

无色差光滑曲面特征点的提取及匹配算法

许鹏飞¹, 姜兆亮^{1,2}, 赵阳¹, 朱先萌¹

¹山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061;

²山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061

摘要 双目视觉是机器视觉中经典有效的方法。针对无色差光滑曲面特征点难以提取的问题, 提出一种用均匀激光网格创造曲面上色彩特征的方法, 以及特征点提取和匹配算法。首先, 提取激光网格线, 采用膨胀与腐蚀等算法将激光线断点拼接并转化为单像素连通线; 然后, 利用连通线上点的八邻域及四邻域的连通性对特征点进行提取; 最后, 对提取后的特征点根据位置信息进行编号, 完成特征点的匹配。实验结果表明, 该算法稳健性好, 提取精度高, 匹配正确率及重复率高, 三维重建后特征点间的距离误差小于 0.05 mm、标准差为 0.0362 mm。该算法直接对特征点进行提取及匹配, 与离散特征线获取特征点的方法相比精度更高, 可应用于曲面上点的均匀抽样检测。

关键词 机器视觉; 特征点提取与匹配; 邻域算法; 光滑曲面

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0415002

Feature Point Extraction and Matching Algorithm of Smooth Surfaces Without Chromatic Aberration

Xu Pengfei¹, Jiang Zhaoliang^{1,2}, Zhao Yang¹, Zhu Xianmeng¹

¹School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

²Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

Abstract Binocular vision is a classical and efficient method in machine vision. Aiming at the problem that it is difficult to extract feature points of smooth surfaces without chromatic aberration, we propose a method of creating color features on surfaces with uniform laser grids, and a feature point extraction and matching algorithm. Firstly, in order to extract the laser grid line, the laser line breakpoint is spliced and transformed into a single pixel connected line by the expansion and corrosion algorithm. Then, the feature points are extracted by the connectivity of eight neighborhood and four neighborhood of points on the connected line. Finally, the extracted feature points are numbered according to the location information to complete the matching of feature points. The experimental results show that the algorithm has good robustness, high extraction accuracy, high matching accuracy and high repetition rate. The distance error between the feature points after three-dimensional reconstruction is less than 0.05 mm, and the standard deviation is 0.0362 mm. The proposed algorithm can carry out feature point extraction and matching directly, which is more accurate than the method of discrete feature lines as feature points. It can be applied to the uniform sampling detection of points on surfaces.

Key words machine vision; feature point extraction and matching; neighborhood algorithm; smooth surface

OCIS codes 150.1135; 110.2960; 100.2960

1 引 言

近年来,随着机器视觉的不断发展,三维成像技术已广泛应用于三维打印、虚拟现实、反求工程等领

域。特征点的提取和匹配是视觉图像处理的关键,提取精度及匹配准确度直接影响三维重建效果。无色差光滑曲面是实际工程应用中常见的一类曲面,它的颜色单一,较难直接根据其纹理特征^[1-4]和颜色

收稿日期: 2017-09-01; 收到修改稿日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(51175304)、山东省自然科学基金(ZR2017MEE052)

作者简介: 许鹏飞(1993—),男,硕士研究生,主要从事计算机视觉、图像处理方面的研究。E-mail: 859682116@qq.com

导师简介: 姜兆亮(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事数字化制造与精密制造方面的研究。

E-mail: jiangzhaoliang@sdu.edu.cn(通信联系人)

特征^[5-8]提取特征点。又因光滑曲面的起伏较小,根据其空间特征^[9]和形状特征^[4,10]提取特征点的方法精度亦较低。使用光线在曲面上补充颜色特征的方法应用广泛,可以较好地解决以上问题。

在机器视觉方面,基于结构光的视觉方法在补充颜色特征方面优势明显。该方法的原理是对曲面进行分割,根据结构光的特征离散提取特征点^[11-12]。文献^[13]提出了一种线结构光的方法,用轮廓多边形提取和优化光线的中心线,在中心线的提取方面取得较好的效果。但是用线结构光的方法重建三维曲面时相机须随光条同步移动,光条拼接过程会产生误差。另外,在将曲面上的特征光条离散为特征点云的过程中会产生误差,出现特征点提取不精确的问题。也有研究利用投影仪对曲面照射编码结构光,其类型包括彩色条纹^[14-15]、二元结构光^[16]、正弦结构光^[17]等。这些方法在一定程度上解决了线结构光的特征过于单一及光条过于狭窄的问题,但是编码单元图案仍然占有较大面积,离散后的特征点精度不高。文献^[18]提出了一种直接利用激光网格提取特征点的方法,但是其激光网格不均匀,特征点的提取精度较低,且未给出匹配算法。

综上所述,目前利用结构光或激光网格提取无色差光滑曲面特征点的方法在精度上有待提高。针对该问题,本文利用均匀分布的激光网格在曲面上补充颜色特征,设计一种无色差光滑曲面特征点提取算法及相应的匹配算法。采用半导体均匀网格状激光器在曲面上补充激光网格特征,通过图像相减、膨胀、腐蚀、细化等算法获取单像素激光网格线,利用邻域关系提取网格线交点作为特征点,然后对所得的特征点云根据单位网格边长及网格扭曲角度进行匹配,最后通过实验验证本文算法的提取精度及稳健性。

2 视觉系统模型及图像预处理

2.1 视觉系统模型的建立

为获取激光网格图像,保证算法的正确运行,须建立视觉系统模型。采用两个工业相机,固定其相对水平距离 $2d=0.2\sim 0.4$ m,两相机中央放置半导体均匀网格状激光器,固定激光器与待测曲面之间的水平距离 $l=0.5\sim 1$ m,如图 1 所示。

2.2 图像的预处理

1) 粗激光网格线的提取及锐化。通过图像相减及二值化的方法排除背景干扰,对激光网格线进行提取及锐化。待测曲面彩色图像矩阵 A_1 减激光照射后的待测曲面彩色图像矩阵 A_2 得激光线条矩阵 A_3 ,使

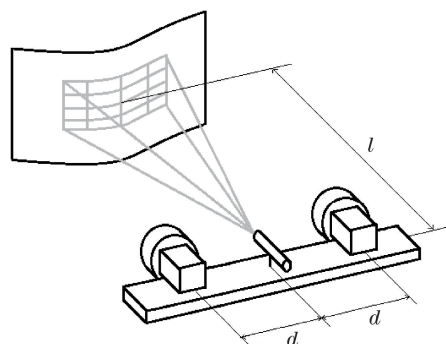


图 1 待测曲面、激光器及相机的布局

用大津法^[19]处理 A_3 得二值矩阵 $A_4(x, y)$, 其取值为 0 或 1[下文中 A_p 取值范围同 $A_4, p \in (4, 14)$]。

2) 激光网格图像的去噪。为去除噪声点,减小大噪声区域面积,用 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的全一矩阵模板腐蚀 A_4 得图像矩阵 A_5 , 去除 A_5 小面积连通域, 得到图像矩阵 A_6 。

3) 单像素激光网格线的提取。用 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的零矩阵模板膨胀 A_6 5 次得到图像矩阵 A_7 , 用 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的全一矩阵模板腐蚀 A_7 5 次得到图像矩阵 A_8 , 用 Matlab 软件中的 bwmorph 函数模板细化 A_8 得到图像矩阵 A_9 。 A_9 保留了原始光条图像的拓扑性质。

图像部分区域的预处理效果如图 2 所示,图 2(a) 缩小为原图像的 $1/16$,图 2(b)~(d) 放大了 4 倍。

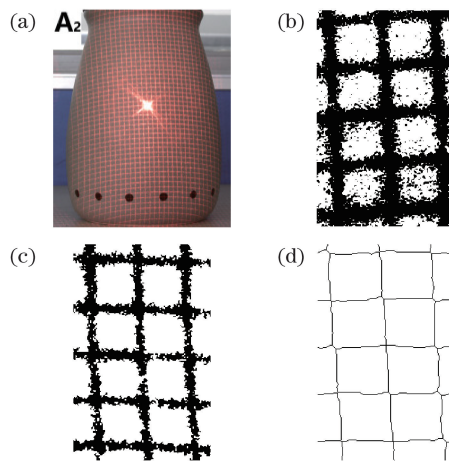


图 2 图像预处理示例。(a)经照射后的实验曲面;
(b)二值化后的局部放大图;(c)去噪处理后的局部放大图;
(d)细化后的局部放大图

Fig. 2 Examples of image preprocessing.

- (a) Experimental surface after irradiating;
- (b) partial enlarged image after binaryzation;
- (c) partial enlarged image after de-noising;
- (d) partial enlarged image after thinning

3 特征点提取

3.1 提取特征点的邻域算法

对 A_9 中值为 0 的像素点八邻域的连通情况进行分析,共有三种情况,即二个方向连通、三个方向连通和四个方向连通。二个方向连通的点位于网格边线及网格线交汇区域的中心位置,三个方向连通和四个方向连通的点均在网格线交汇区域。为提取最终特征点,需要提取和处理三个方向连通和四个方向连通的点,依次按照如下方法运行。

1) 根据八邻域连通性过滤点阵。设 A_{10} 为与 A_9 像素相同的二值全一矩阵,对于 A_9 中值为 0 的像素点,若其八邻域内三个或四个方向连通,则令 A_{10} 中对应像素点的值为 0。 A_{10} 中值为 0 的点即为所得的待处理特征点。为方便分析所得的待处理特征点的分布情况, A_{10} 中值为 0 的像素点用灰色表示并与 A_9 叠加。根据灰色像素点的四连通域形状命名,四连通域形状共有 5 种,即角、丁、点、十字和交叉。网格线相交区域的灰色像素点的四连通域共有 6 种情况,放大 8 倍后如图 3 所示,其中图 3(a)~(d) 的灰色像素点均为两个四连通域分布,图 3(e)和(f)的灰色像素点均为一个四连通域分布。

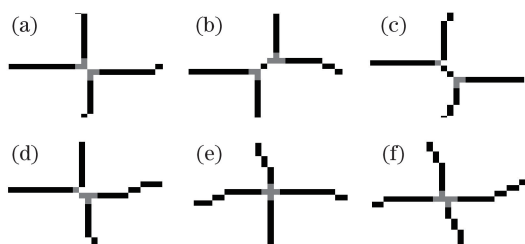


图 3 不同类型连通点的局部放大图。(a)双角型;
(b)丁角型;(c)点角型;(d)点丁型;(e)十字型;(f)交叉型
Fig. 3 Partial enlarged images of different types of connected points. (a) Double angle type;
(b) T and angle type; (c) point and angle type;
(d) T and point type; (e) cross type; (f) overlapping type

2) 根据四邻域连通性过滤点阵。①按照从左到右、从上到下的顺序遍历(遍历顺序下同) A_{10} 中值为 0 的点,若 A_{10} 中值为 0 的点四连通或四邻域内三个方向连通,则令该点的连通点值为 1。②遍历通过步骤①所得的矩阵中值为 0 的点,若遍历点的四邻域内二个方向连通,则令该点的连通点值为 1。设经过处理后的矩阵为 A_{11} ,图 3 的 6 种情况经处理后如图 4 所示。

3) 坐标平均值法提取网格交点。设 $A_{12}(x, y)$ 为与 A_{11} 像素相同的二值全一矩阵,用来储存网格

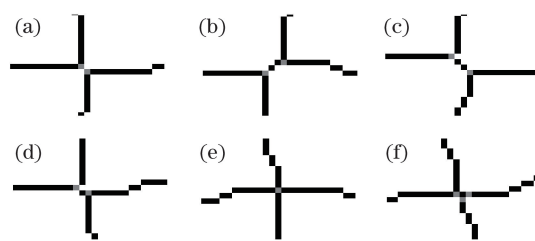


图 4 过滤后的连通点局部放大图。(a)双角型;
(b)丁角型;(c)点角型;(d)点丁型;(e)十字型;(f)交叉型
Fig. 4 Partial enlarged images of connected points after filtration. (a) Double angle type; (b) T and angle type; (c) point and angle type; (d) T and point type; (e) cross type; (f) overlapping type

交点。在待测曲面垂直位置放置光滑平板并用半导体均匀网格状激光器照射,定义所得的激光网格的单位网格边长为 S_l ;遍历 A_{11} 中值为 0 的点,以遍历到的点为中心,在以 S_l 为边长的方形区域内再遍历 A_{11} 中值为 0 的点。若区域内 A_{11} 中值为 0 的像素点的个数为 2 或 3,则取这些点的像素坐标平均值(若非整数,则进行四舍五入运算),令 A_{12} 在该平均值坐标下的值为 0;若区域内 A_{11} 中值为 0 的像素点的个数仅为 1,且在 A_9 中该点四连通,则令 A_{12} 在该点像素坐标下的值为 0。 A_{12} 中值为 0 的点即为所得的待处理特征点。图 4 的 6 种情况处理后如图 5 所示。

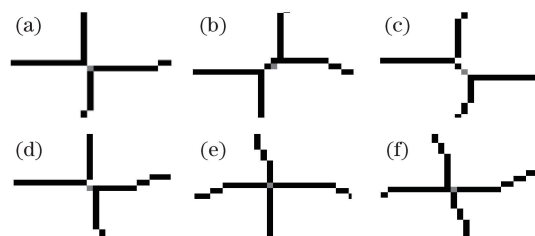


图 5 二次过滤后的连通点局部放大图。(a)双角型;
(b)丁角型;(c)点角型;(d)点丁型;(e)十字型;(f)交叉型
Fig. 5 Partial enlarged images of connected points after second filtration. (a) Double angle type; (b) T and angle type; (c) point and angle type; (d) T and point type; (e) cross type; (f) overlapping type

4) 噪声点过滤。遍历 A_{12} 中值为 0 的点。以遍历到的点为中心,在以 S_l 作为长和宽的矩形区域内遍历 A_{12} 中值为 0 的点,若区域内 A_{12} 中值为 0 的点的个数大于 1,则令这些点的值为 1;以 A_{12} 中值为 0 的点为中心,以 3 倍的 S_l 作为长和宽的矩形区域内遍历 A_{12} 中值为 0 的点,若区域内 A_{12} 中值为 0 的点的个数等于 1,则令该点的值为 1。处理后的矩阵为 A_{13} ,其中 A_{13} 中值为 0 的点为特征点。

5) 阈值法处理获取更多特征点。观察 A_{13} 的特

征点是否满足覆盖 80% 的网格线交点(除中央高亮区域交点)的要求,若不满足要求,则采用阈值法提取更多特征点。即利用大津法所得的自适应阈值 r 作为初始值,该值阶梯状增加 $5(r+5, r+10, r+15, \dots)$ 后作为新的阈值锐化图像,重复图像预处理的步骤 2)、3) 及特征点提取步骤,获取的特征点与 A_{13} 的非重复特征点叠加。

3.2 本文算法与 Harris 角点检测算法的对比

对细化后的图像矩阵 A_9 进行 Harris 角点检测,并将其处理结果与本文根据八邻域连通性过滤的点阵结果进行比较,如图 6 所示(灰色点为用本文算法提取的特征点,“+”为用 Harris 角点检测算法提取的特征点)。可以明显看出:Harris 角点检测算法误提取点较多,而本文算法提取正确率高。

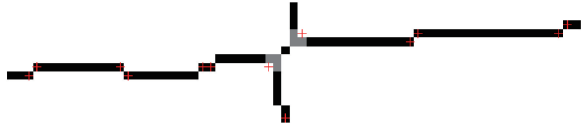


图 6 两种特征点提取算法的比较

Fig. 6 Comparison of two feature point extraction algorithms

4 特征点匹配算法

4.1 单位激光网格边长的计算

设 A_{13} 中值为 0 的点的个数为 k , k 个点中每个点与其余 $k-1$ 个点的距离为

$$s(i, j) = \sqrt{[x(i) - x(j)]^2 + [y(i) - y(j)]^2}, \quad (1)$$

式中点 i 与点 j [$i \in (1, k), j \in (1, k-1), i \neq j$] 的距离为 $s(i, j)$, x, y 为点的像素坐标。

令矩阵 $s_{\min}(k-1)$ 记录 s 中每一行的最小值,作为 k 个点中每个点与其余点的最小距离矩阵,特征点间的最小距离分布示意图如图 7 所示。图 7 中,区域①、区域②、区域③对应着网格点间的三种情况,分别为插入噪声点、正常网格、高亮区域的孤立噪声点。记录编号的中位数对应的距离值 L 作为近似的单位激光网格边长。

4.2 中心匹配点的提取及再次去噪

1) 提取中心点。 A_3 中心高亮区域所占面积比例 P 定义为

$$P = \frac{S_2}{m \times n}, \quad (2)$$

式中 $m \times n$ 为 A_3 的像素乘积。灰度阈值选取条件如下:

$$\sum_{255}^g M(g) > P \times m \times n, \quad (3)$$

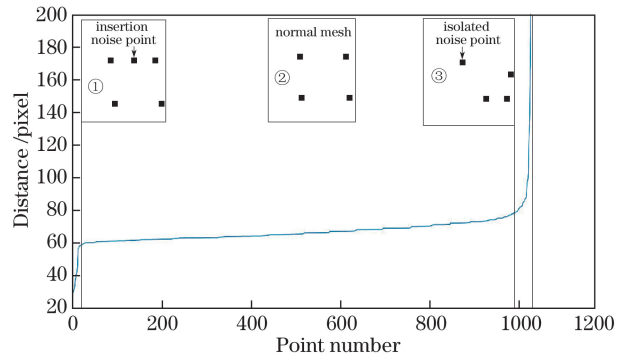


图 7 特征点间的最小距离分布示意图

Fig. 7 Example of minimum distance distribution between feature points

式中 $g \in (0, 255)$ 为灰度值, $M(g)$ 为 A_3 的灰度矩阵。满足(3)式的 g 的最大值作为灰度阈值并对 A_3 二值化,以所得矩阵的最大连通域质心坐标 (x_c, y_c) 作为激光网格的中心匹配点。

2) 再次去噪。去噪条件为

$$s < \lambda_1 \times L, \quad (4)$$

$$s_{\min} > \lambda_2 \times L, \quad (5)$$

式中限定参数 λ_1 取值范围为 $0.6 \sim 0.8$, λ_2 取值范围为 $1.2 \sim 1.5$ 。若 $s(k, k-1)$ 的某行[设为 $h, h \in (1, k)$] 矩阵对应数值满足(4)式两次,则令编号 h 对应点在 A_{13} 中取值为 1,以去除插入噪声点;若 $s_{\min}(k-1)$ 的某值[设为 $h_2, h_2 \in (1, k-1)$] 满足(5)式,则令编号 h_2 对应点在 A_{13} 中取值为 1,以去除孤立噪声点。去噪后的特征点矩阵为 A_{14} 。

4.3 编号匹配

对所提取的特征点进行编号匹配,设激光网格为 $M \times M$ 阵列,储存特征点云图像的假匹配点矩阵为 $A(M+1, M+1, 2)$,储存特征点云图像的匹配矩阵为 $A_r(M+1, M+1, 2)$, x_c 值赋予 $A(M/2+1, M/2+1, 1)$, y_c 值赋予 $A(M/2+1, M/2+1, 2)$ 。

首先对中心点所在列上方特征点进行编号。设图像边界集合为 $I = \{0, m, n\}$, 角度为 α 并赋予初始值 0, 所检测的行号为 c 并赋予初始值 $M/2$ 。对第 c 行是否在像素范围内进行判断:

$$A(c+1, M/2+1, 1) - L \times \cos \alpha > I(1). \quad (6)$$

若满足(6)式,则对 $A(c, M/2+1, 1)$ 赋值 $A(c+1, M/2+1, 1) - L \times \cos \alpha$, 对 $A(c, M/2+1, 2)$ 赋值 $A(c+1, M/2+1, 2) - L \times \sin \alpha$ 。在以点 $(c, M/2+1)$ 为中心, L 为边长的矩形区域内遍历 A_{14} 中值为 0 的点: 若该点存在且唯一,则该点作为 $(c, M/2+1)$ 处的假匹配点,将该假匹配点像素坐标赋予 $[A(c, M/2+1, 1),$

$\mathbf{A}(c, M/2+1, 2)$];若该点存在且不唯一,则以距离 $(c, M/2+1)$ 最近的点(非重合点)作为 $(c, M/2+1)$ 处的匹配点,将该匹配点像素坐标赋予 $[\mathbf{A}(c, M/2+1, 1), \mathbf{A}(c, M/2+1, 2)]$ 及 $[\mathbf{A}_r(c, M/2+1, 1), \mathbf{A}_r(c, M/2+1, 2)]$ 。更新 α 的值,以点 $(c+1, M/2+1)$ 与点 $(c, M/2+1)$ 连线及点 $(c+1, M/2+1)$ 竖直方向连线所呈锐角作为新的 α ,以点 $(c+1, M/2+1)$ 竖直方向连线逆时针方向作为 α 的正方向。 c 值减 1,重复(6)式及之后步骤,直至 i 值为 1 或满足(7)式为止。

$$\mathbf{A}(c+1, 33, 1) - L \times \cos\alpha < I(1). \quad (7)$$

采用相同方法对中心点所在列下方的特征点进行编号匹配,然后对该列匹配点所在行的特征点进行编号匹配,完成后的匹配矩阵为 $\mathbf{A}_r(M+1, M+1, 2)$ 。陶罐实验的部分匹配结果如图 8 所示,其中绿色点为正确匹配点。

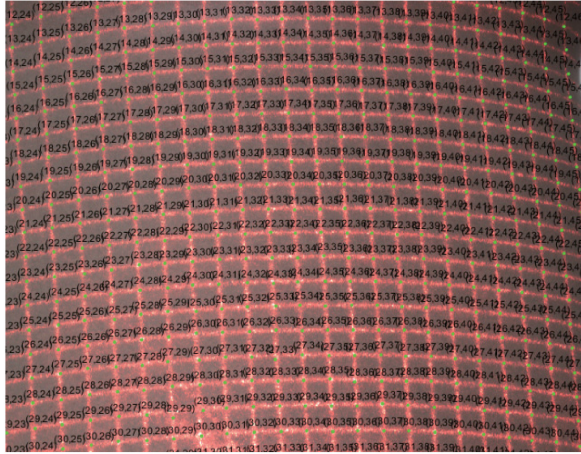


图 8 匹配结果示例

Fig. 8 Example of matching result

若匹配点分布仍不满足要求(考虑到中心高亮区域及部分边缘区域激光强度较低的现象),则采用插值法和取横向和纵向坐标平均值的方法补充特征点。

5 实验及结果分析

利用实验验证本文算法的正确性和有效性。采用 1400 万像素 CMOS 相机,以及波长为 650 nm 的半导体均匀网格状激光器 FU6502601WG100-GD16 进行实验。实验软件为 Matlab R2014b,计算机 CPU 为 Intel i7-6700HQ, RAM 为 8 GB。实验对象为陶罐曲面、网格平面、瓷杯曲面。从提取及匹配效果、提取精度、匹配正确率与重复率、稳健性等 4 个方面分析本文算法性能。

1) 提取及匹配效果。运用本文算法进行曲面

特征点提取及匹配,运行时间均在 1 min 以内。由于相机像素较高,单像素点图像无法在文中显示,把成功匹配的特征点云放大 10 倍后观察结果,如图 9 所示。特征点提取数量 T 和误提取点数量 E 如表 1 所示,以匹配点云中有明显位置差异(偏离网格线交点位置 10 pixel 以上距离)的点作为误提取点。

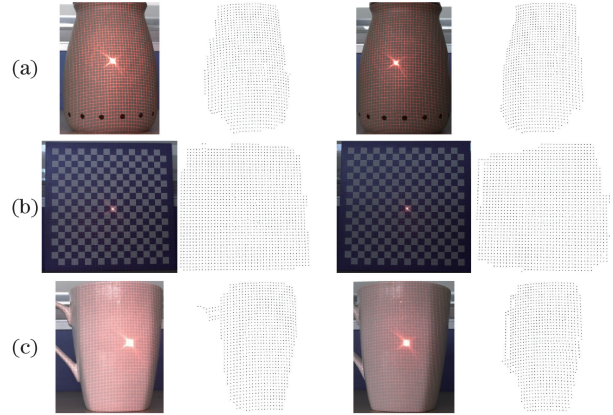


图 9 左右相机提取及匹配结果。

(a) 陶罐;(b) 网格平板;(c) 瓷杯

Fig. 9 Extraction and matching results of left and right cameras. (a) Pot; (b) grid plate; (c) china cup

表 1 特征点的数量与误提取点数量

Table 1 Number of feature points and false feature points

Experimental subject	Camera	T	E
Grid plate surface	Left	1759	0
	Right	1639	1
Pot surface	Left	1224	3
	Right	1230	0
China cup surface	Left	1026	0
	Right	1016	2

2) 特征点间的距离精度检验。因标定板平面的激光网格交点间的距离固定,以其作为标准计算提取的特征点云的标准差 σ 。先计算点与点之间的单位网格距离为(共提取到 $q=324182$ 个点与点之间的距离)

$$D_q = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{\sqrt{(a-i_2)^2 + (b-j_2)^2}}, \quad (8)$$

式中 $i_2 \in \{1, 2, \dots, M+1\}, j_2 \in \{1, 2, \dots, M+1\}$ 为 \mathbf{A}_r 中的点云按照网格中的位置分布赋予的位置标号; $a \in \{i_2, i_2+1, \dots, M+1\}, b \in \{j_2, j_2+1, \dots, M+1\}, (a, b) \neq (i_2, j_2)$ 为点 (i_2, j_2) 右方和下方矩形区域内点的位置标号;利用最小二乘法根据匹配结果对特征点进行三维重建, S_1, S_2, S_3 分别为点

(i_2, j_2) 与点 (a, b) 的三维坐标差值。计算 D_q 的平均值为

$$\bar{D}_q = \frac{\sum_{i_2=1}^q D_{i_2}}{q}, \quad (9)$$

最后计算提取的特征点云的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i_2=1}^n (D_{i_2} - \bar{D}_q)^2}{q}}. \quad (10)$$

将得到的所有 D_q 值与 \bar{D}_q 做差值并取绝对值,统计绝对值小于0.05 mm、小于0.1 mm,以及小于0.2 mm的比率,与文献[14,16,17,20]中算法的精度进行比较,如表2所示。文献[14,16,17,20]中的特征点提取效果如图10所示。相比于直接离散结构光线获取特征点的方法,本文以传统方法为基础进行改进,直接对特征点进行提取,由提取点间的距离误差及标准差的对比可以看出,本文算法精度更高。

表2 特征点间的距离误差及标准差

Table 2 Distance error and standard deviation of

Algorithm	Distance error			σ
	feature points			
	mm			
	<0.05	<0.1	<0.2	
Proposed method	0.9660	0.9921	0.9974	0.0362
Algorithm in Ref. [20]	0.5000	0.9000	0.9900	
Algorithm in Ref. [14]	Average error is 0.1031			0.0501
Algorithm in Ref. [16]	Average error is 0.0750			
Algorithm in Ref. [17]	Average error is 0.8362			

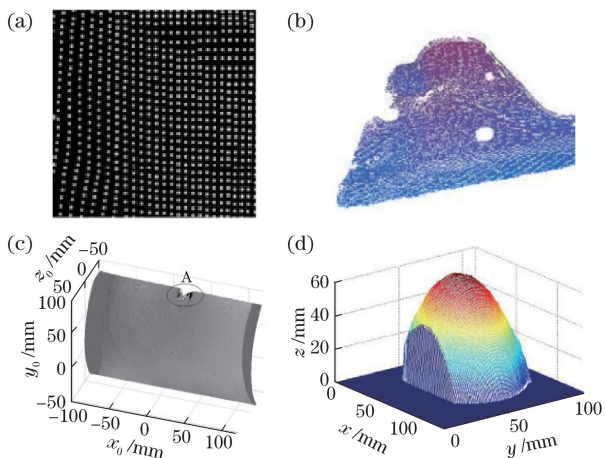


图10 不同文献的特征点提取效果图。(a)文献[20];

(b)文献[14];(c)文献[16];(d)文献[17]

Fig. 10 Extraction results of feature points in different references. (a) Ref. [20]; (b) Ref. [14]; (c) Ref. [16]; (d) Ref. [17]

3) 特征点匹配正确率与重复率。计算特征点匹配的正确率为

$$\beta_a = \frac{N_1}{N_c}, \quad (11)$$

式中 N_c 为去噪后的特征点个数, N_1 为 A_r 中正确匹配的点的个数。对于同一实验对象,计算特征点匹配的重复率为

$$\beta_r = \frac{N_2}{N_c}, \quad (12)$$

式中 N_2 为两相机的 A_r 中编号相同点(成功匹配点)的个数。统计结果如表3所示。

表3 匹配正确率与重复率

Table 3 Matching accuracy rate and repetition rate

Experimental subject	Camera	β_a	β_r
Grid plate surface	Left	1.0000	0.9227
	Right	0.9993	0.9902
Pot surface	Left	0.9975	0.9501
	Right	1.0000	0.9455
China cup surface	Left	1.0000	0.9512
	Right	0.9980	0.9606

4) 稳健性检验。控制测定表面为平面,针对如图11所示物体,对不同光照条件(10000 lx、<0.05 lx)、不同表面纹理条件下的提取及匹配效果进行检验,结果如表4所示。

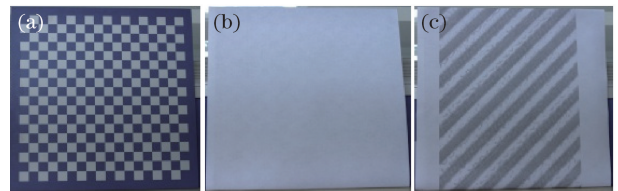


图11 待测物体。(a)网格平面;(b)白纸平面;(c)条纹纸平面

Fig. 11 Objects to be measured. (a) Grid plate plane;

(b) white paper plane; (c) stripe paper plane

结果表明,待测表面纹理的变化及光照条件的变化对于特征点提取数量及匹配正确率和重复率影响较小,故本文算法稳健性较好。

6 结 论

针对无明显色差光滑曲面特征点提取及匹配困难问题,提出了用均匀激光网格创造曲面上色彩特征的方法,并设计了特征点提取及匹配算法。直接提取网格线的交点作为特征点,显著提高了提取及匹配精度。实验结果表明,本文算法稳健性好,特征点分布均匀,提取精度基本达到0.05 mm,误提取点少,匹配正确率及重复率高。但由于激光网格中心

表 4 提取及匹配效果(左相机/右相机)

Table 4 Extraction and matching effects (left camera/right camera)

Test item	Grid plate surface		White paper surface		Stripe paper surface	
	10000 lx	<0.05 lx	10000 lx	<0.05 lx	10000 lx	<0.05 lx
T	1842/1722	1756/1636	1918/1907	1849/1842	2031/1916	1910/1843
β_a	1.00/1.00	1.00/1.00	1.00/1.00	1.00/1.00	1.00/1.00	1.00/1.00
β_r	0.92/0.99	0.93/1.00	0.98/0.99	0.99/0.99	0.94/1.00	0.96/1.00

区域过亮会导致特征丢失,采用插值法补充特征点的方法有待改进。将来可考虑中心区域特征点的精确提取方法。

参 考 文 献

- [1] Ma X, Deng K Z, Zhuang H F, *et al.* Otsu change detection of low and moderate resolution synthetic aperture radar image by using multi-texture features[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 062804.
马骥, 邓喀中, 庄会富, 等. 中低分辨率合成孔径雷达影像多纹理特征的 Otsu 变化检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 062804.
- [2] Liu H, Yang Y Q, Guo X C, *et al.* Improved LBP algorithm for texture feature extraction[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(6): 182-185.
刘豪, 杨永全, 郭仙草, 等. 用于纹理特征提取的改进的 LBP 算法[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(6): 182-185.
- [3] Huang Y Y, Guan T H. Texture feature extraction algorithm based on primitive co-occurrence matrix in dual-tree complex wavelet domain[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2014, 33(8): 79-83.
黄媛媛, 管国华. 双树复小波域基元共生矩阵的纹理特征提取方法[J]. *实验室研究与探索*, 2014, 33(8): 79-83.
- [4] Guo P Y, Su A, Zhang H L, *et al.* Online mixture of random naïve Bayes tracker combined texture with shape feature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0315002.
郭鹏宇, 苏昂, 张红良, 等. 结合纹理和形状特征的在线混合随机朴素贝叶斯视觉跟踪器[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0315002.
- [5] Wang W H, Wang Z, Zhou L Z, *et al.* Content-based color signature in color image[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2001, 13(6): 565-569.
王文惠, 王展, 周良柱, 等. 基于内容的彩色图像颜色特征的抽取方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(6): 565-569.
- [6] Liu Q, Zou B J, Chen Z L, *et al.* Color feature based interest objects detection[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2013, 25(6): 852-856.
刘晴, 邹北骥, 陈再良, 等. 一种基于颜色特征的感兴趣目标提取方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(6): 852-856.
- [7] Liu M F, Fu X Y, Shang Y Y, *et al.* Pedestrian tracking based on HSV color features and reconstruction by contributions[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091004.
刘梦飞, 付小雁, 尚媛园, 等. 基于 HSV 颜色特征和贡献度重构的行人跟踪[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091004.
- [8] Liu B, Zhao X, Hu C H, *et al.* Gesture recognition method of hand over face occlusion in color and depth images[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061001.
刘斌, 赵兴, 胡春海, 等. 面向颜色深度图像手脸近距遮挡的手势识别[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061001.
- [9] Ge J, Cao C C, Li G. Research progress in shape feature extraction methods based on machine vision[J]. *Packaging Journal*, 2015, 7(1): 54-60.
葛杰, 曹晨晨, 李光. 基于机器视觉的图像形状特征提取方法研究进展[J]. *包装学报*, 2015, 7(1): 54-60.
- [10] Guo Q, Yang H J, Liang X Y. Image retrieval method based on new space relationship feature[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(7): 1918-1922.
郭倩, 杨红菊, 梁新彦. 基于新的空间关系特征的图像检索方法[J]. *计算机应用*, 2016, 36(7): 1918-1922.
- [11] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- [12] Zhou X, Dan D, Qian J, *et al.* Super-resolution reconstruction theory in structured illumination microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0318001.
周兴, 但旦, 千佳, 等. 结构光照明显微中的超分辨

- 图像重建研究[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0318001.
- [13] Tian Q G, Zhang X Y, Ma Q, *et al.* Utilizing polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner[J]. Pattern Recognition, 2016, 55: 100-113.
- [14] Zhang C, Xu J, Xi N, *et al.* A robust surface coding method for optically challenging objects using structured light[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(3): 775-788.
- [15] Xiao C, Su X Y, Chen F, *et al.* A fusion method for multi-projector display based on fringe modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0412007.
肖朝, 苏显渝, 陈锋, 等. 基于条纹调制度的多投影显示融合方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0412007.
- [16] Anisimov A G, Groves R M. 3D shape shearography with integrated structured light projection for strain inspection of curved objects[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9525: 952517.
- [17] Zhao X, Liu J, Zhang H, *et al.* Measuring the 3D shape of high temperature objects using blue sinusoidal structured light[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(12): 125205.
- [18] Yin Q B, Fang Y. Research on computer vision measurement technology based on laser grid marking[J]. Journal of Qingdao University (Engineering Technology), 2004, 19(3): 92-96.
尹清波, 方漪. 基于激光网格标记的计算机视觉测量技术研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2004, 19(3): 92-96.
- [19] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [20] Sun Q K, He Y T, Chen R Q, *et al.* Research of three-dimensional point cloud reconstruction based on structured light[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(9): 2873-2877.
孙庆科, 何云涛, 陈瑞强, 等. 基于结构光的三维点云重建方法研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9): 2873-2877.