = [u_i^m \ v_i^m]^T$, $n_i = [u_i^n \ v_i^n]^T$ 。特征点重建获得的点云集分别为 P 和 Q ,其上对应于 m_i 和 n_i 的点分别为 p_i 和 q_i ($i=0, 1, 2, \dots, k$), $p_i = [x_i^p \ y_i^p \ z_i^p]^T$, $q_i = [x_i^q \ y_i^q \ z_i^q]^T$ 。选择点云 P 作为基准,对点云 Q 进行刚性变换,将 Q 变换到 P 的坐标系下。对点云进行刚性变换需要知道变换矩阵 R, T ,其中 R 为 3×3 的旋转矩阵, T 为 3×1 的平移矩阵,如(1)式所示:

$$\begin{bmatrix} x_i^p \\ y_i^p \\ z_i^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & R_1 & R_2 \\ R_3 & R_4 & R_5 \\ R_6 & R_7 & R_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^q \\ y_i^q \\ z_i^q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

由于图像中的点和重建获得的三维点云之间存在映射关系,即 $p_i = f(m_i)$, $q_i = f(n_i)$ 。确定了图像中的对应点即意味着获得了三维空间中的点对。获得三对以上的点对后,就可以计算刚性变换矩阵 R, T ,从而将点云统一到同一个坐标系下。为保证结果的可靠性,一般要求最好有四对以上的点。映射拼接流程如图 2 所示。

在实际进行映射拼接时,发现受被测物表面调

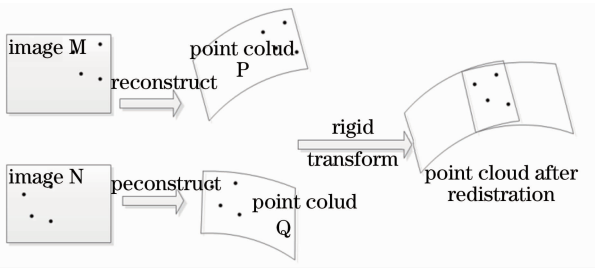


图 2 映射拼接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mapping stitching

制的影响,在锐边或深度变化剧烈的区域(如图 3 所示),重建所需的信息(相位/编码)容易缺失(如图 4 所示,黑色表示该位置相位缺失),而这些区域往往是图像上特征点集中的地方,大量的特征点由于缺失相位信息无法重建。一张图上的点一旦无法重建会导致另一张图上的点也无法利用,这样会引起大量的点缺失,不仅影响了后期拼接的精度,严重的情况下可能由于点过少无法计算刚性变换矩阵,而使得算法失败。映射拼接的不稳定,限制了它的实际应用。

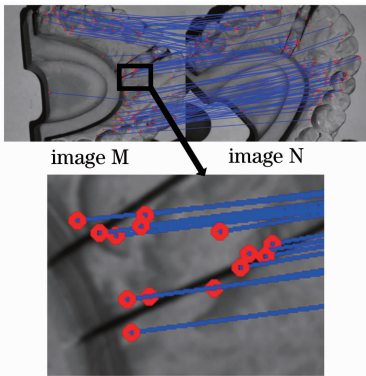


图 3 映射拼接特征点

Fig. 3 Image features for mapping stitching

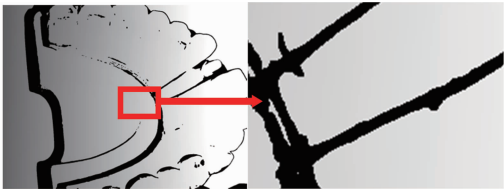


图 4 图像 M 相位图

Fig. 4 Phase image of image M

2.2 高稳定映射拼接方法

2.2.1 特征点恢复

针对在结构光三维测量中应用映射拼接出现的问题,提出一种插值恢复特征点的方法,使用特征点邻域中可以进行重建的点进行插值,代替相位缺失的特征点,有效地提升了点对的数量,从而提升了算法的稳健性。

结构光测量系统在两不同视角下获得的被测物图像为 M 和 N ,检测提取 M 和 N 中的特征点,并进行匹配,其中的一对特征点为 m_i 和 n_i ($i=0,1,2,\dots,k$,即总共有 k 对特征点),如图 5 所示,相应的特征点已经由直线相连。

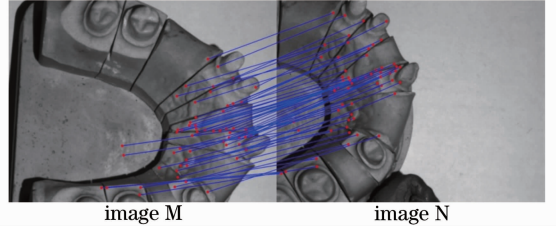


图 5 图像特征匹配

Fig. 5 Matching of image features

对应于 m_i 和 n_i 的点分别为 p_i 和 q_i ($i=0,1,2,\dots,k$)(在实际物体上 $p_i=q_i$),但是部分点可能缺失相位无法重建,因此 p_i 和 q_i 未必存在。当点缺失时,需要利用特征点的邻域信息进行插值,插值代替 p_i 的点记为 p_i^{pre} 和 p_i^{back} ,同理另一对用来插值代替 q_i 的点记为 q_i^{pre} 和 q_i^{back} ,为保证插值获得的 p_i 和 q_i 具有一定的一致性,需要保证在世界坐标系中

$$p_i^{\text{pre}} = q_i^{\text{pre}}, \quad p_i^{\text{back}} = q_i^{\text{back}}. \quad (2)$$

两张图片由于测量时视角的变化,在图像中是无法直接获得相对应的点的,为此,需要对图像进行变形,获取空间同一点在两张图像中的位置。根据已有的特征点对,采用 RANSAC^[12] 方法计算图像变换矩阵^[13],利用变换矩阵对图像作透视变换,将两张图像统一到同一个坐标系下,变换时的稀疏区域进行插值补足,这样,坐标相同的图像点在空间上就具有一定的一致性,如图 6 所示,黑框中为经透视变换后的图像 M' ,背景为图像 N 。

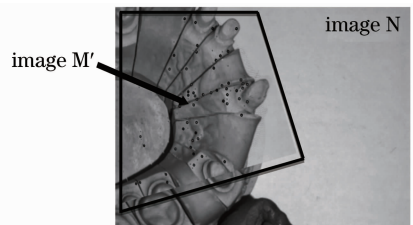


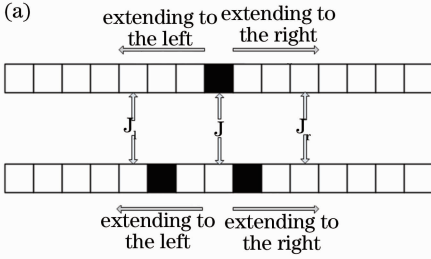
图 6 图像变换

Fig. 6 Image transformation

由图 6 可以看出,在两张图像在对应的特征点周围,坐标相同的像素点具有一定的一致性,这样方便寻找对应点。插值的过程是,在图像 M' 和图像 N 的 X 方向或者 Y 方向扩展,当遇到两个点均存在相位时,求解两点的三维空间坐标,进行插值,用插值获得的点代替原先的点。由于并不需要精确地知道

特征点的实际空间位置,只需要保证一对空间点的相对位置是比较接近的,因此直接取两点均值:

$$p'_i = \frac{(p_i^{\text{pre}} + p_i^{\text{back}})}{2}, \quad (3)$$



用 p'_i 代替 p_i , q'_i 代替 q_i , 这样就获得了相应的一对空间三维点, 插值示意图如下图 7 所示。

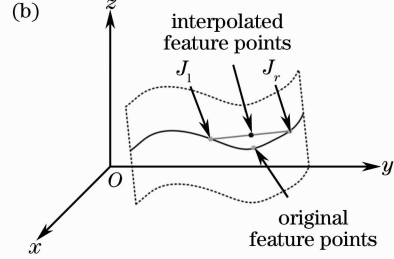


图 7 特征点插值过程。(a) 图像特征点插值; (b) 空间点插值

Fig. 7 Interpolation of adjacent points. (a) Interpolation of image features; (b) interpolation of three-dimensional points

图 7(a) 中方格表示像素点, 黑色方格表示该位置相位信息缺失, 第一行表示图像 M' 中包含特征点的某一行, 第二行对应于图像 N 中相应的一行, J 表示两张图像中对应的特征点的 X 坐标, J_l 和 J_r 位置表示存在相位信息、能够重建的点的 X 坐标。图 7(b) 中黑色曲线表示物体表面由该行像素重建获得的截面线。

标记为错误点的点再进行一次筛选, 筛选出正确的点。实现过程伪代码如下:

2.2.2 错误匹配点的去除

在进行三维重建的时候, 部分点即使存在相位, 但是由于求解的相位不正确, 重建后的位置“飞离”物体表面, 与实际位置相去甚远, 这样的点反而会将正确的点对拉远, 极大地影响粗拼接精度, 因此需要将错误的点滤除。ICP 算法中也存在滤除错误点的步骤, 但是一般多采用比较向量一致性^[14] 或者比较点对间距的方法^[15], 对于数量少且不含法矢信息的点并不适用。刚性变换的一片点云中, 两点之间的距离是固定的, 基于此, Dorai 等^[16] 提出了一种利用同一片点云中两点的距离作为阈值来判断点是否是合理点的方法, 但是计算量较大, 对于 n 个点, 需要计算 $n \times (n-1)$ 次点对距离, 随着点的增加, 计算次数会急剧增加。提出一种改进的方法, 将计算次数降低到 $2(n-1)$ 次, 同时保证了获得的点的正确性。

- 1) 将所有的点标记位清 0 (表示正确点);
- 2) num=0, index = 0;
- 3) while(index < 点数目)

```

{
    v1 = 图像 M 特征点[num] - 图像 M 特征点[Index]
    v2 = 图像 N 特征点[num] - 图像 N 特征点[Index]
    ratio =  $\frac{\|v_1\|}{\|v_2\|}$ 
    If(0.9 < ratio < 1.1 且 cos<v1, v2> > 0.98)
    {
        index++;
    }
}
else
{
    下标为 num 和 index 的点的标志位置为 1 (表示错误点);
    num++; index++;
}
}

```

4) 剩余的标志位为 0 的点可以确定为正确的点, 随机选择其中的某一个点, 两片点云中下标相同的点与该点的欧式距离以及从该点到另外一点形成的向量之间的夹角满足一定阈值, 判断为正确点, 否则为错误点。

两对三维点对 (p_1, q_1) 和 (p_2, q_2) , 若

$$\left\| \frac{S_{\text{Dist}}(p_1, p_2)}{S_{\text{Dist}}(q_1, q_2)} - 1 \right\| < S_{\text{ThesDist}},$$

$$\left\| \frac{\theta_{\text{Ang}}(p_1, p_2)}{\theta_{\text{Ang}}(q_1, q_2)} - 1 \right\| < \theta_{\text{ThesAng}}, \quad (5)$$

则认为这两对点均为正确点, 否则均判定为错误点。即将同一张图像中的一对不确定点均标记为错误点, 依此标记直至将所有的点筛选一遍。剩下的点均认为是正确点, 再随机从正确点中选择一个点, 对

步骤 3) 中的阈值可以取较小的值, 选择夹角相差小于 10° 的向量 ($\cos 10^\circ \approx 0.9848$), 而步骤 4) 中的阈值可以取较大值, 实验表明该方法能有效地滤除错误点, 取得正确的点对, 达到良好的拼接效果。

3 实验结果

为验证该方法的效果,采用映美精工业相机 DMK 23G445 和投影仪 NEC NP43+搭建结构光三维测量系统,采用 四步相移和多频外差^[17]结合的方法进行重建。一个周期投影的四张编码图像按照如下公式生成,投影三个不同的周期,类推产生另外 8 张图像,共 12 张图像:

$$A_{00}(t) = 127 + 127\sin(\omega_0 t), \quad (6)$$

$$A_{01}(t) = 127 + 127\sin(\omega_0 t + \pi/2), \quad (7)$$

$$A_{02}(t) = 127 + 127\sin(\omega_0 t + \pi), \quad (8)$$

$$A_{03}(t) = 127 + 127\sin(\omega_0 t + 3\pi/2). \quad (9)$$

为了获得用来查找图像特征的特征点,将前四张图像进行叠加以消除编码光对图像的影响,再将每个像素点的灰度值(用八位二进制表示,最大只能表示 255)除以 2 防止饱和,从而获得正常白光环境下的图像。在获得的有重叠部分的两张白光环境下的图像中查找用来匹配的特征点对。

在不同视角拍摄石膏牙模,识别并匹配获得的图像特征点对为 118 对(如图 3 所示),直接重建获

得的三维点对为 85 对,采取该方法对特征点插值恢复后(该方法重建的特征点并不能表示物体的表面,故并不输出表示物体表面数据,仅提供点云数据的初始位置信息),可以获得 115 对特征点对,提升了 26% 的有效特征点数量。插值获得三维点对集后,利用该方法,对错误点进行滤除。相较不滤除错误点的情况,拼接质量得到了很大提升,避免了一些错误点对的出现。滤除错误点前后结果对比如图 8 所示,重叠部分点云平均距离为 0.287 mm。采用 ICP 算法^[18]精确调整后,点云重叠部分平均距离降低到 0.074 mm。计算采用四元数法^[19]计算点云的刚性变换矩阵。实验采用 Geomagic Studio 对获得的数据进行分析。

采用石膏人头像作为测量对象的拼接结果如图 9 所示,重叠部分平均距离为 0.237 mm,采用 ICP 算法精确调整位置后,点云重叠部分的平均距离下降到 0.119 mm。

采取石膏牙模和石膏人头像作为实验对象,进行多组实验,部分实验数据如表 1 所示。

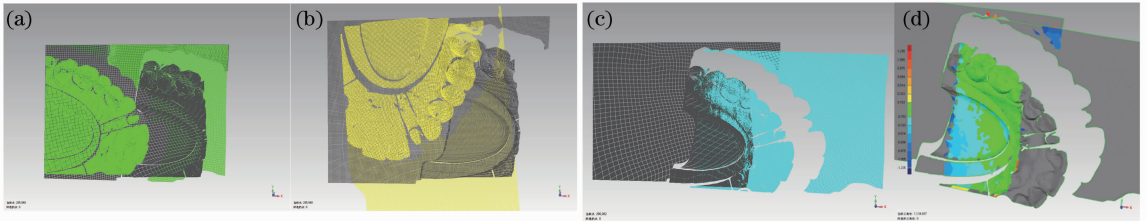


图 8 滤除错误点前后拼接结果对比。(a)两片点云的初始位置;(b)未滤除错误点对获得的拼接结果;(c)滤除错误点对后获得的拼接结果;(d)滤除错误点对后拼接结果误差分析

Fig. 8 Comparison of results before and after culling incompatible data. (a) Initial positions of two point clouds; (b) result before culling incompatible data; (c) result after culling incompatible data; (d) error analysis of the result after culling incompatible data

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

	Pairs of feature-points	Pairs of spatial points without interpolation	Pairs of spatial points with interpolation	Percentage of numbers improvement /%	Average distance of point clouds /mm	Average distance of point clouds after refinement /mm
Group one	118	85	115	26.0	0.287	0.074
Group two	125	98	122	24.5	0.237	0.119
Group three	67	55	67	21.8	0.204	0.179
Group four	62	52	54	3.8	0.123	0.081
Group five	41	31	41	32.3	0.372	0.194

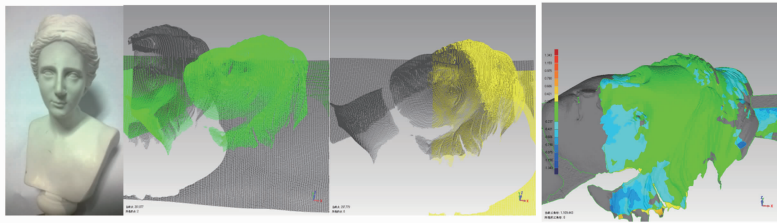


图9 采用该方法拼接的石膏人头像数据

Fig. 9 Registration result of point clouds of gypsum human head

4 结 论

提出了面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法,利用特征点的邻域信息,插值恢复特征点,提升了特征点平均 20% 的利用率,并利用该方法排除空间中错误的特征点。实验表明,该方法能获得良好的点云初始位置,拼接后点云重叠部分平均间距在 0.5 mm 以下,同时相较于以往的映射拼接,具有较高的稳定性。由于物体图像是在投射白光的环境下拍摄的,因此,物体表面的突起造成的阴影对物体的特征识别影响较大,在角度变换过大时往往无法识别足够的特征点,如何提高图像特征点识别的稳健性是亟需解决的问题。而点滤除方法在错误点超过一半的情况下,会难以识别出正确的点,从而不能获得正确的拼接结果。

参 考 文 献

- 1 C S Chua, R Jarvis. Point signatures: a new representation for 3D object recognition [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 25(1): 63–85.
- 2 A E Johnson, M Hebert. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 433–449.
- 3 Luo Xianbo, Zhong Yuexian, Li Renju. Data registration in 3D scanning systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(8): 1104–1106.
罗先波, 钟约先, 李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2004, 44(8): 1104–1106.
- 4 Xie Zexiao, Zhang Chengguo, Zhang Guoxiong. An automatic registration method for the data patches obtained by structured-light sensors [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(9): 775–778.
解则晓, 张成国, 张国雄. 线结构光测量数据的自动拼合方法[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(9): 775–778.
- 5 S Rusinkiewicz, M Levoy. Efficient variants of the ICP algorithm [C]. *Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001. 145–152.
- 6 Wei Hu, Zhang Liyan, Liu Shenglan, *et al.*. An algorithm on registration of multi-view range images based on SIFT feature matching [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, (4): 654–661.
韦 虎, 张丽艳, 刘胜兰, 等. 基于 SIFT 图像特征匹配的多视角深度图配准算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010,

- (4): 654–661.
- 7 Haihua Cui, Wenhe Liao, Ning Dai, *et al.*. Registration and integration algorithm in structured light three-dimensional scanning based on scale-invariant feature matching of multi-source images [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(9): 091001.
- 8 Tao Haiji, Da Feipeng. Automatic registration algorithm for the point clouds based on the normal vector [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0809001.
陶海路, 达飞鹏. 一种基于法向量的点云自动配准方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0809001.
- 9 H P Moravec. Rover visual obstacle avoidance [C]. *7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, 2: 785–790.
- 10 C Harris, M Stephens. A combined corner and edge detector [C]. *Alvey Vision Conference*, 1988. 147–151.
- 11 D G Lowe. Object recognition from local scale-invariant features [C]. *Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, 2: 1150–1157.
- 12 Lei Yuzhen, Li Zhongwei, Zhong Kai, *et al.*. Mismatching marked points correction method based on random sample consensus algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315002.
雷玉珍, 李中伟, 钟 凯, 等. 基于随机抽样一致算法的误匹配标志点校正方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315002.
- 13 Guo Xiaoran, Cui Shaohui. Image mosaic approach using local feature points registration [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(1): 89–94.
郭晓冉, 崔少辉. 基于局部特征点配准的图像拼接算法[J]. *半导体光电*, 2014, 35(1): 89–94.
- 14 K Pulli, L G Shapiro. Surface reconstruction and display from range and color data [J]. *Graphical Models*, 2000, 62(3): 165–201.
- 15 T Masuda, K Sakaue, N Yokoya. Registration and integration of multiple range images for 3D model construction [C]. *13th International Conference on Pattern Recognition*, 1996, 1: 879–883.
- 16 C Dorai, G Wang, A K Jain, *et al.*. Registration and integration of multiple object views for 3D model construction [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(1): 83–89.
- 17 Huang Yanan, Lou Xiaoping. Phase correction and matching based on multi-frequency heterodyne method [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 237–241.
黄亚楠, 娄小平. 基于多频外差原理的相位校正及匹配方法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(2): 237–241.
- 18 P J Besl, N D McKay. A method for registration of 3D shapes [C]. *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, 1992, 1611: 586–606.
- 19 B K P Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions [J]. *J Opt Soc Am A*, 1987, 4(4): 629–642.