光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.020

基于特征数不变量的插针特征点匹配算法研究

李慧鹏，李　科*

（北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191）

摘　要： 针对电连接器插针匹配过程中特征点存在的近似对称以及在不同图像间存在大角度旋转变换的问题，提出了一种基于六点特征数不变量的特征点匹配算法。将特征点分为凸包与内点两部分，利用凸包上的点在射影变换中排列顺序的不变性实现了凸包匹配，利用以凸包特征点为基准的内点特征向量的相似性实现了内点匹配。实验结果证明，提出的算法能够很好地实现对插针特征点的匹配，具有一定的鲁棒性。

关键词： 电连接器；特征点匹配；特征数不变量；凸包

中图分类号： TP391.41　　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0865－05

Research on Pin Feature Point Matching Algorithm Based on Characteristic Number Invariant

LI Huipeng，LI Ke

（Dept. of Instrument Science and Opto-electronics Engin.，Beihang University，Beijing 100191，CHN）

Abstract： Aiming at the problem of approximate symmetry of the feature points in the pin matching process of the electrical connector and the large-angle rotation transformation between different images，it proposes a feature point matching algorithm based on the invariant of the six-point characteristic number. In this paper，the feature points were divided into two parts of convex hull and interior point. Then the invariance of the order of the points on the convex hull in the projective transformation was used to achieve the convex hull matching，and the similarity of interior point feature vectors based on convex hull feature points was used to achieve the interior point matching. The experimental results prove that the proposed algorithm can achieve the matching of the pin feature points well with certain robustness.

Key words： electrical connector；feature point matching；characteristic number invariant；convex hull

0　引言

电连接器作为航空航天系统中传输信号与能量的关键连接部件，其质量的好坏直接决定了系统的稳定性[1]，而视觉检测作为一种无接触高精度的检测方式，在工业检测领域发挥着重要的作用[2]，在电连接器插针质量检测上也具有很好的应用前景。在所有检测环节中，特征匹配的正确性会影响后续检测结果的准确性，因此有必要对其进行进一步的研究。

收稿日期：2020－06－08.

*通信作者：李　科　**E-mail：**18819487335@163.com

图像特征匹配的实质是确定同一个三维特征在不同二维图像之间的位置映射关系，匹配的关键在于构建图像特征的不变性描述。图像的特征一般表现为点特征、线特征、区域特征等几种[3]。其中，点特征相比其他特征，其提取方式较为简单，匹配方式较为灵活，因此应用更为普遍。

现今最常用的特征点提取与匹配算法为 SURT 算法，其利用了特征点附近的纹理特征作为特征描述子，在图像存在尺度变换与旋转变换时特征描述子保持不变[4]，但是在特征点邻域内存在大量相似的纹理特征时，匹配成功率不高，光照条件改变也可能会导致特征点邻域内的纹理变化，影响匹配效果。

还有一类利用特征点间的几何特征进行匹配的算法，文献[5]在 Delaunay 三角形约束的基础上，增加一定的错误控制，从而实现对点集的匹配，但算法的鲁棒性较差。文献[6]将图像的纹理特征与几何特征相结合构造特征点的特征描述子，提高了匹配算法的准确性，但是需要借助 SURT 算法确定匹配的基点。结合本文中电连接器插针图像的实际情况，电连接器插针位置的特征点在图像上表现为椭圆形亮斑的中心点，特征点附近的纹理极其相似，使用 SUFT 算法无法保证匹配基点的可靠性。

因此本文针对电连接器插针在不同图像中的特征点存在相似纹理与较大视角变换的情况时的匹配问题进行了研究，提出了一种基于特征数射影不变量[7]的插针特征点匹配算法，最终实现了不同图像中电连接器插针特征点的匹配。电连接器插针检测流程如图 1 所示。

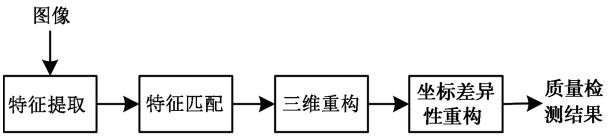


图 1 电连接器插针检测流程图

1 特征数不变量

1.1 特征数定义

如果在射影空间 P^m 上存在 $P_1,P_2,\cdots,P_r$ 共 r 个不同的独立点，假设 $P_{r+1}=P_1$，且这些点构成的闭合回路 $P_1P_2\cdots P_rP_{r+1}$ 中每一条线段 P_iP_{i+1} 上都存在着 n 个独立点 $Q_1^{(i)},Q_2^{(i)},\cdots,Q_n^{(i)}$，则其中每一个点的坐标都可以由端点坐标表示为 $Q_j^{(i)}=a_j^{(i)}P_i+b_j^{(i)}P_{i+1}$，特征数由相关系数 $\frac{a_j^{(i)}}{b_j^{(i)}}$ 的乘积表示：

$$k_n(\{P_i\}_{i=1,\cdots,r},\{Q_j^{(i)}\}_{j=1,\cdots,n}^{i=1,\cdots,r})=\prod_{i=1}^{r}\left(\prod_{j=1}^{n}\frac{a_j^{(i)}}{b_j^{(i)}}\right) \tag{1}$$

1.2 特征数不变量构造

特征数不变量的构造方法有多种形式，如以平面上五点[8]或者平面上六点[9]为基准点构造的三角形特征数，本文选择平面上六点作为基点构造特征数不变量。

如图 2 所示，假设平面上存在两组不共线的三点(A,B,C)和(D,E,F)，分别相互连接得到$\triangle ABC$ 与$\triangle DEF$，因此这两个三角形的三边分别相交于交点 $Q_1=AB\cap DE,Q_2=AB\cap DF,Q_3=AC\cap DF,Q_4=AC\cap EF,Q_5=BC\cap EF,Q_6=BC\cap DE$。因此，将$\triangle ABC$ 的顶点作为构造特征数的顶点 $P=\{A,B,C\}$，将两个三角形的交点作为构造特征数不变量时每条边上的点 $Q=\{Q_1,Q_2;Q_3,Q_4;Q_5,Q_6\}$，由此可以得到相应的特征数不变量 $CN(A,B,C,D,E,F)$。

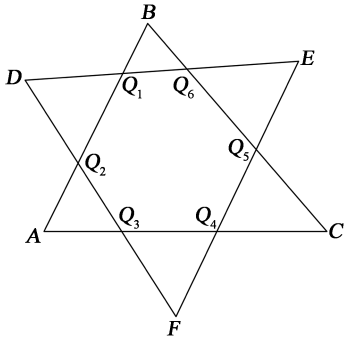


图 2 六点特征数不变量构造方式

将各个点 Q 代入之前的定义中，计算相应的比值 $\frac{b_i}{a_i}$，最终构造的六点特征数为以下形式：$CN(A,B,C,D,E,F)=\frac{m_{124}m_{346}m_{256}}{m_{236}m_{245}m_{146}}$，其中 $m_{ijk}=\begin{vmatrix}x_i & x_j & x_k\\ y_i & y_j & y_k\\ 1 & 1 & 1\end{vmatrix}$。

1.3 参考点构造

当选取的构造点中存在三点近似共线的情况时，m_{ijk} 的值接近于 0，会对算法的数值稳定性造成影响，从而影响最终的匹配结果。由于在射影变换中点的共线性不会改变，所以在不同的图像中共线点的位置以及点的排列顺序都是相对应的，因此，可以利用六个已知点的位置关系，重新构造出一个参考点 B 来替换近似共线点中的一点，从而达到消除极值、提高数值稳定性的目的，具体构造方式如图 3 所示。

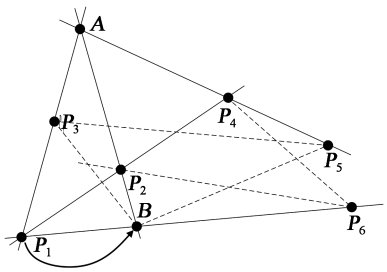


图 3 参考点构造方式示意图

设平面上六点为(P_1,P_2,P_3,P_4,P_5,P_6),设其中点(P_1,P_2,P_4)近似共线,因此可以依次得到 $A=P_1P_3 \cap P_4P_5$,$B=AP_2 \cap P_1P_6$,得到的 B 点即为构造的参考点,将共线点(P_1,P_3,P_4)中的 P_1 替换成 B,即可实现对近似共线情况的消除。

2　插针特征点匹配算法

2.1　基准点选择

在电连接器插针特征点点集中,并不存在先验的匹配点对。考虑到电连接器插针阵列分布的特性,特征点存在明显的内外层次结构,因此利用凸包在射影变换下排列顺序的不变性,通过对凸包的匹配即可寻找到适当的匹配基准点,匹配流程如图 4 所示。具体算法步骤如下:

(1)选取快速凸包检测算法,将特征点集的凸包点集与内部点集进行分离,在凸包点集上选择坐标最小的特征点作为起始点,对凸包上的特征点进行编号;

(2)从起始点开始遍历整个凸包点集,以凸包上相邻的六个点为一组基准点,计算其特征数 CN 的值,将其作为特征向量在该位置所对应的值,计算凸包的特征向量;

(3)选择向量的相对差异作为衡量特征向量之间相似度的量。首先选取其中任意一个特征向量作为匹配的参考向量,然后计算待测向量与参考向量每一个位置对应的特征向量值的相对差异 $\varepsilon_r=\frac{CN(i,j)-CN(0)}{CN(0)}$,标记相对差异 ε_r 小于阈值 T 的位置的个数作为该位置的相似度。对特征向量进行循环移位操作,将首位的元素移动至末尾,重复上述计算过程。最后选取其中最大值所对应的位置作为凸包起始点的匹配位置。由于凸包点集排列顺序

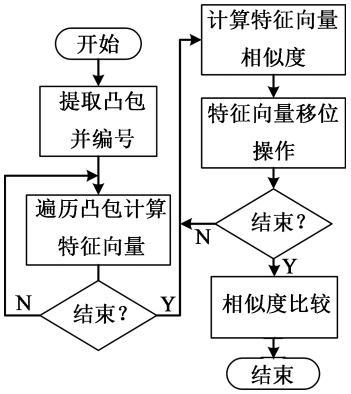


图 4　凸包匹配流程图

在射影变换中的不变性,一旦确定了起始点的匹配位置,也就确定了整个凸包的匹配顺序。

2.2　内点匹配

在得到凸包匹配结果后,对内点的匹配算法步骤如下:

(1)从凸包的起始点开始,选取凸包上相邻五点 P_1,P_2,P_3,P_4,P_5 作为匹配的基准点,选取内点点集中的一点作为构造特征数的第六点 P_6,计算对应的特征数不变量 $CN(P_1,P_2,P_3,P_4,P_5,P_6)$ 的值,作为对应内点在该位置的特征向量值;

(2)顺时针或逆时针遍历凸包,计算在选取不同的基准点时该内点所对应的特征向量的值;

(3)遍历内点点集,对所有的内点重复步骤(1)和(2),计算所有内点的特征向量;

(4)选取任意一组特征点作为匹配的参考点,计算待匹配点的特征向量与参考点的特征向量在不同向量位置的相对差异 ε_r,在特征向量中标记相对差异 ε_r 小于阈值 T 的位置,并对标记位置的个数进行记录,将标记个数最多的位置所对应的参考点与待匹配点作为匹配点。

内点匹配流程如图 5 所示。

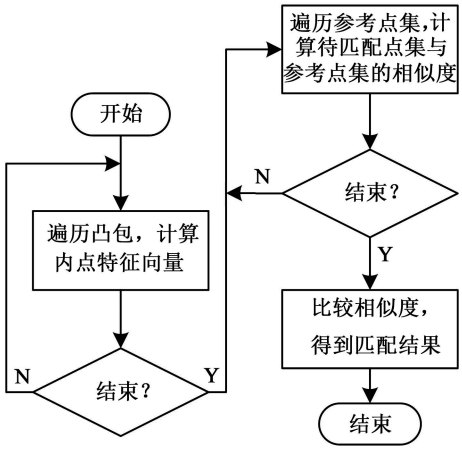


图 5　内点匹配流程图

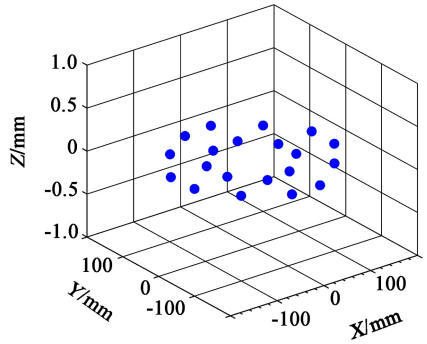
3　实验验证

3.1　模拟数据验证

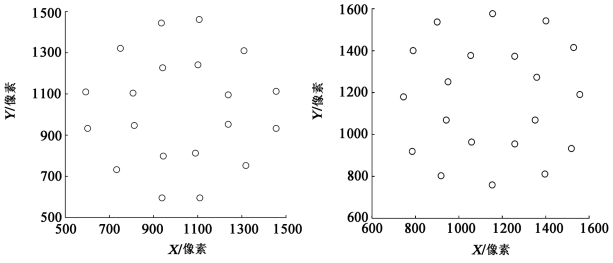
首先,对算法的正确性进行验证。在三维空间中构造一组由 20 个三维点组成的三维点集,模拟相机拍摄的过程将三维点投影到不同视角下的二维平面上,得到多组二维点的集合,如图 6 所示。

对二维点集求凸包,然后以第一幅图的凸包为基准求凸包的相似度,结果如图 7 所示。

然后以第一幅图像为基准对内点进行匹配，其中一幅图中的相似度如图 8 所示。



(a) 模拟点集



(b) 图像 1 (c) 图像 2

图 6 模拟点集示意图

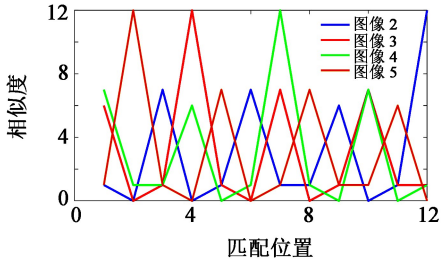


图 7 凸包匹配相似度

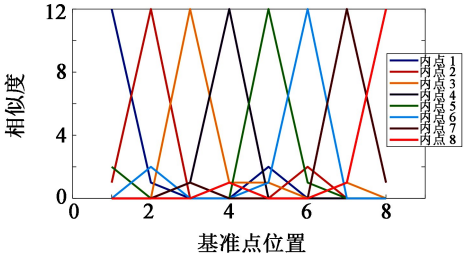


图 8 内点特征向量相似度

实验结果证明，利用特征数不变量进行特征点匹配的算法是可行的。

在模拟数据上分别增加标准差为 0.1，0.5，1.0，2.0 和 5.0 个像素单位的随机噪声误差，在每种误差数据下进行 50 次重复实验，记录每种误差下成功匹配的次数，具体实验结果如表 1～2 所示。

从实验结果中可以看出，上述特征点匹配的算法在噪声较小时能很好地保证匹配结果的可靠性，在较大的噪声环境下，仍具有一定的匹配成功率。

表 1 不同噪声下的凸包匹配成功率

噪声标准差	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
0.1	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%
1.0	100%	100%	100%	100%
2.0	98%	98%	96%	100%
5.0	46%	62%	50%	62%

表 2 不同噪声下的内点匹配成功率

噪声标准差	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
0.1	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%
1.0	100%	100%	100%	100%
2.0	100%	100%	100%	100%
5.0	93.8%	95.3%	91%	99.5%
10.0	71.8%	71.5%	65.5%	63.8%

3.2 实际图像验证

选取不同视角下拍摄的电连接器的插针图像，如图 9 所示，从图像上可以看出，插针邻域的背景纹理的相似度很高。插针在图像上表现为一椭圆形的亮斑，提取椭圆的中心作为表征插针位置的特征点，从每幅图中均提取 55 个特征点。然后提取特征点集的凸包，每幅图像中的点集凸包均由 18 个特征点组成，凸包如图 10 所示。从图中可以看出，凸包点集具有一定的旋转对称性。



图 9 多角度电连接器插针图像

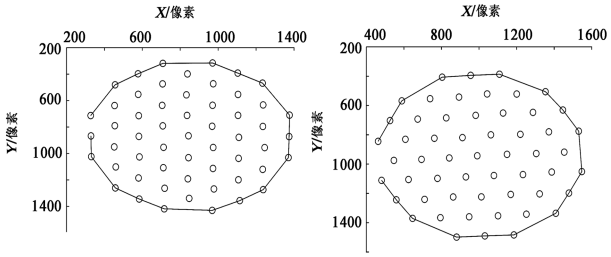


图 10 插针特征点凸包示意图

在实际的插针特征点凸包数据上，分别额外添加标准差为 0.1，0.5，1.0 和 2.0 个像素单位的随机噪声误差，在每一种误差数据下，均重复实验 50 次，统计匹配的成功率如表 3 所示。

在得到凸包匹配结果后，对剩余的 37 个内点进

行匹配实验。在采集到的插针特征点上额外增加标准差分别为 0.1,0.5,1.0,2.0 和 5.0 个像素单位的随机噪声误差,选取阈值 $T=0.125$,以图像 1 为匹配基准,在每一种噪声环境下进行 50 次重复试验,统计各图像上特征点的平均匹配成功率,结果如表 4 所示。

表 3　真实数据上添加噪声后凸包匹配成功率

噪声标准差	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5	图像 6	图像 7	图像 8
0.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	90%	100%	98%	96%	100%	100%
1.0	84%	80%	98%	98%	68%	86%	90%
2.0	56%	56%	76%	64%	42%	62%	74%

表 4　真实数据上添加噪声后内点匹配成功率

噪声标准差	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5	图像 6	图像 7	图像 8
0.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.0	99.8%	99.5%	99.8%	99.8%	97.3%	99.7%	98.8%
5.0	83.6%	81.5%	81.4%	84.1%	89.7%	88.2%	85.4%

从实验结果可以看出,本文提出的基于特征点匹配算法在添加较小随机噪声的情况下,能保持很高的匹配成功率,在随机噪声较大时,仍能保持一定的匹配成功率。因此在实际的匹配过程中,如果在特征点采集的过程中存在较大的误差,为了保证匹配结果的正确性,可以对同一图像进行多次匹配,将匹配结果中出现次数最多的匹配结果作为最终的匹配结果。

4　结论

本文针对实际电连接器插针图像中存在的重复纹理以及大角度变换的问题,提出了一种基于特征数不变量的插针特征点匹配算法,利用点集凸包在射影变换中排列顺序的不变性,解决了匹配基准点的选取问题,并通过构造参考点的方式提高了匹配算法的数值稳定性,利用相对误差降低了特征向量不同位置的数值差距对匹配结果的影响。实验结果表明,在不同图像的特征点之间存在大角度变换、相似纹理以及特征点点集近似中心对称的情况下,本文提出的算法仍能保证较高的匹配成功率,同时,在实际的电连接器插针图像上的实验也证明了该算法能满足实际检测的需求。

参考文献:

[1] 杨奋为. 航天电连接器组件的常见故障检验[J]. 机电元件, 2005, 25(3): 40-45, 52.
Yang Fengwei. Inspection on common defaults of space electrical connector[J]. Electromechanical Components, 2005, 25(3): 40-45, 52.

[2] 孙双花. 视觉测量关键技术及在自动检测中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Sun Shuanghua. Key technologies of visual measurement and applications in automatic detection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[3] 赵　键. 点模式匹配算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Zhao Jian. Research on point pattern matching algorithm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

[4] Bay H, Tuytelaars T, Van G L. SURF: Speeded up robust features[C]// Proc. of European Conf. on Computer Vision, 2006: 404-417.

[5] 吴　飞, 蔡胜渊, 郭同强, 等. 三角形约束下的图像特征点匹配方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3): 503-510.
Wu Fei, Cai Shengyuan, Guo Tongqiang, et al. Image feature points matching approach with triangle constraint[J]. J. of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(3): 503-510.

[6] 贾　棋, 高新凯, 罗钟铉, 等. 基于几何关系约束的特征点匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(8): 1388-1397.
Jia Qi, Gao Xinkai, Luo Zhongxuan, et al. Feature points matching based on geometric constraints[J]. J. of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(8): 1388-1397.

[7] Luo Zhongxuan, Zhou Xinchen, Gu Xianeng. From a projective invariant to some new properties of algebraic hypersurfaces[J]. Science China: Mathematics, 2014, 57(11): 2273-2284.

[8] Jia Qi, Fan Xin, Liu Yu, et al. Hierarchical projective invariant contexts for shape recognition [J]. Pattern Recognition, 2016, 52: 358-374.

[9] 胡文玉, 张　荣, 赵惠妍, 等. 一种基于平面六点的射影不变量构造方法[J]. 赣南师范大学学报, 2016, 37(6): 17-22.
Hu Wenyu, Zhang Rong, Zhao Huiyan, et al. The construction of projective invariants on six planar points[J]. J. of Gannan Teachers' College, 2016, 37(6): 17-22.

作者简介:

李慧鹏(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为传感器技术与先进光学仪器技术;

李　科(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为机器立体视觉与三维重构。