

# 基于多边形拟合的形状匹配与定位算法研究

白宇 张李超 史玉升 鄢然

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 基于机器视觉的加工控制过程中,对工件上待加工点的定位是关键,其难点在于构建一种形状描述方法,既要实现形状匹配,又要能完成定位,且满足加工过程中的精度和实时性要求。为解决上述问题,提出了一种基于多边形拟合的形状匹配和定位算法。该方法针对平面二维(2D)轮廓,通过对轮廓进行多边形拟合,获取轮廓上关键点,然后构建形状描述子用于形状匹配,再利用这些关键点坐标进行定位计算,获得模板轮廓到目标轮廓的变换关系。结果表明,通过运用所提出的旋转不变性形状描述算法,可获得高精度、高实时性的形状匹配和定位算法。

**关键词** 机器视觉;形状匹配;定位;多边形拟合

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.041501

## Study of Shape Matching and Localization Algorithm Based on Polygon Fitting

Bai Yu Zhang Lichao Shi Yusheng Yan Ran

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** In the control procedure of process based on machine vision, the key is the location of the special point on work piece. The difficulty lies in how to construct a shape descriptor that can meet the needs of shape matching, precision of location and real-time at the same time. To solve the problems above, a kind of shape matching and localization algorithm based on polygon fitting is proposed. The method is aimed at the planar two-dimension (2D) contour. The key points on the contour are gained by the polygon fitting processing, then the polygon is used to construct a shape description and the key points are used to make location, to obtain the transformation relationship between template contour and target contour. The results show that by using the proposed rotation invariant shape descriptor, high accuracy and good real-time performance of shape matching and location algorithm can be gained.

**Key words** machine vision; shape matching; location; polygon fitting

**OCIS codes** 150.1135; 100.5760; 100.4999

## 1 引言

为进一步扩展机器视觉在加工控制过程中的应用范围,不仅需要实现常见的识别匹配等技术,在此基础上还需要研究如何快速准确地获取待加工工件上特定点的位置信息,用于控制执行机构对工件进行更复杂的操作,如异形微小电子元件的焊锡等。

针对平面二维形状匹配问题,国内外学者进行了大量研究工作,主要可分为基于形状轮廓的全局信息描述方法和基于局部信息的描述方法。这些描述方法在区分能力和计算复杂性上各具特点<sup>[1-3]</sup>。然而,目前大多数的形状描述方法还没有考虑过定位问题。已有的所谓图像定位方法主要是通过特定情况下设计图像处理过程、提取感兴趣区域,这是一种区域定位方法,无法做到特定点的定位,如复杂背景图像中的车牌定位算法等<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2015-10-12; 收到修改稿日期: 2015-11-05; 网络出版日期: 2016-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51005090)

作者简介: 白宇(1991—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: baiyupc@163.com

导师简介: 张李超(1975—),男,博士,副教授,主要从事机器视觉方面的研究。

E-mail: elegantteac@263.net(通信联系人)

要实现精确定位,一种方法是获取模板件形状和目标件形状的位置变换关系,通过原始点的坐标和变换关系,即可求出目标点的坐标。有学者<sup>[5-7]</sup>采用了这种方法并提出基于尺度不变特征变换(SIFT)算法的图像目标匹配与定位方法,但SIFT算法误匹配点多,处理速度慢,采用随机方法去除错误点,导致其定位精度不稳定,且在简洁图像画面中有效匹配点极少,并不适宜工业应用。顾国庆等<sup>[8]</sup>提出一种计算轮廓上点的曲率极大值处作为角点进行匹配和定位,该方法要计算轮廓上所有点的曲率,因此对大尺寸图像计算速度缓慢。

本文提出一种基于多边形拟合的平面二维形状匹配和定位算法,该方法通过对轮廓进行多边形拟合,然后采用成对几何直方图统计多边形轮廓信息获取形状描述子,通过相似度计算进行形状匹配,再根据形状多边形轮廓匹配顶点对,计算模板形状与目标形状的变换关系,从而获取目标形状上特定点的位置。

## 2 基于多边形拟合算法的形状匹配方法

本文设计的形状匹配方法过程如下:1)利用改进后的经典Douglas-Peucker多边形拟合算法<sup>[9]</sup>,获取轮廓上关键点信息;2)利用成对几何直方图统计多边形关键信息形成轮廓描述子,结果与顶点顺序无关;3)计算模板轮廓与目标轮廓的成对几何直方图相似度,根据相似度判定是否匹配成功。

### 2.1 改进的Douglas-Peucker多边形拟合算法

多边形拟合算法是一种常用的轮廓简化方法,可提取轮廓关键信息。由于多边形数据量少,仅包含顶点坐标,在对实时性要求较高的匹配系统中具有优势。本文提出的匹配和定位算法要求模板轮廓和目标轮廓多边形的顶点数相等,而Douglas-Peucker多边形拟合算法通过改进能够实现顶点数目可控,所以选择该算法进行多边形拟合。

经典的Douglas-Peucker算法流程如图1所示,根据当前多边形到原始轮廓上最远点的距离与阈值 $K$ 比较来判断算法是否结束。由于要多次遍历轮廓上所有的点计算距离, $K$ 越小,遍历次数越多,耗时越长。若轮廓上点数为 $n$ ,仅第一步求轮廓上最远两点的时间复杂度就达 $O(n^2)$ 。另外,该算法结束的条件是根据距离限制阈值判断的,这种方法在形状发生缩放变换时,所生成的多边形顶点数不一致。

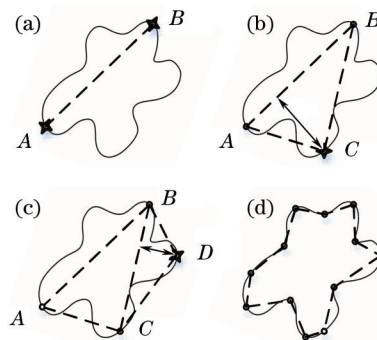


图1 经典的Douglas-Peucker多边形拟合例图

Fig.1 Illustration of classic Douglas-Peucker polygon fitting algorithm

为提高多边形拟合的效率和满足多边形顶点数的可控,改进了Douglas-Peucker算法。1)修改第一组顶点搜索方法,任意选取轮廓上一点 $B$ ,一般选取所记录的轮廓起点,即从图像左上角向右下角搜索到的第一个点,然后搜索距离 $B$ 点最远点 $A$ ,再搜索距离 $A$ 点最远点 $A_1$ ,若 $A_1$ 与 $B$ 点重合,则取 $AB$ 为第一组顶点,否则继续搜索距离 $A_1$ 点最远点,直到获得互为最远点的一组点,这样可以快速定位轮廓上一组顶点。2)修改算法终止条件为检测多边形顶点数是否达标,可保证算法对模板轮廓和目标轮廓拟合过程中获取顶点数的一致性。改进后,搜索轮廓上第一组顶点的时间复杂度减小为 $O(n^{2-3})$ ,算法效率大幅度提升,且多边形顶点数量可控,符合形状描述子的一致性要求。具体工作流程如图2所示。

### 2.2 基于成对几何直方图的形状描述子设计

采用Evans等<sup>[10]</sup>提出的成对几何直方图(PGH)来统计多边形轮廓特征,该方法运算量小,与多边形拟合过程中顶点顺序无关,且具有良好的旋转不变性和尺度不变性,可实现快速准确匹配。

成对几何直方图是一种二维直方图,垂直坐标轴表示对边夹角 $\theta$ ,水平坐标轴表示距离比例 $v = d_{\min}/d_{\max}$ 。对于每一对边,在计算出的 $\theta_i$ 与 $v_j$ 所在范围对应的方格处高度加1。

### 2.3 形状描述子的相似度计算

采用巴氏距离<sup>[11]</sup>计算模板轮廓直方图  $h_Q$  和目标轮廓的成对几何直方图  $h_D$  的差, 二维直方图巴氏距离计算方法为

$$B(Q, D) = -\ln \sum_i \sum_j \sqrt{h_Q(\theta_i, v_j) \times h_D(\theta_i, v_j)}, \quad (1)$$

式中  $h_Q(\theta_i, v_j)$  为  $h_Q$  在  $\theta_i$  与  $v_j$  处的方块高度,  $h_D(\theta_i, v_j)$  为  $h_D$  在  $\theta_i$  与  $v_j$  处的方块高度。

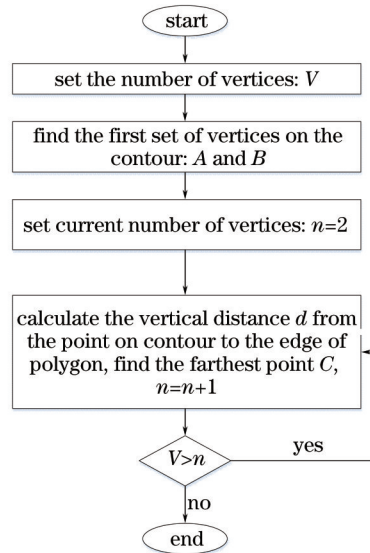


图2 改进后的多边形拟合算法流程图

Fig.2 Flow-process diagram of improved polygon fitting algorithm

巴氏距离  $B(Q, D)$  越小,  $h_Q$  与  $h_D$  相似程度越高, 模板轮廓与目标轮廓匹配程度越高。该成对几何直方图的描述方法具有旋转、缩放不变性, 且计算简便, 能够满足本文形状匹配算法对形状描述方法的要求。

## 3 形状轮廓的定位算法设计

### 3.1 匹配顶点对的获取

要利用模板轮廓和目标轮廓多边形顶点组合来获得变换关系, 需三组以上由模板多边形和目标多边形的相同位置顶点所组成的点对。为此, 提出了具有稳健性的多边形拟合过程中排序生成顶点的算法。

具体排序方法如图3所示, 从多边形拟合过程中生成的第三点(图5中C点)开始沿顺时针或逆时针方向排列, 由此可获得稳定的顶点顺序。当形状发生旋转后, 生成的第一组  $AB$  点相对位置改变, 不能作为起点开始排序, 而从第三点开始的生成顺序是稳定的, 可由此开始排序, 从而生成顺序一致的顶点序列。

该方法生成的顶点顺序对旋转具有不变性, 经排序后, 可按顶点序列的顺序地提取顶点组合进行定位计算。

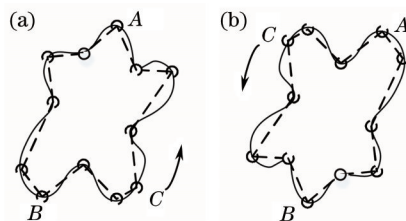


图3 顶点排序示意图

Fig.3 Diagram of vertex ranking

### 3.2 最佳仿射变换矩阵的计算方法

根据平面仿射变换原理, 模板形状与目标形状之间存在旋转和平移的变换关系, 可利用这一变换关系, 进行目标定位<sup>[12]</sup>。图像间只有旋转、平移和比例变化时, 图像间的变换关系可以由一个仿射模型来描述, 本文采用四参数仿射模型来计算仿射变换的参数, 具体仿射变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s \cdot \cos \alpha & -s \cdot \sin \alpha & t_x \\ s \cdot \sin \alpha & s \cdot \cos \alpha & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $s$  为尺度变换因子,  $\alpha$  为旋转角度,  $t_x$  和  $t_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的平移量。点  $P(x_p, y_p)$  到点  $Q(x_q, y_q)$  的关系为

$$\begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从理论上讲,任意选取3组匹配点对即可求出仿射变换矩阵。但由于在模板轮廓和目标轮廓在多边形拟合过程中顶点选取位置的偏差,所求出仿射变换矩阵并不能满足大部分匹配点对之间的变换关系。

因此,为求解最佳的仿射变换矩阵,设计算法流程如图4所示,设模板轮廓多边形顶点集合为  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , 目标轮廓多边形顶点集合为  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , 配对顶点集合为  $T = \{\{p_1, q_1\}, \{p_2, q_2\}, \dots, \{p_n, q_n\}\}$ , 由于多边形顶点数量有限,拟采用穷举法,从  $T$  中选出3个,并将所有可能的组合组成集合  $Q$ , 计算每个组合  $Q_i$  的变换矩阵  $M_i$ , 再进行投票处理,求  $P$  中所有点  $p_j$  经  $M_i$  变换后的点  $s_j$  与  $q_j$  的距离  $d_j$ , 设置距离阈值  $D$ , 若  $d_j < D$ , 票数  $N_i$  增加1, 所有组合计算完成后,选取其中  $N_i$  值最大的矩阵为最佳仿射变换矩阵  $M_{\text{best}}$ 。

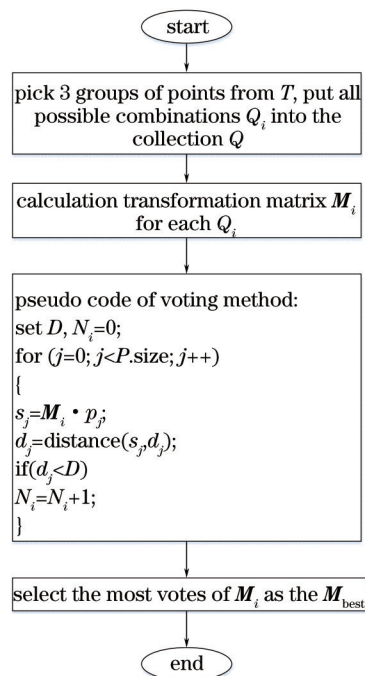


图4 最佳变换矩阵求解流程图

Fig.4 Flow-process diagram of solving optimal transformation matrix

求解出最佳仿射变换矩阵  $M_{\text{best}}$  后,可根据(3)式,由模板形状上一点的坐标,求解出目标形状上对应点的坐标。

## 4 实验结果

实验选用某品牌智能手表内部微小电路板形状,图片规格为  $4000 \text{ pixel} \times 3000 \text{ pixel}$ ,如图5所示。主要研究内容是轮廓匹配和定位算法路线的探究,为单纯测试该算法精度,不受轮廓提取预处理过程影响,故直



图5 电路板模板形状

Fig.5 Template shape of circuit board

接采用绘制的二值图作为测试用例图,对本文算法进行验证和测试。实际应用过程中需根据零件特点选取合适背板和光源来辅助图像采集,可获得较好的成像效果。

#### 4.1 形状匹配算法性能测试

根据实际需要,焊锡要求形状匹配过程具有旋转不变性,才能保证焊锡件的摆放位置不受限制,无需专门夹具夹持,极大降低了加工成本和柔性。

为此,将模板形状旋转6种不同大小的角度,作为一组目标轮廓,如图6所示,然后进行匹配,计算出模板轮廓与目标轮廓的成对几何直方图的巴氏距离。

另外,将模板形状进行修改,作为第二组目标轮廓,如图7所示,并进行匹配,测试错误形状与模板形状的巴氏距离,并与旋转测试进行对比。

由表1可以看出,随着旋转角度的增加,成对几何直方图的巴氏距离基本稳定在0~0.1之间,表明本文提出的形状描述子具有旋转不变性。如表2所示,错误形状的成对几何直方图的巴氏距离远远大于正确形状的结果,可采用阈值法判断匹配与否。

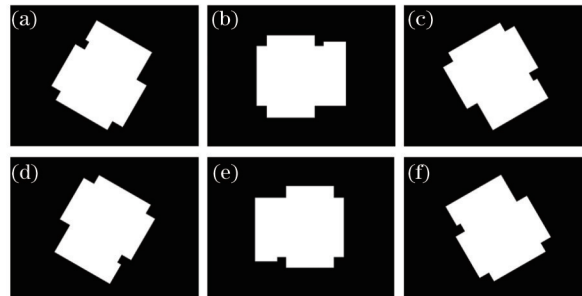


图6 旋转形状

Fig.6 Rotational shape

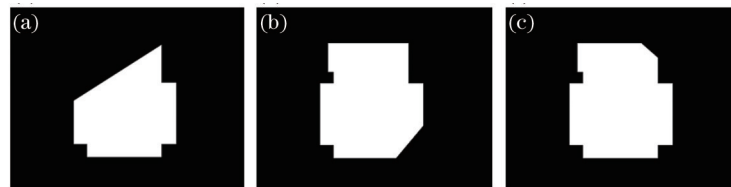


图7 错误形状

Fig.7 Error shape

表1 旋转形状与模板形状的巴氏距离

Table 1 Bhattacharyya distance between rotational shape and template shape

Angle /( $^{\circ}$ )	30	90	150	210	270	330
Bhattacharyya distance	0.09	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00

表2 错误形状与模板形状的巴氏距离

Table 2 Bhattacharyya distance between error shape and template shape

Error shape	图9(a)	图9(b)	图9(c)
Bhattacharyya distance	56.26	54.02	45.57

#### 4.2 定位算法的性能测试

利用3.1节中获取的6种目标轮廓多边形,进行顶点排序,获取匹配顶点组合,然后计算最佳仿射变换矩阵,最后从模板形状中选取特定点坐标,根据变换矩阵计算出对应点的坐标,并与实际点坐标对比,计算定位误差。

由表3[模板上点坐标(2310, 1653),多次测量求均值]可以看出,定位算法的定位精度不低于3 pixel,且对旋转变换具有稳定性,实际精度还要考虑摄像机视场大小,如要求定位精度不低于0.1 mm,可将视场定为133.33 mm $\times$ 100 mm,可满足要求。SIFT算法<sup>[6-7]</sup>定位过程会产生大量误匹配点,因此会导致定位精度不稳定。

表3 定位算法精度测试结果(单位:像素)

Table 3 Accuracy test results of location algorithm (unit: pixel)

Angle /( $^{\circ}$ )	Calculated coordinates	Actual coordinates	Error
30	(2200.21,1793.51)	(2201,1794)	0.93
90	(1859.59,1835.78)	(1859,1837)	1.35
150	(1607.13,1569.51)	(1608,1569)	1.01
210	(1740.29,1251.44)	(1738,1253)	2.77
270	(2098.66,1182.67)	(2098,1183)	0.73
330	(2332.07,1476.35)	(2334,1475)	2.36

### 4.3 匹配与定位算法的效率测试

如表4(运算20次求平均值)所示,通过比较本文算法的计算消耗时间与基于OpenCV实现SIFT匹配算法的计算消耗时间,由于SIFT匹配过程需要的匹配点较多,其中误匹配点也多,消除误匹配点耗时长,所以总匹配定位耗时更长,可明显看出本文匹配算法在时间效率方面的性能更优异,且本文算法定位过程耗时极短,平均10 ms,因此本文匹配与定位算法效率更高。

表4 匹配与定位算法的效率对比结果(测试环境:Inter Core i3 2.4 GHz)

Table 4 Contrast results of efficiency between matching and localization algorithm (Test environment: Inter Core i3 2.4 GHz)

Picture specification	Algorithm category	Total points	Effective points	Time/ ms
640 pixel×480 pixel	SIFT	248	25	780
	proposed	14	14	47
2000 pixel×1500 pixel	SIFT	332	48	3564
	proposed	14	14	221

## 5 结 论

研究了一种基于多边形拟合的平面二维形状轮廓匹配和精确定位算法。采用实验用简单形状的二值图进行测试,结果表明,所提出的形状描述子在对平面二维轮廓的描述具有旋转不变性,形状匹配结果准确;定位算法精度不低于3 pixel,对比SIFT算法,计算效率更高,相同大小的图像耗时缩短到1/16,适用于对实时性和精度要求较高的应用场景。

采用该方法前,准确提取图像边缘轮廓是关键。由于实验采用的是非实际摄像机拍摄的图像,图像轮廓非常清晰,而在实际工业加工过程中,图像质量可能达不到实验所使用图像的质量。因此,如何准确提取图像边缘轮廓是未来的研究内容。

### 参 考 文 献

- Zhou Yu, Liu Juntao, Bai Xiang. Research and perspective on shape matching[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 889-910.  
周 瑜, 刘俊涛, 白 翔. 形状匹配方法研究与展望[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 889-910.
- Ding Xianfeng, Wu Hong, Zhang Hongjiang, *et al.*. Review on shape matching[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(5): 678-694.  
丁险峰, 吴 洪, 张宏江, 等. 形状匹配综述[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 678-694.
- Wang Junwei. Research on shape contour analysis and matching based on combined global and local information[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.  
王军伟. 融合全局与局部信息的形状轮廓特征分析与匹配[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- Liu Meng, Wu Chengdong, Wang Li, *et al.*. License plate position algorithm in complicated scenes[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(9): 1357-1362.  
刘 濛, 吴成东, 王 力, 等. 复杂背景图像中的车牌定位算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(9): 1357-1362.
- Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- Fu Weiping, Qin Chuan, Liu Jia, *et al.*. Matching and location of image object based on SIFT algorithm[J]. Chinese

- Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 163–169.
- 傅卫平, 秦川, 刘佳, 等. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 163–169.
- 7 Hou Yimin, Sui Wenxiu, Sun Xiaoxue. SIFT feature dimension reduction method and its application in image retrieval [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s108002.
- 侯一民, 隋文秀, 孙晓雪. SIFT 特征降维方法及其在图像检索中的应用[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s108002.
- 8 Gu Guoqing, Bai Ruilin, Du Bin. Geometry shape position based on point feature matching[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2011, 10(2): 140–144.
- 顾国庆, 白瑞林, 杜斌. 基于角点匹配的几何形状定位[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2011, 10(2): 140–144.
- 9 Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- 10 Evans A, Thacker N A, Mayhew J E W. The use of geometric histograms for model-based object recognition[C]. BMVC, 1993, 93: 429–438.
- 11 Huet B, Hancock E R. Relational histograms for shape indexing[C]. Sixth International Conference on Computer Vision, 1998: 563569.
- 12 Yang Liu, Guo Baolong, Li Leida, *et al.*. Research on evaluation of affine parameter estimation using image feature points[J]. Computer Science, 2009, 36(6): 279–281.
- 杨 镠, 郭宝龙, 李雷达, 等. 基于图像几何特征点的仿射参数估计算法研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 279–281.

栏目编辑: 苏 岑