

基于Zernike矩的图像边缘轮廓提取与处理模型

毛银杰¹, 鲁映杰², 黎夏², 李田丰¹, 易映萍¹

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2021年12月13日; 录用日期: 2022年1月19日; 发布日期: 2022年1月26日

摘要

亚像素算法是提高图像处理精度的算法之一。本文基于图像的亚像素处理, 采用亚像素边缘轮廓提取方法——Zernike矩提取图像轮廓的边缘, 并利用低通滤波优化边缘处理。同时本文采用基于Douglas-Peucker算法的多线拟合方法, 计算和分析图像边缘轮廓的特征, 对不同轮廓的边缘进行分割, 计算各截面轮廓像素的长度和轮廓像素的总长度, 通过对图像进行相机标定、图像畸变处理, 计算出图像的实际标定距离, 建立了基于亚像素的图像边缘轮廓提取与处理的模型。

关键词

亚像素, Zernike矩, 多元线性拟合, 相机畸变校正, 图像处理

Edge Contour Extraction and Process Based on Zernike Moment Summary

Yinjie Mao¹, Yingjie Lu², Xia Li², Tianfeng Li¹, Yingping Yi¹

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 13th, 2021; accepted: Jan. 19th, 2022; published: Jan. 26th, 2022

Abstract

The subpixel algorithm is one of the methods to improve the precision of the image processing program. This paper is based on image subpixel processing, extracting the edge of the image con-

tour by one of the subpixel edge contour extract methods called Zernike moment. A low pass filter is used to optimize edge processing. Using the multiple line fitting method based on the Douglas-Peucker algorithm, this paper calculated and analyzed the characteristics of the image edge contour, segmented the edge of different contours. Segment the edges of different contours, the length of each section contour pixel and the total length of contour pixel are calculated, and the image is calculated by camera calibration and image distortion processing. The model of image contour extraction and processing based on subpixel is established.

Keywords

Sub-Pixel, Zernike Moment, Multiple Linear Fitting, Camera Distortion Correction, Picture Processing

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现如今，机器视觉系统广泛应用于产品的识别、验证、缺陷检测等方面。在工业生产中，我们需要分析大量的图片，提取物体的各种信息，如轮廓特征的实际尺寸等。

在图像信息提取的过程中，最重要的工作之一就是图像边缘轮廓信息的提取，随着工业制造的发展，人们对各种产品的精度和精度要求越来越高，这使得图像边缘提取的精度需求也越来越高。传统算法使用 Sobel 和 Canny 等几种算子来检测图像的边缘轮廓[1]。然而，随着边缘轮廓检测技术的发展，对图像边缘的精度提出了更高的要求。考虑到价格和效率，对于硬件上提高相机的清晰度进而提高拍摄图片的分辨率的方案成本太高，于是人们从软件入手，提出了亚像素算法来提高边缘轮廓的精度，将一个像素的精度从整数精度提高到浮点精度。

基于较高的精度和更多的边缘信息，通过坐标信息提取每个轮廓的几何特征，可以获得更准确的图像大小和比例信息。本文在亚像素边缘提取的基础上，设计了不同边缘信息提取算法，建立了关于图像边缘信息提取的模型。

本文对如下图 1 所示的三幅图片进行了边缘的提取和分析，详细分析了模型的流程，模型的算法流程如图 2 所示。

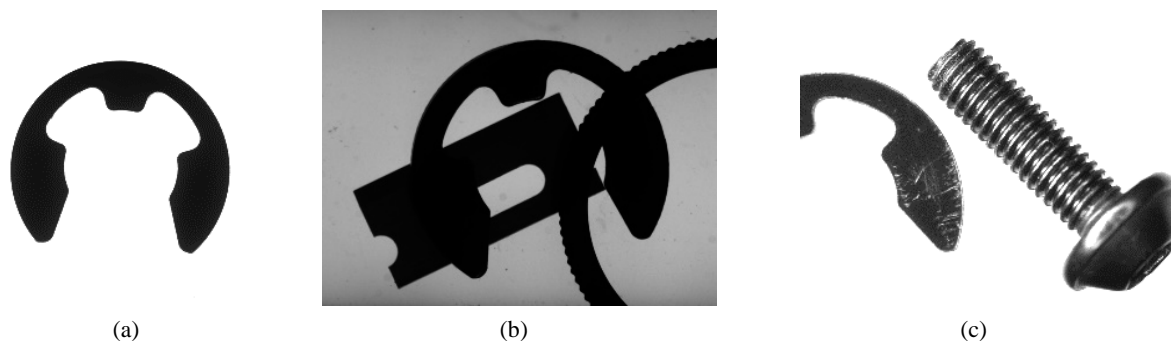


Figure 1. Images to be processed
图 1. 待处理图像

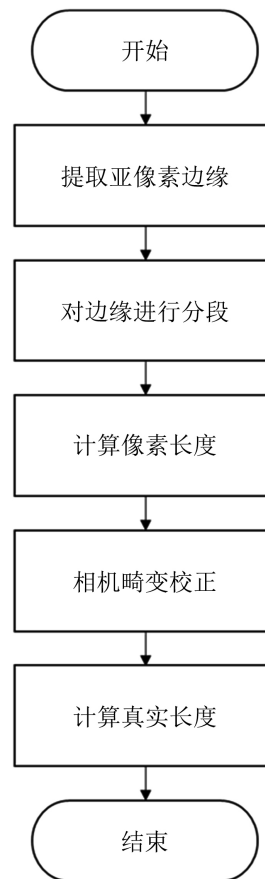


Figure 2. Algorithm flow
图 2. 算法流程图

2. 基于 Zernike 矩的图像边缘提取方法

2.1. Zernike 矩

矩量法是一种卷积积分法，具有较强的抗噪声干扰能力。它对乘法噪声和加法噪声都不敏感。矩的方法有空间矩、灰色矩和 Zernike 矩。Zernike 矩具有正交性，计算效率高[2]，因此本文选择亚像素法的 Zernike 矩来检测图像的边缘轮廓。

定义连续图像的第 n 行第 m 列的 Zernike 矩如公式(1)所示。

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2=1} f(x,y) * V_{nm}^*(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (1)$$

当像素为离散时，定义数字图像的 Zernike 矩为公式(2)。

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x,y) * V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad (2)$$

其中：

m, n 是两个整数， $n \geq 0$ ， $n - |m|$ 是偶数；

ρ 为图像边缘的位置， $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ ；

θ 为 x 轴与 ρ 的夹角；

V_{nm} 是一个积分函数, $V_{nm}^*(\rho, \theta)$ 是它的复共轭。

旋转不变性是 Zernike 矩的特征之一, 图 3 中图 3(a) 图是理想边缘轮廓的模型。利用旋转不变原理, 边缘轮廓在旋转一定角度之后其对应的值大小不变, 于是如图 4 所示, 将理想边缘轮廓模型旋转至与 y 轴平行, 从而求出的 4 个主要参数[3], 即图 3(a) 中的 l, h, k 和倾斜角度 ϕ , 体计算公式如式(3)所示。

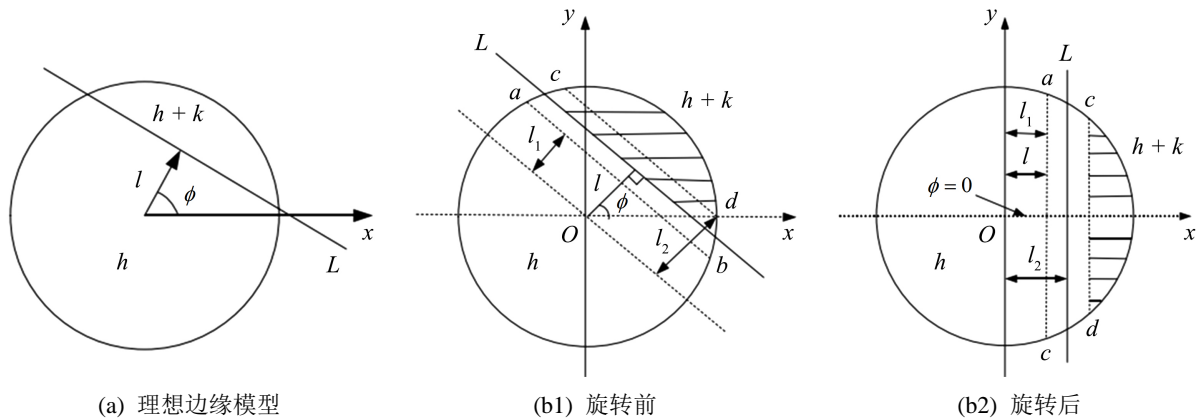


Figure 3. Invariant principle of roatation
图 3. 旋转不变原理

$$\begin{cases} h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl(\sqrt{1-l^2})}{\pi} \\ k = \frac{3Z_{11}^*}{2(1-l^2)^{3/2}} = \frac{3Z_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}} e^{j\phi l} \\ \phi_{n1} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}[Z_{n1}]}{\text{Re}[Z_{n1}]} \right] (n=1,3) \\ l = \frac{Z_{20}}{Z_{11}^*} = \frac{Z_{20}}{Z_{11}} e^{-j\phi} \end{cases} \quad (3)$$

通过以上参数便可以对图像边缘进行定位, 同时, 因为 zernike 模板具有 $N \times N$ 的放大效应, 模板越大定位数据越精确[2], 放大后的边缘坐标变化如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{N}{2} \cdot l \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

本文采用 7×7 的模板进行放大[2], 令每一个 Zernike 矩 Z_{nm} 对应的模板为 M_{nm} , M_{nm} 的值可由如下式(5)和式(6)求出[4], 其具体值分别如表 1, 表 2, 表 3 所示。

$$M_{nm} = \iint_{x^2+y^2=1} V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (5)$$

计算 M_{nm-ij} 的公式为式(6)。

$$M_{nm-ij} = \iint_{\sigma_{ij}=Q-S_{ij}} V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (6)$$

Table 1. The value of template M_{00}
表 1. 模板 M_{00} 的值

$M_{00} (7 \times 7)$						
0.0000	-0.0150	-0.0190	0.0000	0.0190	0.0150	0.0000
-0.0224	-0.0466	-0.0233	0.0000	0.0233	0.0466	0.0224
-0.0573	-0.0466	-0.0233	0.0000	0.0233	0.0466	0.0573
-0.0690	-0.0466	-0.0233	0.0000	0.0233	0.0466	0.0690
-0.0573	-0.0466	-0.0233	0.0000	0.0233	0.0466	0.0573
-0.0224	-0.0466	-0.0233	0.0000	0.0233	0.0466	0.0224
0.0000	-0.0150	-0.0190	0.0000	0.0190	0.0150	0.0000

Table 2. The value of template M_{11}
表 2. 模板 M_{11} 的值

$M_{11} (7 \times 7)$						
0.0000	-0.0224	-0.0573	-0.0690	-0.0573	-0.0224	0.0000
-0.0150	-0.0466	-0.0466	-0.0466	-0.0466	-0.0466	-0.0150
-0.0190	-0.0233	-0.0233	-0.0233	-0.0233	-0.0233	-0.0190
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0190	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0190
0.0150	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0150
0.0000	0.0224	0.0573	0.0690	0.0573	0.0224	0.0000

Table 3. The value of template M_{20}
表 3. 模板 M_{20} 的值

$M_{20} (7 \times 7)$						
0.0000	0.0225	0.0394	0.0396	0.0394	0.0225	0.0000
0.0225	0.0271	-0.0128	-0.0261	-0.0128	0.0271	0.0225
0.0394	-0.0128	-0.0528	-0.0661	-0.0528	-0.0128	0.0394
0.0396	-0.0261	-0.0661	-0.0794	-0.0661	-0.0261	0.0396
0.0394	-0.0128	-0.0528	-0.0661	-0.0528	-0.0128	0.0394
0.0225	0.0271	-0.0128	-0.0261	-0.0128	0.0271	0.0225
0.0000	0.0225	0.0394	0.0396	0.0394	0.0225	0.0000

2.2. 边缘提取结果

用 Zernike 矩对三幅图进行亚像素边缘提取并输出边缘坐标，效果如图 4 所示。

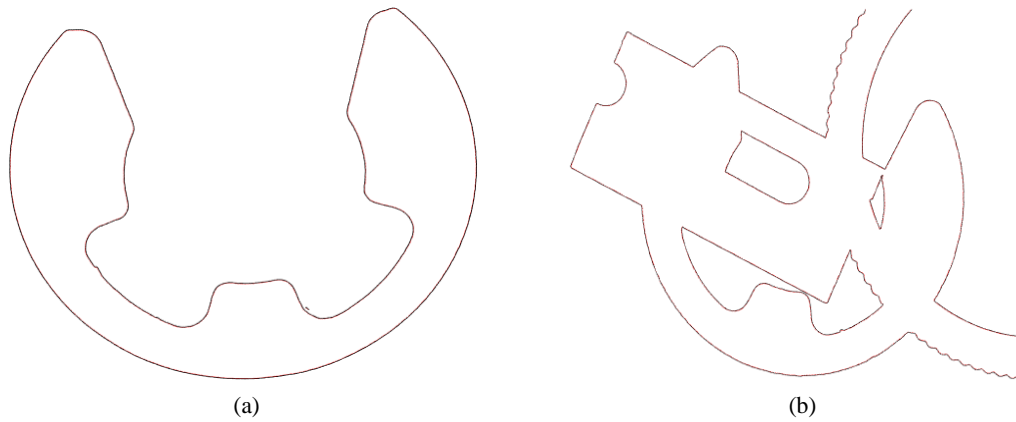


Figure 4. The effect of subpixel edge extraction
图 4. 亚像素边缘提取效果

图 4(a)中边缘的部分坐标如表 4 所示。

Table 4. Partial edge's coordination data of Figure 4(a)
表 4. 图 4(a)的部分边缘坐标数据

图 4(a)的部分边缘坐标数据							
468	469	470	471	472	473	474	475
726.216	726.8393	727.3117	727.6055	727.7776	727.8362	727.8364	727.8262
476	477	478	479	480	481	482	483
727.8212	727.8387	727.8668	727.9012	727.9427	727.9871	728.0246	728.0496
504	504	505	505	506	506	507	507
242.9244	724.0868	242.0349	723.5434	241.1839	722.933	240.3783	399.9686
621	622	622	623	623	624	624	625
248.9405	175.9789	248.4598	175.6524	247.9509	175.3313	247.4707	175.0192

从表 4 可知，所有坐标的精度从整数提高到小数点后 4 位，说明 Zernike 矩亚像素边缘检测是有效的。

对于图，为了改善亚像素边缘检测效果，通过低通滤波来过滤一处理后的图像如图 5 所示。

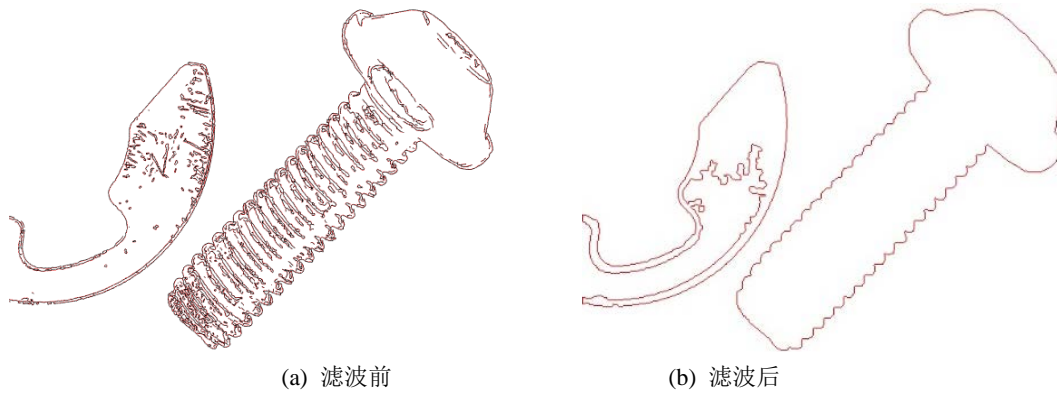


Figure 5. Image comparison before and after low-pass filtering
图 5. 低通滤波处理前后的图像对比

3. 基于 Douglas-Peucker 算法的边缘轮廓分析方法

3.1. 算法设计

Douglas-Peucker 算法可以将一条曲线拟合为一系列的点，该算法的基本思想流程是[10]:

- 1) 在曲线的起点和终点之间形成一条直线。
- 2) 选择与阈值比较的最大点，如果它大于阈值，则保留该点，或者删除该行中的所有点[5]。
- 3) 根据保留点重复步骤 1 和步骤 2，直到无法删除点为止。
- 4) 完成直线曲线的简化。

该步骤如图 6 所示。

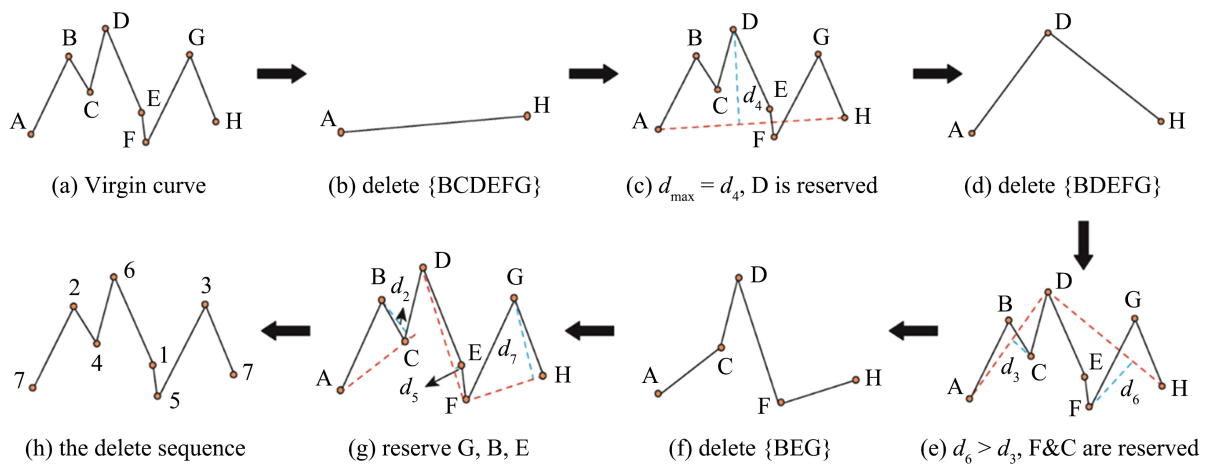


Figure 6. The flow of Douglas-Peucker Algorithm
图 6. Douglas-Peucker 算法流程

将提取得到的边缘通过 Douglas-Peucker 算法拟合成多条直线段，并分析这些直线的斜率、斜率的一阶导数、斜率的二阶导数等特征。

直线的斜率在所有点上都是相同的，圆的斜率在各处都是变化的，分析数据表明在 Douglas-Peucker 算法拟合直线后，可以近似地认为圆的斜率的一阶导数是常数，斜率的二阶导数是 0。由于椭圆的斜率的三阶导数不为 0，因此可以通过分析其斜率和导数来判断其形状。具体算法流程如图 7 所示。

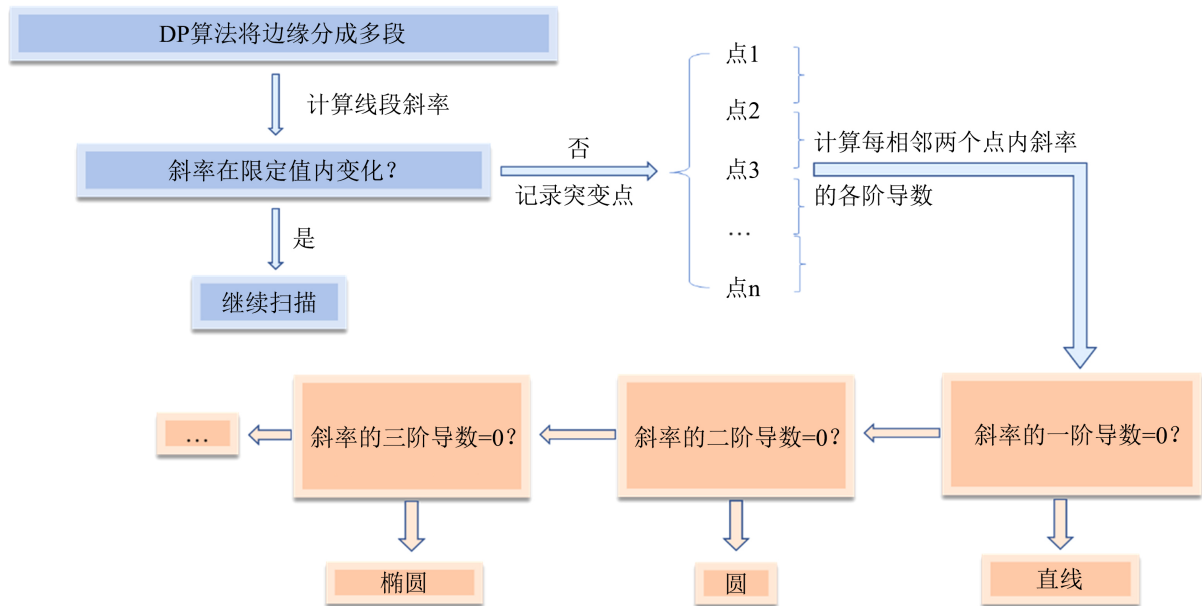


Figure 7. Segmentation algorithm flow
图 7. 分段算法流程

使用 Douglas-Peucker 算法时，阈值参数限制拟合线的拟合程度，选择不同的阈值的数值：[10 100 7040251]，适合不同的结果，不同的阈值结果如图 8 所示。

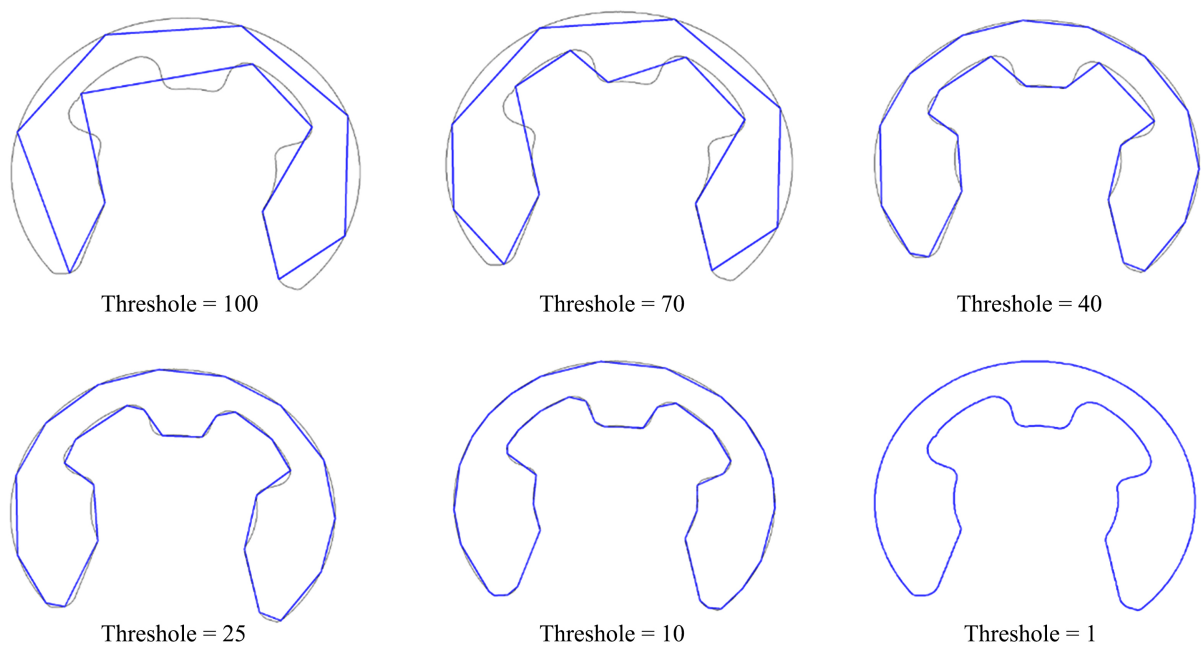


Figure 8. Different effects when use different threshold in DP algorithm
图 8. DP 算法不同阈值的拟合效果

图中深色线段为 DP 算法拟合出的多段线段，浅色为提取的边缘，当阈值为 1 时，拟合的线段与边缘几乎完全重合，故本文阈值确定为 1。

3.2. 边缘分段算法实现效果

以图 4(a)和图 4(b)所提取的边缘为例，对边缘进行拟合，对所有拟合线段进行处理，得到表 5 和表 6 所示的部分分段点。

Table 5. Partial segment points of picture (a) in Figure 4

表 5. 图 4(a)的部分分段点

图 4(a)的部分分段点					
136.9731	157.4272	104.7405	713.9076	1235	296.0398
119.1518	160.2593	104.5077	776.0825	1181.041	295.6419
105.9134	183.9904	137.9984	801.0283	1182.268	245.0671
114.0397	249.9153	1143.024	803.504	1182.428	185.9378
102.0103	293.315	1181.557	776.937	1151.001	158.9711
42.90871	294.7153	1177.089	711.8411	273	155.8409
19.56276	317.1579	1183.024	666.585	272.0001	155.8406

Table 6. Partial segment points of picture (b) in Figure 4

表 6. 图 4(b)的部分分段点

图 4(b)的部分分段点					
884.496	972.9	214.754	850.7	1301.456	89.3
248.632	918.85	162.634	742.6	806.316	831.9
775.044	667.4	97.484	599.25	808.922	813.1
553.534	773.15	287.722	502.9	798.498	799
420.628	836.6	1004.372	199.75	782.862	730.85

根据这些线段点数据，可以描述不同的分段，结果如图 9 所示。

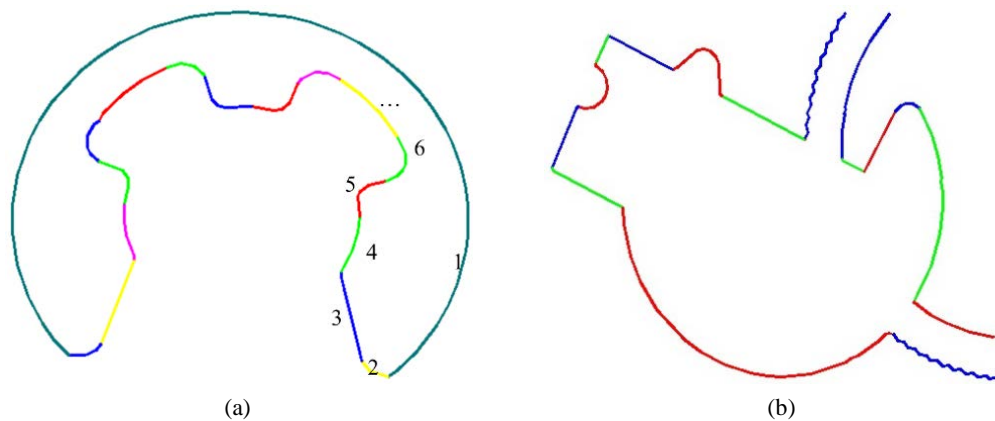


Figure 9. The segmentation results of Figure 4(a) and Figure 4(b)

图 9. 图 4(a)和图 4(b)的分段结果

4. 对每个分段的处理和数据获取

4.1. 分段长度

4.1.1. 像素长度计算

边缘提取时获得了所有边缘点的坐标，在对边缘进行拟合时也输出了每条线段的起点和终点的坐标信息，将某一分段的所有拟合线段长度做和即可得出分段对应的像素长度，以图一分段为例，部分分段的长度如表 7 所示。

Table 7. Partial pixel length of the segment
表 7. 部分分段的像素长度

总分段数		20
总像素长度		3214.31060174027
分段 1	长度	1600.24415
分段 2	长度	59.21667293
分段 3	长度	142.5697411
分段 4	长度	31.01201828
分段 5	长度	88.76139684
分段 6	长度	77.51523689
.....

4.1.2. 真实长度计算

拍摄测量图像时，将矩阵校准板放置在图像的另一水平高度上。定标板上的网点直径为 1 mm，两点之间的中心距离为 2 mm。使用 3 个不同倾角的校准板来计算图像边缘轮廓拟合曲线段的实际长度。校准板如图 10 所示。

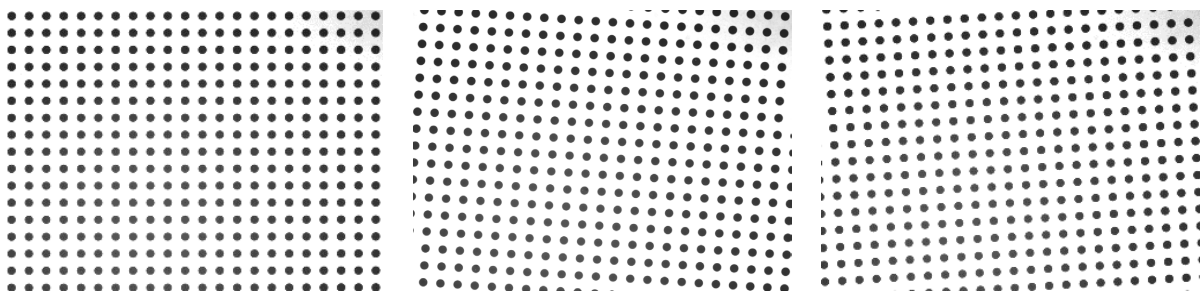


Figure 10. Calibration palte
图 10. 标定板

本文通过图 10 中的三个标定板对相机畸变进行校正

- 图片校正

由于相机镜头通常为凸透镜或凹凸镜，其表面不是平的，所以拍摄的相机会产生如图 11 所示的径向畸变[6] [7] [8]。

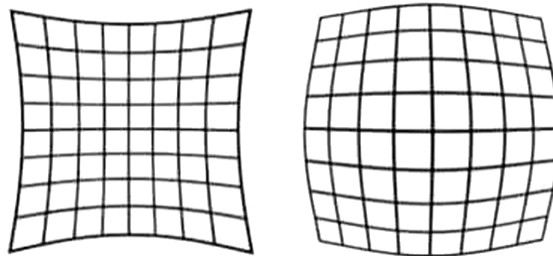


Figure 11. The radial distortion of the camera
图 11. 相机径向畸变

而且由于相机内部装配误差，镜头不能与成像平面平行，会引起切向畸变。对于切向畸变，使用了与中心距离相关的多项式函数，如公式(7)和公式(8)对其进行校正。

$$x_{distorted} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \tag{7}$$

$$y_{distorted} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \tag{8}$$

用另外两个公式来修正切向失真。

$$x_{distorted} = x + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \tag{9}$$

$$y_{distorted} = y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \tag{10}$$

将这两组校正函数结合起来，得到总的校正函数

$$x_{distorted} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + x + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \tag{11}$$

$$y_{distorted} = y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy + y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \tag{12}$$

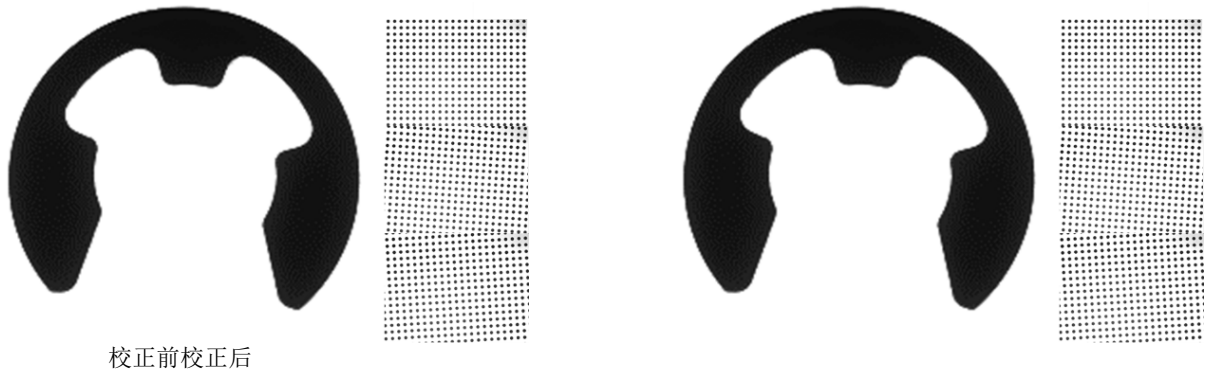
最后得到 5 个失真参数： $distortion\text{-}para = (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ [9]，一般情况下的失真参数由文献 1 给出[9]，通过该参数可以对图片进行修正具体值如下：

$distortion\text{-}para :$

$$[-8.5468148e, -017.14949304e + 02, -1.25146655e - 03, -1.02729442e - 0, 28.11144551e - 01]$$

• 实现效果

以图 1(a)图为例，使用畸变参数以及三个校准板对畸变进行校正，结果如图 12 所示。



校正前校正后

Figure 12. Camera distortion correction
图 12. 相机畸变校正

选择 4 个标定板上的圆，计算其像素长度，并计算其与实际长度的比值，单位像素点长度比例如表 8 所示。

Table 8. The proportion of unit pixel

表 8. 单位像素点长度比例

1	0.06737651
2	0.065961852
3	0.06737651
4	0.064996867
5	0.067980412
6	0.06737651

平均值为 0.066844777。

通过比例求得边缘的实际长度如表 9 所示。

Table 9. The true length of the segment (mm)

表 9. 部分分段的实际长度(mm)

分段	长度(mm)
总分段长度	299.98
分段 1	168.14
分段 2	29.45
分段 3	21.54
分段 4	22.13
分段 5	29.36
分段 6	29.33

5. 结论

本文根据亚像素边缘提取算法，使用经典 BP 算法和低通滤波优化以及图片标定校正，结合基础几何图形的特性，提出了一种对图像边缘进行分段的算法，建立了一个分析图像边缘特征的模型，实用性好，可应用范围广。

参考文献

- [1] Zhang, Z.Y. (1999) Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, Kerkyra, 20-27 September 1999, 666-673. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.791289>
- [2] 张美静. 亚像素边缘检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- [3] 王蓉, 闫浩文, 陆小敏. Douglas-Peucker 算法全自动化的多尺度空间相似关系方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1767-1777.

- [4] Gao, S.Y., Zhao, M.Y., Zhang, L., *et al.* (2008) Image Subpixel Edge Detection Algorithm Based on Zernike Orthogonal Moments. *Acta Automatica Sinica*, **34**, 1163-1168. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2008.01163>
- [5] 王福斌, 陈波, 沈小伟. 基于 Halcon 的单目相机标定案例实现[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(10): 87-93.
- [6] 胡均平, 宋菲菲, 罗春雷, 等. 一种基于自适应角点检测的非量测畸变校正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 159-165.
- [7] 易文胜. 一种数据平滑法——高阶多项式分段逼近曲线拟合法[J]. 声学及电子工程, 1997(1): 36-39.
- [8] 杨春燕. 基于 Hough 变换的圆检测方法[J]. 配料师范学院学报, 2016, 30(2): 65-68.
- [9] 骆荣坤, 刘桂礼, 孔全存, 李东. 基于四邻域对角线上灰度约束的亚像素角点检测[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(1): 77-83.
- [10] 洪涛青, 卢小忠. 基于多项式曲线拟合的龙泉青瓷作品性态分析——以作品《有容乃大》为例[J]. 丽水学院学报, 2017, 39(5): 36-41.