

基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取

化春键^{1,2}, 熊雪梅^{1,2*}, 陈莹³

¹江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

²江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

³江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 在双目视觉工件圆弧半径测量过程中, 圆弧轮廓特征提取是后续边缘轮廓点匹配及空间圆弧重构的关键。受工件表面纹理、周围环境干扰、光照不均匀等影响, 现有算法并不能准确提取圆弧轮廓特征。在 Sobel 算子进行边缘检测的基础上, 利用自适应卷积运算和双局部二值模式纹理特征进行归一化处理产生融合灰度值, 进而利用融合灰度值对 Sobel 算子检测结果进一步筛选出边缘轮廓点。对极坐标分布直方图进行一般正态分布处理, 排除背景复杂时噪声点的干扰, 进一步区分外轮廓特征和内轮廓特征。实验结果表明, 本文算法不仅消除了光照影响, 而且具有很好的准确性和稳健性。

关键词 图像处理; Sobel 算子; 双局部二值模式纹理特征; 卷积运算; 极坐标分布直方图; 正态分布

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021011

Feature Extraction of Workpiece Circular Arc Contour Based on Sobel Operator

Hua Chunjian^{1,2}, Xiong Xuemei^{1,2}, Chen Ying³

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

² Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

³ School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract In the process of workpiece circular arc radius measurement on binocular vision, the circular arc contour feature extraction is the key to match follow-up edge contour point and reconstruct space arc. Affected by the surface texture of the workpiece, the interference of the surrounding environment, and uneven illumination, the existing algorithm cannot accurately extract the circular arc contour feature. Based on the edge detection by Sobel operator, we use adaptive convolution operation and double local binary pattern texture feature to generate the fusion gray value, which can be used to screen out the edge contour points in the previous detection result by Sobel operator. The polar coordinate distribution histogram is obtained and processed as a normal distribution, which can eliminate the interference of noise points in the complex background and distinguish the outer contour feature from the inner contour feature. The experimental results show that the proposed algorithm overcomes the influence of illumination and becomes accurate and robust.

Key words image processing; Sobel operator; double local binary pattern texture feature; convolution operation; polar coordinate distribution histogram; normal distribution

OCIS codes 100.2000; 100.3005; 330.5000; 330.7310

收稿日期: 2017-08-14; 收到修改稿日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61573168)

作者简介: 化春键(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉与传感器技术等方面的研究。

E-mail: cjhua@jiangnan.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 466755765@qq.com

1 引言

目标识别是计算机智能化的重要组成部分,目标识别的实质就是目标特征空间到识别样本空间的映射^[1]。目标识别^[2-4]已广泛应用于工业制造、门禁安全^[5]、车型识别^[6]等领域。基于图像特征信息提取的目标识别一直以来备受国内外各机构和组织关注^[7]。图像特征提取的实质是提取图像中能够反映其内容本质属性的特征,譬如点、线、边缘、纹理等^[8]。在图像特征提取过程中,显著点(特征点)包含了图像的颜色、形状、纹理等特征信息。利用图像中显著点作为视点线索,找到视觉重要的局部区域^[9-11]。在三维立体视觉中,显著点提取是三维重构的前提。

在工件圆弧半径测量过程中,为保证加工精度,需对工件的轴承、定位孔以及因为设计需要而倾斜的空间圆进行实时实地测量。三坐标测量仪价格昂贵,测量曲线曲面的耗时较长且测量结果受周围环境影响较大。若采用单目视觉测量,当拍摄角度发生偏移时会对结果产生较大影响。因此,从价格、测量准确性以及测量周期等方面考虑,双目视觉测量较适合于工件圆弧半径的测量。而圆弧边缘轮廓特征提取是单目测量和双目测量的关键环节。本文主要研究双目立体视觉测量时的空间圆弧边缘轮廓特征提取。该特征提取是后续边缘轮廓点匹配及空间圆弧重构的关键。

目前,常用的边缘检测算子包括 Sobel 边缘检测算子、Canny 边缘检测算子等。受工件表面纹理、周围环境干扰、光照不均匀等因素的影响,利用上述算子进行边缘检测的过程中会出现较多杂乱及错检边缘,因此并不能很好地提取出工件的边缘轮廓特征。文献^[12]对现有边缘检测方法进行改进,提出利用空洞填充及邻域特征的快速边缘轮廓点提取算法,但该算法仅能提取外边缘轮廓,同时受工件表面的纹理干扰较大,稳健性较差。文献^[13]使用基于红绿蓝(RGB)归一化的彩色分割算法和区域特征判决准则自动识别多标志互连候选区域,并对提取目标区域进行边缘平滑和轮廓跟踪,该算法主要针对交通标志分离,较为复杂。文献^[14]提出了一种多尺度轮廓转动惯量特征区域检测方法和轮廓转动惯量局部不变特征提取方法,多尺度轮廓转动惯量特征区域检测方法能够提取出包含轮廓的最小特征区域,而轮廓转动惯量局部不变特征能够很好地描述轮廓的大小、位置、规则度等信息,但该算法较为

复杂且耗时较长,内轮廓与外轮廓的区分效果不够理想。

针对上述算法的不足,本文对耗时较短且抗噪能力较强的 Sobel 边缘检测算子进行改进,利用自适应卷积运算和双局部二值模式(DLBP)纹理特征进行归一化处理后产生融合灰度值,在 Sobel 算子进行边缘检测的基础上,利用融合灰度值对 Sobel 算子检测的结果筛选出边缘轮廓点。同时,本文对极坐标分布直方图进行一般正态分布处理,能够有效提取出圆弧工件的外边缘轮廓点和内边缘轮廓点。

2 Sobel 边缘检测算子

Sobel 边缘检测算子实质上是一种离散的一阶差分算子,该算子包含横向和纵向 2 组 3×3 矩阵的卷积因子。将卷积因子与原灰度图像进行平面卷积运算,可得出横向及纵向的亮度差分近似值:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{A}, \quad (1)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \mathbf{A}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{A} 代表原始灰度图像, G_x 及 G_y 分别代表经横向及纵向边缘检测的图像灰度值,则该点灰度的大小为

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (3)$$

如果灰度 G 大于某一阈值,则认为该点 (x, y) 为边缘点。灰度方向 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (4)$$

Sobel 算子是根据像素点 8 邻域内的灰度值加权差在边缘处达到极值这一特性来检测边缘。该算法用时较短且对噪声具有平滑作用。但是,采用 Sobel 算子进行边缘检测过程中出现较多杂乱及错检边缘,并不能很好地提取边缘轮廓特征(图 1)。因此,为准确找到边缘特征并有效提取轮廓信息,本文在 Sobel 算法的基础上进行了一些改进。

3 卷积运算及纹理特征归一化

3.1 自适应卷积运算

在数字图像处理中,卷积实现了一种邻域运算^[15]。卷积运算的实质就是对图像中某一像素点的邻域加权求和,从而得到输出像素点的灰度值。

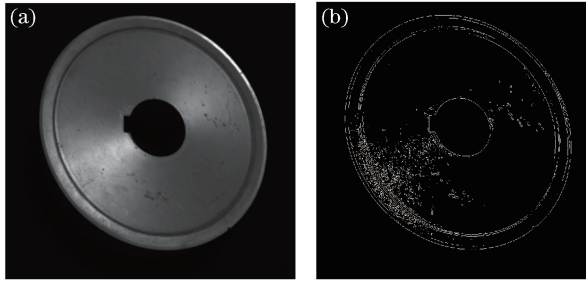


图1 Sobel算子边缘检测图。(a)圆弧工件灰度图;(b)圆弧工件边缘检测图

Fig. 1 Edge detection diagram of Sobel operator.

(a) Gray-scale image and (b) edge detection of arc workpiece

卷积运算中卷积核的行、列数量都是奇数。假定邻域大小为 $M \times N$, 则中心像元的灰度计算公式为

$$g(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N k_{mn} f(m, n), \quad (5)$$

式中 k_{mn} 为邻域中每个像元的权重, $g(x, y)$ 为中心像元灰度值, $f(m, n)$ 为 $M \times N$ 窗口中点 (m, n) 的灰度值。

在工件圆弧轮廓的边缘特征提取过程中, 为增大工件轮廓边缘与一些杂乱边缘的灰度值差距, 减小工件表面纹理及光照环境对结果的影响, 对原灰度图像进行卷积运算。设定 8 邻域卷积核为 ω , 为增大灰度值差距, 设定自适应卷积核, 即 8 邻域中每个像元的权重为该像元自身的灰度值大小。因此, 卷积核 ω 为原灰度图 A 中的待处理像素点的 8 邻域矩阵。自适应卷积运算后的灰度值的计算公式为

$$g(x, y) = \mathbf{I}(x, y) * \omega, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{I}(x, y)$ 为灰度图中待处理像素点的 8 邻域矩阵, ω 为自适应卷积核。将计算所得的 $g(x, y)$ 归一化到 $[0, 255]$, 可得卷积运算后的像素点灰度值 $B(x, y)$ 。

分别提取原灰度图像 A 中的两点。如图 2 所示, a_1 为工件轮廓上一点, a_2 为工件表面上一点。 a_1 点的 8 邻域像素点矩阵为 \mathbf{I}_1 , 此处 $\omega = \mathbf{I}_1$ 。 a_2 点的 8 邻域像素点矩阵为 \mathbf{I}_2 , 此处 $\omega = \mathbf{I}_2$ 。通过实验可得, a_1 点的灰度值为 119, 卷积运算后, 该点的灰度值为 96; a_2 点的灰度值为 135, 卷积运算后, 该点的灰度值为 183。

3.2 纹理特征

纹理是工件表面的固有特征之一, 其表现为灰度以一定的形式变化而产生的图案。局部二值模式(LBP)是一种用来描述图像局部纹理特征的算子。在 3×3 的 8 邻域窗口内, 以中心像素点的

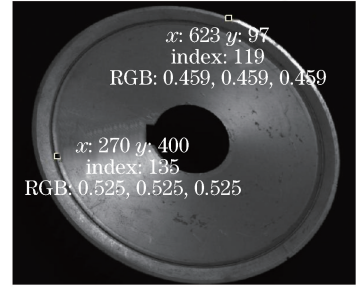


图2 提取工件灰度图中两点

Fig. 2 Two points extracted in the gray-scale image of the workpiece

灰度值为阈值, 将 8 邻域内像素点的灰度值与其进行比较。如果邻域中的像素值大于中心像素值, 则该邻域像素点的位置被标记为 1, 否则标记为 0, 进而可产生 8 位无符号数 V_{LBP} (如 10101100), 即为该 8 邻域窗口的 LBP 值。LBP 纹理特征可以表示为

$$V_{LBP}(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{P-1} s(g_p - g_c) 2^i, \quad (7)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

式中 (x_c, y_c) 代表中心像素点坐标, g_p 代表邻域像素点灰度值, g_c 代表中心像素点灰度值, P 的值一般取 8。传统的 LBP 方法无法准确区分邻域像素点与中心像素点相等和邻域像素点大于中心像素点两种情况, 因为这两种情况所得到的都是 $s(x) = 1$ 。DLBP^[16] 主要是为 LBP 的不足而提出的, 其结果如下:

$$V_{DLBP}(x_c, y_c) = [V_{LBP+}(x_c, y_c), V_{LBP-}(x_c, y_c)], \quad (8)$$

$$V_{LBP+}(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{P-1} s(g_p - g_c - n) 2^i, \quad (9)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

$$V_{LBP-}(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{P-1} s(g_p - g_c + n) 2^i, \quad (10)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x < 0 \\ 0, & x \geq 0 \end{cases}$$

若 $V_{LBP+}(x_c, y_c) = 0$ 且 $V_{LBP-}(x_c, y_c) = 0$, 则邻域像素点与中心像素点相同; 若 $V_{LBP+}(x_c, y_c) = 1$ 且 $V_{LBP-}(x_c, y_c) = 0$, 则邻域像素点大于中心像素点; 若 $V_{LBP+}(x_c, y_c) = 0$ 且 $V_{LBP-}(x_c, y_c) = 1$ 时, 则邻域像素点小于中心像素点。通过上述分析可以区分邻域像素点与中心像素点的三种情况。通过引入参数 n 来改善像素点值轻微摇摆产生的影响, 一般取 $n = 4$ 。将计算所得的 $V_{DLBP}(x_c, y_c)$ 归一化到

[0, 255],即为灰度图上每个像素点的纹理特征。

3.3 归一化融合灰度值

由第2节可知, Sobel算子检测边缘的灰度 G 大于某一阈值, 则认为点 (x, y) 为边缘点。通过实验可知, Sobel算子无法有效地提取工件轮廓特征。因此, 通过对原灰度图进行自适应卷积运算及 DLBP 纹理特征的归一化处理, 得出新的融合灰度值 H 。通过边缘检测得到的边缘像素点, 若其融合灰度值 H 小于设定的阈值, 则该边缘为所需的边缘轮廓点。 H 计算公式为

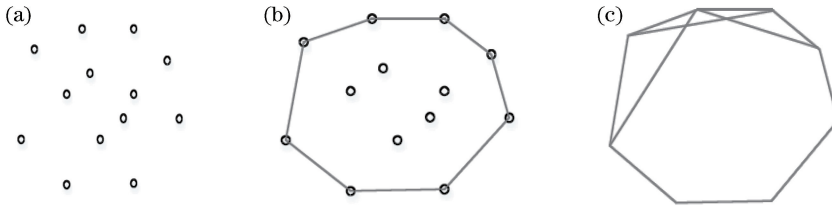


图3 不变特征构造过程^[17]。(a)点集;(b)点集的凸包;(c)构造三角形

Fig. 3 Construction process of invariant feature^[17].

(a) Point set; (b) convex hull of point set; (c) triangle construction

针对图1(a)中的圆弧工件, 根据光照影响及工件表面纹理情况, 取 $\beta=0.16$ 。经过本文算法改进后, 图1(a)中工件边缘轮廓特征提取结果如图4所示。

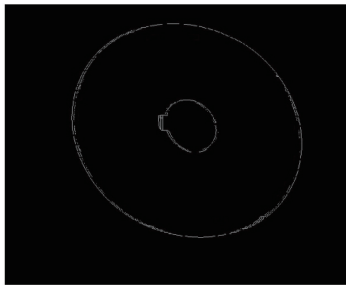


图4 工件边缘轮廓特征提取图

Fig. 4 Edge contour feature extraction diagram of the workpiece

4 极坐标直方图提取边缘轮廓点

4.1 极坐标分布直方图

为便于后续测量, 需要将经过上述处理获得的内边缘轮廓点和外边缘轮廓点进一步区分。对原灰度图 A 进行二值化处理, 对二值化图像进行连通域标记, 提取前景连通域, 并求得质心点 $O(x, y)$ 。以 $O(x, y)$ 作为参考坐标原点进行对数极坐标变换, 使得边缘轮廓点能够呈现一定的分布特征, 从而能够进一步划分内轮廓点与外轮廓点。对于任意像素点 (x_i, y_i) , 其极坐标转换公式为

$$H(x, y) = (1 - \beta)B(x, y) + \beta V_{DLBP}(x, y), \quad (11)$$

式中 $\beta \in (0, 1)$ 为自适应权重值。当工件表面纹理特征较多时, β 取较大值; 反之, β 取较小值。如图3所示, Yang等^[17]在具有凸集特性的特征点上构造不变特征。首先求点集的凸包, 在凸包上选择边界上的点, 对任意相邻的三个顶点构造一系列三角形, 然后计算三角形的面积, 最后求得三角形面积与总面积的比值。运用此算法, β 的取值与凸包不变量构造算法中的面积比近似。

$$\begin{cases} r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ \theta_i = \arctan\left(\frac{y_i - y}{x_i - x}\right) \end{cases}, \quad (12)$$

式中 r_i 为对数极坐标的半径, θ_i 为对数极坐标的角度。

按照本文算法对图1中的圆弧工件进行边缘轮廓特征提取, 并以(12)式对边缘轮廓点进行极坐标转换, 转换后的极坐标半径分布直方图如图5所示。由图5可知, 在边缘轮廓点提取过程中, 会不可避免地出现少数噪声点。

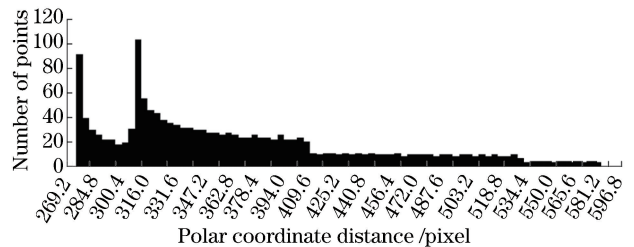


图5 极坐标半径分布直方图

Fig. 5 Radius distribution histogram in polar coordinate

4.2 利用一般正态分布求得边缘轮廓点

正态分布(ND)是一种在工程领域运用广泛的概率分布, 并且在统计学领域有着重大的影响力。若随机变量 X 服从数学期望为 μ 、标准方差为 σ^2 的高斯分布, 则其服从正态分布记为: $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (13)$$

正态分布中存在 3σ 原则,可以解释为: $P(\mu-\sigma < X \leq \mu+\sigma) = 68.3\%$, $P(\mu-2\sigma < X \leq \mu+2\sigma) = 95.4\%$, $P(\mu-3\sigma < X \leq \mu+3\sigma) = 99.7\%$ 。 σ 表示正态分布中数据分布的离散程度。 σ 越大,数据分布越疏散,曲线越扁平; σ 越小,数据分布越集中,曲线越细高。

为排除背景中其他噪声点的干扰,同时进一步分析轮廓特征点,利用正态分布对图 6 所示的极坐标半径分布折线图进行分析。呈现双峰状态,说明圆弧工件存在内轮廓和外轮廓。为进一步分析工件轮廓特征,利用正态分布的 3σ 原则对双峰中第二个峰值较高的分布进行分析。可将该分布理解为正态分布中对称的一半分布,取 $P(0 < X \leq \mu+2\sigma) = 95.4\%/2$ 。求得外轮廓点如图 7 所示。

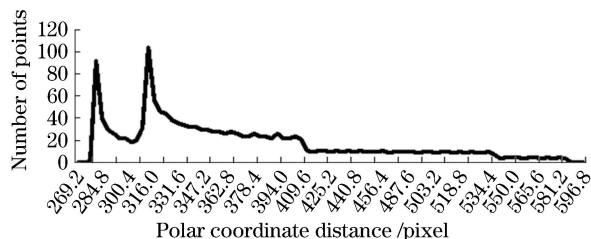


图 6 极坐标半径分布折线图

Fig. 6 Radius distribution in polar coordinate



图 7 圆弧工件外轮廓点

Fig. 7 Outer contour point of the arc workpiece

若工件在实时拍摄过程中背景较为复杂,则在边缘轮廓提取时背景中噪声点会增多。此时应根据 3σ 原则,相应调节极坐标分布折线图中正态分布的取值范围,保证边缘轮廓点的准确性。

5 实验研究

5.1 对比分析实验

为验证本文算法的有效性,构建图 8 所示双目视觉拍摄装置,实验对象如图 9 所示。范莹^[12]提出的快速边缘轮廓点提取算法能有效提取边缘轮廓点,受工件表面纹理特征和光照环境影响较小,同时

精度较高。对图 9 所示的工件,分别用本文算法以及文献[12]算法提取外轮廓,并进行精度比较分析。利用最小二乘法对求得的边缘轮廓点进行拟合,进而求得圆弧半径并进行精度分析。

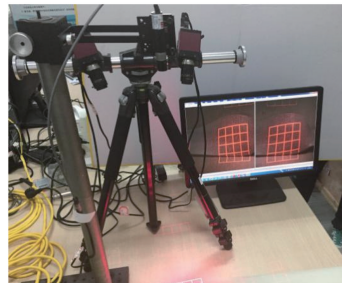


图 8 实验装置图

Fig. 8 Photograph of experimental setup



图 9 单目拍摄下的工件灰度图

Fig. 9 Gray-scale image of the workpiece under monocular photography

在数理统计中,均方误差(MSE)可以理解成估计值与真实值之差平方的期望值。MSE 主要用来评价数据的变化程度,MSE 值越小,说明通过预测模型描述的实验数据精确度越好。MSE 可表示为

$$V_{\text{MSE}} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^a \epsilon_j^2, \quad (14)$$

式中 ϵ_j 为第 j 次提取的圆弧半径值与所对应的标准半径值之差; a 为提取的圆弧数量。

首先,在光照强度 $L = 300 \text{ lx}$ 的条件下,利用本文算法提取外轮廓点,由于拟合可能存在误差,因此利用最小二乘法进行 8 次拟合实验,并取 8 次实验 MSE 的平均值 \bar{V}_{MSE1} 作为研究对象。计算每次实验的 V_{MSE1} ,并记录在表 1 中。由(14)式可知,8 次实验 MSE 的平均值 $\bar{V}_{\text{MSE1}} = 2.213 \times 10^{-3}$ 。

在相同光照条件下,利用本文算法提取内轮廓点,由于拟合可能存在误差,因此利用最小二乘法进行 8 次拟合实验,并取 8 次实验 MSE 的平均值 \bar{V}_{MSE2} 作为研究对象。计算每次实验的 V_{MSE2} ,并记录在表 2 中。由(14)式可知,8 次实验 MSE 的平均值 $\bar{V}_{\text{MSE2}} = 2.449 \times 10^{-3}$ 。

表 1 本文算法提取外轮廓点的 MSE

Table 1 MSE of the extracted outer contour points with the proposed algorithm

Experimental number	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{MSE1}/10^{-3}$	1.912	2.378	2.621	2.371	1.825	2.231	2.024	2.339

表 2 本文算法提取内轮廓点的 MSE

Table 2 MSE of the extracted inner contour points with the proposed algorithm

Experimental number	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{MSE2}/10^{-3}$	1.942	2.367	2.834	2.363	2.856	2.543	2.667	2.023

在光照强度 $L = 300$ lx 的条件下,利用文献 [12] 算法提取外轮廓点,利用最小二乘法进行 8 次拟合实验,并取 8 次实验 MSE 的平均值 \bar{V}_{MSE3} 作为

研究对象。计算每次实验的 V_{MSE3} ,并记录在表 3 中。根据 (14) 式可知,8 次实验 MSE 的平均值 $\bar{V}_{MSE3} = 3.265 \times 10^{-3}$ 。

表 3 文献[12]算法提取外轮廓点的 MSE

Table 3 MSE of the extracted outer contour points with the algorithm in Ref. [12]

Experimental number	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{MSE3}/10^{-3}$	3.776	2.963	2.937	3.641	3.155	3.068	3.357	3.226

综上所述,本文算法能有效地区分内轮廓和外轮廓点,同时具有较高的精度和较强的稳健性。通过计算可知,相对于文献[12]提出的方法,本文算法的精度可以提高 25% 左右。

本文算法在不同光照条件下的稳健性,设置光照强度 L 由弱到强,依次为 5, 20, 80, 150, 300, 500, 1000, 1500 lx, 然后分别对图 9 中的圆弧工件进行 8 次拍摄,并计算出外轮廓点的 MSE 值,将结果记录在表 4 中。图 10 所示为第 3 组光照适中条件下文献[12]算法与本文算法提取外轮廓的对比图像。

5.2 不同光照亮度下参数自适应实验

不同的光照会对结果产生不同的影响。为验证

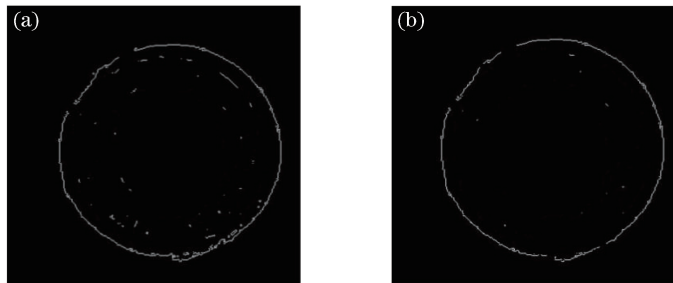


图 10 (a)文献[12]算法与(b)本文算法提取外轮廓的对比图像

Fig. 10 Comparison of the extracted outer contour maps with (a) the algorithm in Ref. [12] and (b) the proposed algorithm

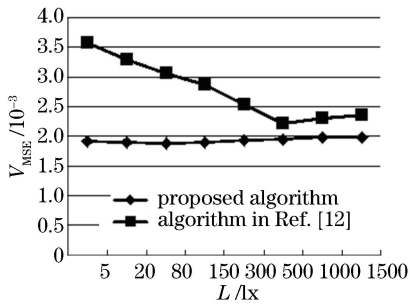
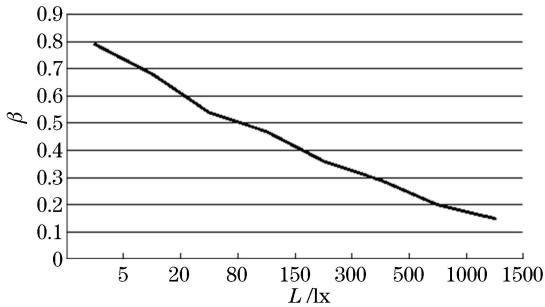
表 4 不同光照强度下外轮廓点的 MSE

Table 4 MSE for outer contour points under different illumination intensities

Algorithm	$V_{MSE}/10^{-3}$							
	$L=5$ lx	$L=20$ lx	$L=80$ lx	$L=150$ lx	$L=300$ lx	$L=500$ lx	$L=1000$ lx	$L=1500$ lx
Proposed algorithm	1.912	1.893	1.876	1.902	1.933	1.945	2.043	1.896
Algorithm in Ref. [12]	3.567	3.288	3.064	2.873	2.533	2.216	2.302	2.357

为了更直观地比较算法在不同光照条件下的配准效果,根据表 4 中的数据,以光照亮度 L 为横坐标,MSE 的值为纵坐标,绘制图 11。同时,绘制出自适应权重值 β 在不同光照强度下的变化情况,如图 12 所示。

由图 11 和图 12 可知,文献[12]算法在光照强度较弱时稳健性较差,拟合精度相对较低;本文算法能够有效消除光照影响,稳健性较强。同时, β 值随着光照强度的增加而逐渐降低,但始终保持在 0 到 1 之间。

图 11 V_{MSE} 随 L 的变化曲线Fig. 11 V_{MSE} versus L 图 12 自适应权重值 β 在不同光照强度下的变化情况Fig. 12 Adaptive weight value β under different illumination intensities

6 结 论

现有算法不能准确提取工件圆弧轮廓特征,因此在 Sobel 算子进行边缘检测的基础上,首先利用自适应卷积运算和 DLBP 纹理特征进行归一化处理后产生融合灰度值,进而利用融合灰度值对 Sobel 算子检测结果筛选出边缘轮廓点;同时,对极坐标分布直方图进行一般正态分布处理,能够排除背景复杂时噪声点的干扰,亦能进一步区分外轮廓特征和内轮廓特征。本文算法不仅消除了光照影响,而且具有很好的准确性和稳健性。

参 考 文 献

- [1] Liu X W, Zhou G H, Hao C M. Target recognition capability analysis of multisensor based on D-S theory [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(7): 1017-1021.
刘湘伟, 周国辉, 郝成民. 基于 D-S 理论的多传感器目标识别能力分析 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(7): 1017-1021.
- [2] Cyr M, Kimia B B. 3D object recognition using shape similarity-based aspect graph [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2001: 254-261.
- [3] Piella G, Heuimans H, JAM. Adaptive lifting schemes with perfect reconstruction [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(7): 1620-1630.
- [4] Sun T, Wang C J, Wang R, et al. Contour bag of features applied in laser active lighting recognition system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0109002.
孙涛, 王灿进, 王锐, 等. 轮廓特征包在激光主动照明识别系统中的应用 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0109002.
- [5] Victor B, Bowyer K, Sarkar S. An evaluation of face and ear biometrics [J]. Pattern Recognition, 2002, 16(1): 429-432.
- [6] Li C F, Chen X H. Vehicle type recognition based on combining local binary pattern and Hu matrix feature [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101503.
李澄非, 陈新华. 融合局部二值模式和 Hu 矩特征的车辆识别 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101503.
- [7] Gai G J. Feature extraction and target recognition based on image information [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009.
盖光建. 基于图像的特征信息提取与目标识别 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [8] Li H P, Li Y, Zhang X W. Rectangle pattern extracting combined with Canny and distance transform [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(18): 166-169.
李慧平, 李映, 张秀伟. 结合 Canny 和距离变换的矩形模式特征提取方法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(18): 166-169.
- [9] Qu X G, Wang G Y. Image retrieval based on the salient points and keyblocks [J]. Journal of Computer Applications, 2006, 26(3): 613-614.
曲晓光, 王国宇. 基于显著点和关键块相结合的图像检索方法 [J]. 计算机应用, 2006, 26(3): 613-614.
- [10] Gao R R, Zhu J Z, Deng C G, et al. Method for image retrieval based on salient points and SVM relevance feedback [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(1): 173-177.
高如如, 朱俊株, 邓昌葛, 等. 一种基于显著点和 SVM 相关反馈的图像检索方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(1): 173-177.
- [11] Zeng Z Y, Zhang X J, Cui J T, et al. A novel image retrieval algorithm based on color and distribution of prominent interest points [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(2): 308-311.

- 曾智勇, 张学军, 崔江涛, 等. 基于显著兴趣点颜色及空间分布的图像检索新方法[J]. 光子学报, 2006, 35(2): 308-311.
- [12] Fan Y. Research on image matching and location technique based on binocular vision [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
范莹. 基于双目视觉的图像匹配与定位技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [13] Li H J, Qiu T S, Song H Y, *et al.* Separation algorithm of traffic signs based on curvature scale space corner detection[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0115002.
李厚杰, 邱天爽, 宋海玉, 等. 基于曲率尺度空间角点检测的交通标志分离算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0115002.
- [14] Sun T, Wang C J, Wang R, *et al.* Contour bag of feature applied in laser active lighting recognition system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0109002.
孙涛, 王灿进, 王锐, 等. 轮廓特征包在激光主动照明识别系统中的应用[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0109002.
- [15] Wang P, Yu J H. Mathematical theory of convolution on image processing[J]. Microcomputer Information, 2006, 22(8): 209-211.
王鹏, 于锦海. 图像处理中卷积理论的数学基础[J]. 微计算机信息, 2006, 22(8): 209-211.
- [16] Xu J, Ding X Q, Wang S J, *et al.* Background subtraction based on a combination of texture, color and intensity [C]. 9th International Conference on Signal Processing, 2008: 1400-1405.
- [17] Yang Z, Cohen F S. Image registration and object recognition using affine invariants and convex hulls [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(7): 934-946.