

上下边缘区分的平面钣金零件尺寸测量方法

耿磊¹, 叶琨¹, 肖志涛¹, 李月龙², 邱玲¹

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300387)

摘要: 针对钣金零件轮廓尺寸高精度测量面临尺度增大造成的测量精度下降问题, 提出了准确获取零件上表面的边缘方法和厚度转换模型。首先, 结合光学成像理论分析了背光光源下不同厚度钣金零件的边缘特性, 提出厚度零件具有上下边缘特征, 然后根据平板零件图像的边缘分布特征, 采用 Canny 算子初定位边缘, 用多项式拟合算法实现亚像素边缘精确提取, 对含有上下边缘的轮廓提出平均距离法获得上表面边缘, 并针对厚度引入的误差提出了厚度转换模型进行边缘修正, 获取零件在标定平面上的真实边缘, 最终结合标定数据求取零件尺寸。实验结果表明, 在 $1 \times 0.75 \text{ m}^2$ 的视场内, $1 \sim 5 \text{ mm}$ 厚、 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 零件的测量精度达到了 0.05 mm , 满足了钣金加工测量的需求。

关键词: 尺寸测量; 钣金; 亚像素; 上下边缘; 厚度转换

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0617010

Measuring method for planar sheet metal parts based on upper and lower edges distinguish algorithm

Geng Lei¹, Ye Kun¹, Xiao Zhitao¹, Li Yuelong², Qiu Ling¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. School of Computer Science & Software Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of planar sheet metal parts when the measurement scales increase, upper and lower edge distinguishing method and thickness converting model were proposed. Firstly, edge distribution characteristics of parts image which include upper edges and lower edges were proposed by analyzing the edge feature of different thickness of metal parts placed in back-lighting. Sub-pixel edges of parts were extracted by the Canny and polynomial fitting algorithm. Then, upper or lower edges were distinguished by distance-mean method. Finally, accurate edges on the calibration plane were located basing on thickness converting model. Dimensional measuring of metal part could be calculated using the calibration data. Experimental result shows that the precision of the $1 \sim 5 \text{ mm}$ thickness and $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ parts in the range of $1 \times 0.75 \text{ m}^2$ is up to 0.05 mm . It can satisfy the requirement of the sheet metal cutting measurement.

Key words: dimensional measurement; sheet metal parts; sub-pixel; upper and lower edge; thickness converting

收稿日期: 2015-10-17; 修订日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61302127, 61102150); 天津市科技支撑计划(14ZCZDZX00033)

作者简介: 耿磊(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。Email: genglei@tjpu.edu.cn

通讯作者: 肖志涛(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: xiaozhitao@tjpu.edu.cn

0 引言

测量技术是现代制造业的基础技术之一,是保证产品质量的关键。在钣金等板材加工领域,基于视觉技术的零件尺寸在线高精度测量已经成为一个重要研究课题。该技术具有非接触、速度快、高精度和环境适应性好等优点,已经成为先进制造领域内最先进的在线测量技术之一。钣金零件在工业产品中广泛应用,其显著特征是同一零件厚度(通常在6 mm以下)一致。传统的检测方法使用卷尺、卡尺、千分尺等工具人工测量关键尺寸,其效率和准确性难以保证,同时内轮廓难以测量。为此,关节臂、三坐标测量仪、影像测量仪等测量仪器得到广泛应用,但用该类仪器进行测量仍然面临成本高、效率偏低的问题,而且尺寸大的钣金零件难以一次性测量。这些难题催生了基于单目视觉技术的钣金加工测量系统。

在该类测量系统中,被测目标信息由拍摄图像的轮廓边缘表征,其定位精度直接影响到尺寸测量的精度。实际测量时,零件尺寸不一,厚度变化,在面向相机的一侧会呈现上下边缘的特征,且下边缘因视角的不同形成测量盲区。因此高精度定位亚像素边缘并区分上下边缘是该类测量系统的关键技术。常用的亚像素检测技术分为插值法、矩法和拟合法三类^[1-3]。它们的边缘检测精度、抗噪声能力以及算法复杂度各不相同。插值法定位依赖于相邻像素间的灰度、坐标关系和插值函数的选取,计算时间短,但定位精度低。基于矩的亚像素技术利用的是积分算子,对噪声不敏感,但是通常矩方法缺少明确的准则来区分像素是否属于边缘,另外对包含梯度变化的像素集都会产生响应并且只在边缘像素的近邻域有效,如果边缘位置比积分区域远,基于矩的方法就会失效。王希军^[4]等人分析了不同亚像素定位算法受各方面因素的影响情况,分别对几类亚像素边缘定位算法的稳定性以及定位精度的评价方法进行了研究。陈阔^[5]利用 Canny 算法快速提取目标边缘,并改进高斯函数亚像素边缘检测算法,拟合求得目标亚像素中心,取得了很高的定位精度。Fei Hao^[6]提出了自动设置 Canny 算法参数的方法,对含有高斯噪声、泊松噪声及脉冲噪声的图像具有很好的适应性。针对平板零件的测量,大部

分系统测量的零件很薄且尺寸不大,这类系统不考虑厚度对测量的影响。但零件尺寸变大并且厚度增大时,厚度对测量的影响显现出来,其中就面临着上下边缘区分的难题。

针对钣金零件亚像素边缘准确提取,文中通过分析不同厚度钣金零件的边缘特性,采用 Canny 边缘检测和多项式拟合算法实现亚像素边缘提取;提出平均距离法区分零件上下边缘,进而利用三角法获取零件在标定(测量)平面上真实边缘;最后利用标定出的相机内参、测量平面姿态等实现零件尺寸测量,并通过实验验证了该算法的可行性。

1 钣金零件成像特性分析

平面零件视觉测量系统主要由 CCD 相机、点激光器和光源组成,如图 1 所示。其中,相机光轴垂直于测量平面,点激光器和摄像机约成 45°放置,斜射式投射光束,用于计算零件厚度;采用高密度 LED 阵列面为系统提供高强度背光,突出被测物边缘特征。光源上覆盖导光板、漫射板及平行膜,提供均匀平行光。

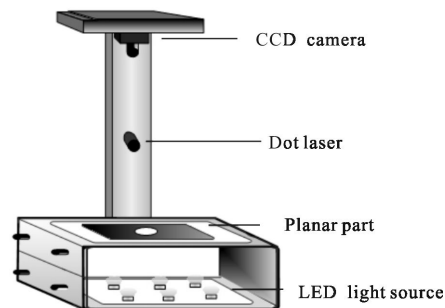


图 1 系统结构图

Fig.1 System structure

成像时,由于物体和背景的不同反射特性以及 CCD 器件的积分效应,造成 CCD 器件对阶跃边缘的响应产生由明到暗或由暗到明的渐变过程,所以边缘在图像中表征为一种灰度分布。另外,当被测物有一定的厚度且尺寸较大时,在距离相机一侧存在两个梯度值较大的过渡带,而在相机另一侧时只有上边缘,如图 2 所示。为保持轮廓的完整性,避免盲区造成的下边缘丢失,需区分上边缘与下边缘,并只提取对相机都看见的上边缘。

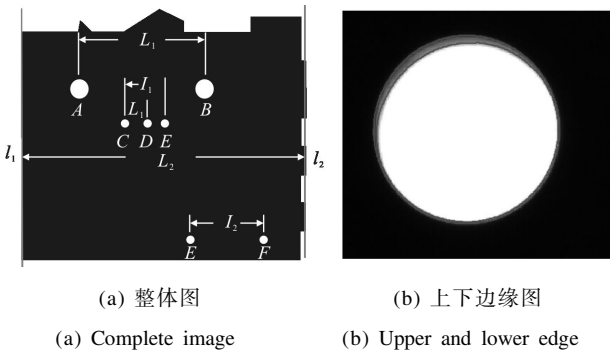


图 2 平面零件

Fig.2 Planar part

2 边缘提取

边缘是图像局部强度变化最显著的部分,基于亚像素边缘检测定位技术主要根据被测物边缘特征,采用 Canny 边缘检测算法对目标边缘进行像素级的粗定位,再结合先验知识,考虑边缘所在位置邻域像素的灰度分布特征,将边缘定位在更准确的位置。

2.1 边缘粗定位

亚像素边缘定位前先采用像素级边缘检测方法确定边缘点的位置。文中选用 Canny 算子进行整像素级边缘提取,首先对图像进行高斯平滑,这可通过高斯卷积实现。然后对平滑后的图像进行简单的二维一阶微分操作得到梯度大小和方向,可采用以下 2×2 大小的模板作为对 x 方向和 y 方向偏微分的一阶近似:

$$G_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此得到梯度大小和方向分别为:

$$M(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan[G_y(x, y)/G_x(x, y)] \quad (3)$$

然后对梯度幅值进行非极大值抑制,寻找图像中的可能边缘点,最后通过双门限值递归寻找图像边缘点得到单像素宽度边缘图像。

2.2 基于多项式拟合的亚像素检测

基于多项式拟合的亚像素边缘检测法具有抗干扰能力强,检测出的边缘点位置准确的优点。文中采用三次多项式拟合法,利用多项式函数对灰度分布作最小二乘拟合^[6],并根据拟合出的函数曲线来确定灰度分布边缘点的位置。

采用的三次多项式的形式为 $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$,

并且假设 $\hat{y} = f(x)$,将全部测量值与回归直线的偏离平方和记为 S ,则:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i^3 + bx_i^2 + cx + d)]^2 (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

公式(4)反映了全部测量值与回归值之间的偏离程度。要使回归直线与全部测量值最接近,要求二者的偏离程度最小,根据极值条件由 $\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \frac{\partial S}{\partial b} = 0,$

$\frac{\partial S}{\partial c} = 0, \frac{\partial S}{\partial d} = 0$, 求出 a, b, c, d , 再根据 $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0$ 的坐标得出亚像素点的坐标。

3 摄像机标定

文中选择带有镜头畸变的针孔摄像机模型。设 P_w 为世界坐标系中一点,理想成像下 P_w 点的成像坐标为 (u, v) ,由于存在镜头畸变,实际成像位置为 $(\tilde{u}, \tilde{v}), (u, v)$ 与 (\tilde{u}, \tilde{v}) 的关系如公式(5)所示。

$$\begin{cases} \tilde{u} = u + u \times (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2 (r^2 + 2u^2) + 2p_1 uv \\ \tilde{v} = v + v \times (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2v^2) + 2p_2 uv \end{cases} \quad (5)$$

式中: $r = \sqrt{u^2 + v^2}$; k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数。

文中使用上节的算法实现特征点的亚像素边缘提取。考虑到圆形特征点投影后的图像为椭圆^[7],通过最小化 N 个数据点 c_i 到椭圆曲线的代数距离平方和将特征点的亚像素边缘拟合为椭圆^[8]:

$$d(c) = \sum_{i=1}^N f(c_i)^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

式中: $f(c_i)$ 为第 i 个数据点到椭圆曲线的代数距离。拟合得到的椭圆曲线表示为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (7)$$

可由椭圆表达式的系数直接得到特征点中心坐标^[9-10],将此坐标记为 $m_j = (x_j, y_j)$,其中 $x_j = \frac{2AD - BE}{B^2 - 4A^2}$,

$y_j = \frac{2AE - BD}{B^2 - 4A^2}$; 另一方面,将投影变换得到的特征点中心坐标记为 $\pi(M_j, e)$,最终通过使 m_j 与 $\pi(M_j, e)$ 之间的距离最小化来确定摄像机的参数:

$$d(e) = \sum_{j=1}^K \|m_j - \pi(M_j, e)\|^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

式中: K 为标定板上特征点数量; $e = (f, s_x, s_y, u_0, v_0, \alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 为参数向量; f 为摄像机有效焦距; s_x, s_y

为缩放比例因子; u_0, v_0 为摄像机光轴与图像坐标系交点的像素坐标; α, β, γ 为旋转角度; t_x, t_y, t_z 为平移量。

4 确定被测物准确边缘和尺寸恢复

4.1 判别上下边缘

文中提出了平均距离法判别上下边缘并获取上边缘。首先对钣金零件图像进行亚像素精度阈值 (T_c) 分割, 得到轮廓 C , 设轮廓 C 的亚像素坐标为集合 $Q(q_1, q_2, \dots, q_i)$, 边缘点集 P 为 $P(p_1, p_2, \dots, p_i)$, 计算两边缘间的偏差量 $H(P, Q)$, 计算方法为: 首先, 对 P 中的每一个点, 计算其到 Q 上所有点的欧式距离, 距离用符号 $\| \cdot \|$ 表示, 计算方法如公式(9); 然后将得到的距离进行排序, 取其中距离最小值为此点的偏差量, 用 $h(p, Q)$ 表示, 如公式(10); 最后计算 $h(p, Q)$ 的集合即为两边缘间的偏差量 $H(P, Q)$, 如公式(11):

$$\|p-q\| = \sqrt{(x_1-x_2)^2 + (y_1-y_2)^2} \quad (9)$$

$$h(p, Q) = \min_{q_i \in B} \|p-q_i\| \quad (10)$$

$$H(P, Q) = \{h(p, Q) | p \in P\} \quad (11)$$

计算两边缘间的偏差量 $H(P, Q)$ 集合的中间值 mid , 求取集合 $H(P, Q)$ 中小于 mid 的所有值的均值 D , 如公式(12)所示, 将轮廓 Q 向内收缩 D 长度, 得到即为图像的上边缘轮廓。

$$D = \frac{1}{\hat{l}} \sum_{i=1}^{\hat{l}} D_i \quad (12)$$

式中: \hat{l} 为集合 $H(P, Q)$ 中小于 mid 的值的个数; D_i 为集合 $H(P, Q)$ 中小于 mid 的所有值。

根据成像几何原理, 对于有厚度的被测物, 底部轮廓会被遮挡, 导致成像成比例地增大, 所以上述算法求得的边缘需要进一步求解, 把上边缘根据模型转换到下边缘。创建边缘点的三维模型如图 3 所示。

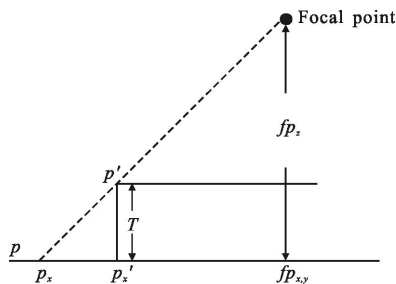


图 3 厚度转换模型

Fig.3 Thickness converting model

由上述的边缘提取算法得到点 P 的图像坐标 (p_x, p_y) , 摄像机标定可以求得摄像机焦点的 z 坐标 fp_z , 若已知物体厚度 T , 则实际边缘点坐标 $p'(p'_x, p'_y)$ 可以通过厚度转换模型得到, 如公式(13)所示:

$$\begin{cases} p'_x = p_x + (fp_x - p_x) / fp_z \times T, & \text{当 } fp_z > p_x \text{ 时} \\ p'_y = p_y + (fp_y - p_y) / fp_z \times T, & \text{当 } fp_z > p_y \text{ 时} \\ p'_x = p_x - (p_x - fp_x) / fp_z \times T, & \text{当 } p_x > fp_x \text{ 时} \\ p'_y = p_y - (p_y - fp_y) / fp_z \times T, & \text{当 } p_y > fp_y \text{ 时} \end{cases} \quad (13)$$

4.2 尺寸恢复

获取边缘信息后, 结合标定参数, 即可解算边缘尺寸数据。利用成像的基本原理, 根据图像上边缘成像点所对应的光线直线与边缘点所在平面的交点来确定边缘点的空间坐标, 进而得到目标的位置信息。

5 实验及讨论

5.1 实验

采用 VA-8MC 型 CCD 黑白工业相机采集图像, 其分辨率为 3296×2472 , 镜头焦距为 28 mm。图 2(a) 中的圆孔 B 如图 4 所示, 亚像素阈值分割算法的结果如图 5 所示, 根据二者的关系, 采用文中方法获取最终的准确边缘如图 6 所示。

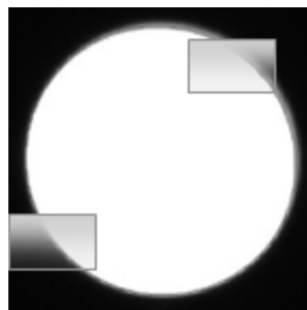


图 4 局部图

Fig.4 Local image

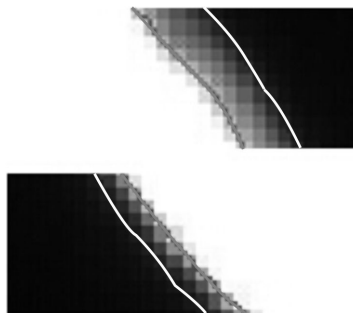


图 5 阈值分割轮廓

Fig.5 Contour segmented by fix threshold



图 6 平面零件边缘
Fig.6 Edge of planar part

在进行实际测量之前,先对系统进行了标定,文中使用的标定板为 7×7 圆形特征点标定板,精度为 0.001 mm。以反投影误差作为摄像标定精度的评判标准,即利用摄像机标定得到的特征点图像坐标 $m_j'=(x_j', y_j')$ 与经过图像处理得到的特征点图像坐标 $m_j=(x_j, y_j)$ 进行比较,误差的计算公式如公式(14)所示:

$$\Delta m = \sum_{j=1}^K \sqrt{(x_j' - x_j)^2 + (y_j' - y_j)^2} / K \quad (14)$$

式中: K 表示标定板的特征点数量; Δm 为平均误差,实验值为 0.0176 像素。摄像机分辨率为 3 296×2 472,利用内、外参计算图像两像素间的实际距离为 0.3 mm,所以反投影误差为 0.005 mm,由此可见,文中的标定算法可以实现对测量系统的高精度标定。

文中通过对两点间距离的测量并与其标准距离比来评估系统测量精度。针对结构如图 2(a)所示的不同厚度(1 mm、3 mm、5 mm)的钣金零件,选取零件上 AB 、 CD 、 CE 、 FH 的圆心距 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 及直线 l_1 和 l_2 的间距 L_5 进行测量。数据标准值由型号 VMS-4030F、精度为 $(3+L/200)\mu\text{m}$ 的数字影像测量仪获得。

1 mm、3 mm 及 5 mm 钣金零件的某次测量结果如表 1 所示。实验结果表明, $L_1 \sim L_5$ 测量误差均不超过 0.05 mm,并且当物体厚度从 1 mm 增加到 5 mm 时,误差仍小于 0.05 mm。

5.2 讨论

从表 1 测量数据上看,随着被测钣金零件尺寸的增加,测量误差有增大的趋势,这与相机视场周边的畸变比中心区域大有关,需要进一步改进标定方法提高标定精度;也与光源对周围区域和中心区域边缘的影响不一造成边缘定位在不同区域稍有差异有关。另外,随着厚度的增加误差也有增大的趋势,

这与测量平面的设定、标定及不同厚度的零件上表面转换到测量平面的过程有直接关系。下面分别对影响测量精度的几个关键因素进行讨论。

表 1 不同厚度零件测量结果(单位:mm)

Tab.1 Measurement results of sheet metal parts with different thickness (Unit: mm)

Thick-ness		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1 mm	Standard values	39.990	70.006	129.99	219.960	499.870
	Measured values	39.998	69.992	130.015	219.980	499.832
	Error	0.008	0.014	0.024	0.020	0.038
3 mm	Standard values	39.968	69.942	129.98	219.951	499.86
	Measured values	39.955	69.930	129.96	219.925	499.815
	Error	0.013	0.012	0.020	0.026	0.045
5 mm	Standard values	39.995	69.980	129.978	219.932	499.860
	Measured values	39.967	69.941	129.952	219.945	499.813
	Error	0.028	0.039	0.026	0.013	0.047

5.2.1 厚度模型补偿

为了验证文中提出的厚度模型是否能有效补偿厚度带来的问题,对厚度为 5 mm 的零件进行测量,补偿前后数据如表 2 所示。5 mm 的平面零件补偿前测量平均误差为 0.970 6 mm,补偿后的平均误差为 0.030 6 mm,误差明显减小,说明文中提出的厚度模型避免了摄像机成像导致零件上表面轮廓成比例增大的问题,有效补偿了零件厚度带来的误差。

表 2 5mm 厚度零件补偿前后测量结果(单位:mm)

Tab.2 Measurement results of compensation (Unit:mm)

	Standard values	Measured values before compensation	Error	Measured values after compensation	Error
L_1	39.995	40.168	0.173	39.967	0.028
L_2	69.980	70.291	0.311	69.941	0.039
L_3	129.978	130.610	0.632	129.952	0.026
L_4	219.932	221.050	1.118	219.945	0.013
L_5	499.860	502.479	2.619	499.813	0.047
Average error		0.970 6		0.030 6	

5.2.2 测量长度

图 7 反映了当零件厚度分别为 1、3、5、10 mm 时，厚度与测量误差的变化关系。从图中可以看出，当厚度一定时，随着被测零件尺寸的增加，误差有增加的趋势，但在 500 mm 的长度范围内，1~5 mm 钣金零件的误差被控制在 0.05 mm 范围内。如果要扩展系统的测量范围，需要进一步提升相机的分辨率并增大光源面积，或者通过两套系统拼接的方式增大最终的测量范围。

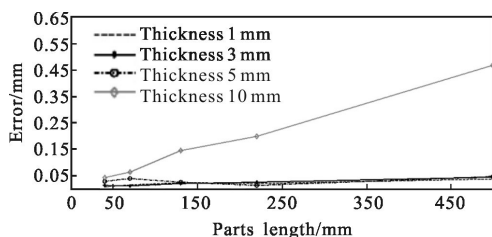


图 7 不同被测长度误差图
Fig.7 Error of different length

5.2.3 测量厚度

测量系统中照明装置采用平行光时，能够解决具有一定厚度的被测物在摄像机一侧出现上下边缘的问题，但是鉴于工艺制造技术，平行度难以保证，另外环境光也会对边缘造成一定的影响。随着厚度的增加，虽然经过了误差补偿，测量精度得到了提升，但测量误差仍有增大的趋势。

当零件厚度变化时，直线 l_1 和 l_2 间距 L_s 的测量结果如表 3 所示。误差值随着厚度的增加而增大。零件厚度在 6 mm 以下时，系统的测量精度达到了 0.05 mm，厚度在 10 mm 时，最大误差为 0.47 mm。工业产品中的钣金零件通常在 6 mm 以下，因此文中的测量精度适用于大多数钣金零件。

表 3 不同厚度的零件固定长度(l_s)测量结果(单位:mm)
Tab.3 Measurement results of sheet metal parts with different thickness of fix length (Unit:mm)

Parts thickness	Standard values	Measured values	Error
1 mm	499.870	499.832	0.038
3 mm	499.860	499.815	0.045
5 mm	499.860	499.813	0.047
10 mm	499.300	498.830	0.470

5.2.4 阈值选择

在进行亚像素精度阈值分割时，得到轮廓 C 的过程中需要设定阈值 T_c ，文中以 10 为步长，计算阈值为 130~200 时零件长度测量结果。实验得出，在阈值从 130 变化至 200 时，零件长度误差变化幅度很小。这是因为边缘在背光源的作用下，环境对边缘的影响较小。阈值的设定总体上是稳定的，这有利于算法的鲁棒性，避免需根据不同的环境设置阈值参数。

6 结论

文中对平面零件视觉测量中亚像素边缘提取进行了研究，分析了背光光源下不同厚度平面零件的成像特点，采用 Canny 算法对边缘进行粗检测，多项式拟合算法进行亚像素边缘提取，提出了一种平均距离法准确提取零件上表面边缘。根据光学成像理论分析了零件高度变化对边缘提取的影响，并针对高度引入的误差提出了厚度转换模型进行修正，最终实现了尺寸测量。在 $1 \times 0.75 \text{ m}^2$ 的测量视场内，对不同厚度的平面零件进行了实测，系统测量精度达到了 0.05 mm。实验也表明随着被测零件厚度的增加和尺寸的增大，误差都增大。在未来的工作中，需要通过改进标定板及标定方法并选用更高分辨率的相机进一步扩大测量范围；提出新模型解决更大厚度对测量结果的影响，并利用误差补偿方法提高精度；设计更稳定的结构和平行度更好的光源为后续算法提供支撑。

参考文献：

[1] Cai Yan, Ye Lianxiang, Sun Dawei, et al. Non-contact measurement for outside screw based on a modified sub-pixel edge detection algorithm of Zernike moments [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48 (10): 1468-1472. (in Chinese)
蔡艳, 叶连祥, 孙大为, 等. 基于改进的 Zernike 矩亚像素边缘提取算法外螺纹非接触测量 [J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(10): 1468-1472.

[2] Ye J, Fu G, Poudel U P. High-accuracy edge detection with blurred edge model[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23: 453-467.

[3] Xu Zhongyu, Ning Chuang. Sub-pixel edge detection based on orthogonal polynomial fitting[J]. *Journal of Convergence*

- Information Technology*, 2013, 8(4): 280–286.
- [4] Wang Xijun. Computation and comparison of laser speckle with sub-pixel measurement methods [J]. *Chinese Optics*, 2012, 6(5): 652–657. (in Chinese)
王希军. 激光散斑的亚像素位移法计算及比较[J]. *中国光学*, 2012, 6(5): 652–657.
- [5] Chen Kuo, Feng Huajun, Xu Zhihai, et al. Sub-pixel location algorithm for planetary center measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1881–1890. (in Chinese)
陈阔, 冯华君, 徐之海, 等. 亚像素精度的行星中心定位算法[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1881–1890.
- [6] Fei Hao, Shi Jinfei, Zhang Zhisheng, et al. Canny edge detection enhancement by general auto-regression model and bi-dimensional maximum conditional entropy[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125 (15): 3946–3953.
- [7] Xu Peng, Wang Jianye, Wang Yanru. Calculation exact center coordinate of a target circle in camera calibration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (7): 1342–1346. (in Chinese)
徐鹏, 汪建业, 王燕儒. 摄像机标定中靶标圆心像点坐标的精确计算[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1342–1346.
- [8] Jung Youeyun, Lee Dongjin, Bang Hyochong. Study on ellipse fitting problem for vision-based autonomous landing of an UAV [C]//14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2014: 1631–1634.
- [9] Wei Ling, Zeng Tao, Lu Yanhua, et al. A fast ellipse center computation algorithm for optical power-meter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(12): 26–31. (in Chinese)
魏凌, 曾滔, 陆艳华, 等. 一种用于光焦度计的椭圆中心快速计算方法[J]. *光电工程*, 2012, 39(12): 26–31.
- [10] Wu Xiao. Positioning system of LED chips based on ellipse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (S1): 98–102. (in Chinese)
吴晓. 一种 LED 芯片椭圆定位方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 98–102.