

边缘恢复的大尺寸平面零件测量方法

李晓捷^{1,3}, 王佳^{2,3}, 耿磊^{2,3}, 叶琨^{2,3}

(1. 天津工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 3. 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387)

摘要: 针对平面零件在背光源照射下成像存在伪边缘而造成测量精度下降的问题, 提出了一种从被测物伪边缘中恢复准确边缘的测量方法。首先, 采用 Canny 算子提取平面零件的像素边缘, 在此基础上利用高斯曲面拟合算法实现亚像素边缘定位, 得到伪边缘; 然后, 提出一种基于方向角差值的边缘点判别法从伪边缘中区分上下边缘点并提出欧氏距离平均值法获得被测物上边缘; 最后, 利用相似三角形法将上边缘转换到测量平面, 结合摄像机标定参数求解平面零件的尺寸。实验结果表明, 在 1 200 mm×800 mm 的视野范围内, 对不同厚度的平面零件进行尺寸测量, 绝对误差小于 0.08 mm, 相对误差小于 0.05%。

关键词: 尺寸测量; 大尺寸平面零件; 伪边缘; 欧氏距离; 相似三角形法
中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0417006

Measuring method for large size planar parts based on edge restoration

Li Xiaojie^{1,3}, Wang Jia^{2,3}, Geng Lei^{2,3}, Ye Kun^{2,3}

(1. School of Computer Science & Software Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;
3. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the problem that the imaging accuracy of the planar part was decreased due to pseudo edges in the illumination of the backlight, a measurement method for recovering the accurate edge from the pseudo edges of the measured object was proposed. Firstly, pseudo sub-pixel edges of planar parts were extracted by Canny algorithm and surface fitting algorithm. Secondly, upper and lower edge points distinguishing method based on direction angle difference was proposed and the upper edges were restored by the method of mean Euclidean distance. Finally, the upper edges were converted to the measurement plane by the similar triangular method, and dimension of planar parts could be calculated by using the camera calibration parameters. The results show that the absolute error is less than 0.08 mm and the relative error is less than 0.05% in the range of 1 200 mm×800 mm.

Key words: dimensional measurement; large size planar parts; pseudo edges; Euclidean distance; similar triangle method

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61601325); 天津市科技支撑计划重点项目(14ZCZDZX00033);
天津市科技特派员项目(15JCTPJC56300); 天津市高等学校科技发展基金(20121102)

作者简介: 李晓捷(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: lixiaojie@tjpu.edu.cn

通讯作者: 耿磊(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事机器视觉、测试计量技术及仪器方面的研究。Email: genglei@tjpu.edu.cn

0 引言

随着机器视觉技术的快速发展,基于视觉的测量系统正被越来越广泛地应用于现代制造业和装配业中,该类测量系统具有非接触、精度高、适应性好等优点。在平面零件加工领域,尺寸测量是关键环节,传统的测量方式主要靠人工使用卷尺、游标卡尺、螺旋测微仪等工具进行测量,这种测量方式不仅存在主观性、易疲劳、速度慢、强度大等缺点,而且测量精度和效率也难以保证。为了克服人工测量的种种弊端,测量臂、影像测量仪、三坐标测量仪等测量仪器得到了广泛使用,但仍存在许多问题,如:测量臂和三坐标测量仪的测量精度与使用者的操作水平有关,存在主观性;影像测量仪单次测量范围较小,效率很低。因此,基于机器视觉的平面零件尺寸测量技术成为当下的研究热点。

在平面零件测量系统中,被测物的尺寸信息是根据边缘得到的,因此精确获得被测物的边缘对测量结果极为重要。早期的较为成熟的边缘检测算法如 Roberts 算法、Sobel 算法、LoG 算法和 Canny 算法等都只能达到像素级的精度,无法满足高精度测量要求。在传统边缘检测算法的基础上,一些亚像素边缘检测算法陆续被提出,主要分为三大类:矩方法^[1],插值法^[2]和拟合法^[3],在图像质量严格保证的前提下,已经能够实现 0.01 像素的检测精度,但在实际应用中,受到光源、镜头畸变、被测物尺寸和被测物厚度的影响,直接利用亚像素边缘检测算法提取的边缘精度难以保证。

目前,单目大尺寸平面零件视觉测量系统的测量精度通常难以达到 0.1 mm。理论研究方面,佟金^[4]等针对高温锻件的成像特点,设计了一种基于 CCD 的大型锻件几何尺寸测量系统,对直径 400~550 mm 的锻件进行测量,绝对误差不超过 1.5 mm。周森^[5]等针对移动大尺寸工件的表面形貌特点,利用二维激光三角法构造出水平和垂直虚拟测量基准面,建立了一种新型的大尺寸工件测量模型,实现了对大尺寸移动工件的测量,实验结果表明,长度 1 000 mm 内圆柱体尺寸测量精度达到了 100 μm;李江昀^[6]等在研究 Zernike 矩亚像素精度边缘检测原理的基础上,提出了一种适用于钢板尺寸测量的亚像素精度

边缘检测算法,测量长度为 8 200 mm 左右的钢板,绝对误差小于 2.5 mm。上述测量系统均没有考虑被测物厚度对测量精度的影响,当被测物较薄时(如 1 mm),此时可近似认为被测物上表面和测量平面为同一平面;当被测物厚度超过一定值时,厚度会对成像造成很大影响,最常见的是被测物在远离光轴与测量平面交点的一侧边缘处会有过渡带,此时提取的边缘精度较差,如何利用这些边缘恢复准确的测量边缘是提高大尺寸平面厚度零件测量精度的关键。

为了解决上述问题,文中提出一种边缘恢复的零件尺寸测量方法。首先,采用 Canny 算子和基于高斯曲面拟合的亚像素边缘检测算法^[7]得到伪边缘;然后,提出一种边缘点判别法从伪边缘中区分出上下边缘点并提出欧氏距离平均值法恢复被测物完整的上边缘;最后,利用相似三角形法将上边缘转换为下边缘,结合摄像机标定的参数解算被测物的尺寸。

1 平面零件成像分析

平面零件测量系统由 LED 平行背光源、光学成像系统(镜头和 CCD 摄像机)、图像采集设备和计算机组成。被测物在背光源照射下通过光学成像系统成像,经过图像采集设备将图像传送至计算机。

根据针孔成像原理可知,靠近摄像机光轴与测量平面交点一侧的零件上表面会遮挡住零件下表面,远离摄像机光轴与测量平面交点一侧图像会出现边缘过渡带。如图 1 所示, p_{w1} 为零件上某一圆孔的在该截面处的下表面点, p_{c1} 为该点在图像平面上的对应点。由于零件存在厚度, p_{w1} 被上表面点 p_{w2} 遮挡,即实际成像是 p_{c2} ,它是 p'_{w2} 在图像平面上的对应点,这类成像点丢失了零件的真实几何信息,无法直接用于尺寸测量。

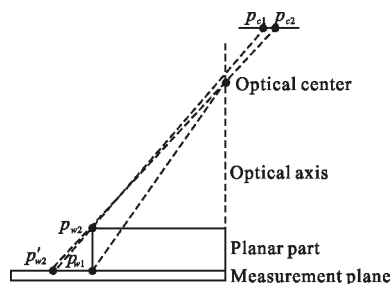


图 1 成像遮挡

Fig.1 Imaging occlusion

2 边缘提取

2.1 像素粗定位

为了实现尺寸测量,需要获得被测物的边缘信息,选择 Canny 算子对图像进行像素级边缘提取。首先,通过高斯卷积对图像进行平滑滤波;然后,用一阶差分近似水平方向和垂直方向上的偏导数,进而计算灰度梯度的幅值和方向,再对梯度幅值进行非极大值抑制;最后,通过双阈值算法检测和连接边缘。

2.2 基于高斯曲面拟合的亚像素定位

采用基于高斯曲面拟合的亚像素边缘检测算法对图像边缘进行亚像素级精度定位。设边缘上任意一像素点坐标为 (x,y) ,以该点为中心,选取 5×5 窗口内的像素点,求得这些点的灰度值 $z_i(i=1,2,\dots,25)$ 。设高斯曲面表达式为:

$$z=f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma}e^{-\frac{(x-\mu_1)^2+(y-\mu_2)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

根据最小二乘原理,需要求取合适的 μ_1, μ_2, σ ,使得:

$$F(\mu_1, \mu_2, \sigma) = \sum_{i=1}^{25} [z_i - f(x_i, y_i)]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

对公式(1)两边取对数,得到:

$$\ln z = \ln \frac{1}{2\pi\sigma} - \frac{(x-\mu_1)^2 + (y-\mu_2)^2}{2\sigma^2} \quad (3)$$

将公式(3)转化为:

$$\ln z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 \quad (4)$$

式中: $a_0 = -\ln(2\pi\sigma) - \frac{\mu_1^2 + \mu_2^2}{2\sigma^2}$; $a_1 = \frac{\mu_1}{\sigma}$; $a_2 = \frac{\mu_2}{\sigma}$; $a_3 = a_4 =$

$-\frac{1}{2\sigma^2}$ 。

将公式(4)记为 $Z(x,y) = \ln z$,则求解公式(2)转换为:

$$F(a_j) = \sum_{i=1}^{25} [\ln z_i - Z(x_i, y_i)]^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

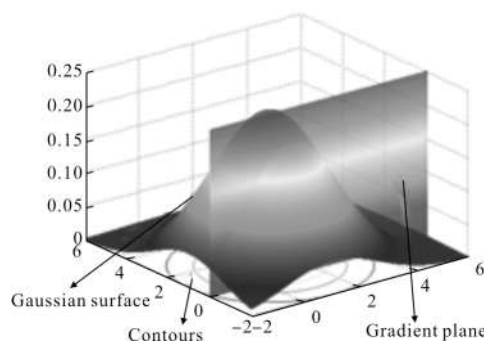
由多元函数取极值的必要条件,得方程组:

$$\frac{\partial F}{\partial a_j} = 0 (j=0,1,\dots,4) \quad (6)$$

求解该方程组即可得到系数 $a_j(j=0,1,\dots,4)$,进而可

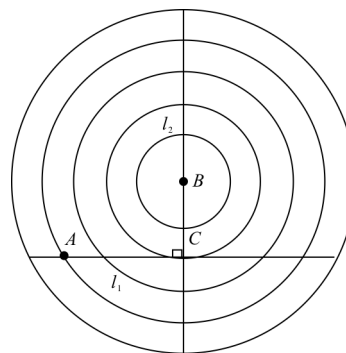
以求出 μ_1, μ_2, σ 。

得到高斯曲面表达式后,求解该像素点沿着梯度方向的高斯曲面局部极值点。如图 2(a)所示,梯度平面为经过像素点并垂直于 $X-Y$ 平面,法线方向与像素点梯度方向垂直的平面,高斯曲面局部极值点位于梯度平面和高斯曲面的交线上。



(a) 高斯曲面和梯度平面

(a) Gaussian surface and gradient plane



(b) 高斯曲面等高线

(b) Contour lines of Gaussian surface

图 2 高斯曲面示意图

Fig.2 Gaussian surface diagram

图 2(a)中高斯曲面对应的等高线如图 2(b)所示,设 A 为边缘点 (x_A, y_A) , B 为高斯曲面的顶点在 $X-Y$ 平面上的投影点,直线 l_1 为梯度平面与 $X-Y$ 平面的交线,直线 l_2 经过 B 且垂直于直线 l_1 ,直线 l_1 和 l_2 的交点为 C 。由于 A 点对应的梯度方向已知,则直线 l_1 的方程可记为 $ax+by+c=0$ 。因为直线 l_1 和直线 l_2 相互垂直,则直线 l_2 可设为 $bx-ay+c'=0$,根据前文可解算出 B 点坐标 (u_1, u_2) ,将 B 点坐标代入直线 l_2 的方程,得:

$$bu_1 - au_2 + c' = 0 \quad (7)$$

解出 $c' = au_2 - bu_1$,则直线 l_2 的方程为 $bx - ay +$

$au_2 - bu_1 = 0$, 联立直线 l_1 和直线 l_2 的方程, 得:

$$\begin{cases} ax + by + c = 0 \\ bx - ay + au_2 - bu_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

解出直线 l_1 和直线 l_2 的交点为:

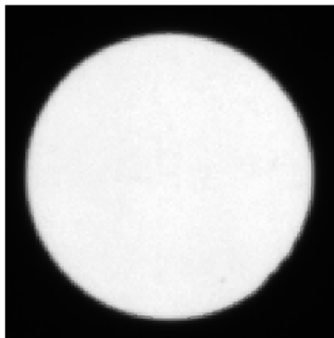
$$\begin{cases} x_c = \frac{b^2 u_1 - ac - abu_2}{a^2 + b^2} \\ y_c = \frac{a^2 u_2 - abu_1 - bc}{a^2 + b^2} \end{cases} \quad (9)$$

公式(9)即为 A 对应的亚像素边缘点坐标。

3 恢复被测物上边缘

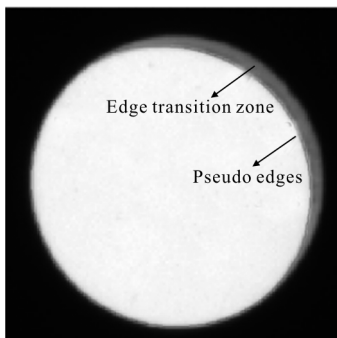
3.1 边缘点判别

由于存在边缘过渡带, 边缘提取的准确度会受到影响。如图 3 所示, 厚度 1 mm 零件的边缘提取结果较好地反映了被测对象的形状, 厚度 10 mm 零件的边缘严重偏离了被测对象的形状, 将这类边缘称为伪边缘。



(a) 厚度 1 mm 零件边缘

(a) Edge of 1 mm thickness part



(b) 厚度 10 mm 零件边缘

(b) Edge of 10 mm thickness part

图 3 边缘提取

Fig.3 Edges extraction

为了得到被测物完整的上表面亚像素边缘 (简称上边缘), 首先需要从伪边缘中区分出上下边缘点, 文

中提出一种径向角和法向角差值法从伪边缘中区分出上下边缘点。如图 4 所示, 设摄像机光轴与测量平面垂直相交于点 F , 以 F 为原点, 方向水平向右为参考轴。图中加粗的边缘为伪边缘, 由上边缘和下边缘组合而成。设伪边缘上有任意一点 A , 由 F 与 A 可以确定一条直线, 记作 FA , 以逆时针为正方向, 称参考轴到 FA 的夹角为径向角, 记作 $\angle RA$; 设伪边缘在 A 点处对应的法向量为 N , 方向从 A 点朝向外, 以逆时针为正方向, 称参考轴到 N 的夹角为法向角, 记作 $\angle NA$ 。计算 $\angle RA$ 和 $\angle NA$ 差值的绝对值, 若 $90^\circ < |\angle RA - \angle NA| < 270^\circ$, 则 A 点为上边缘点; 若 $|\angle RA - \angle NA| \leq 90^\circ$ 或者 $|\angle RA - \angle NA| \geq 270^\circ$, 则 A 点为下边缘点, 同理 A' 。

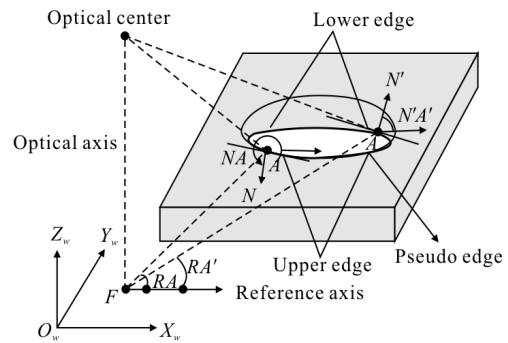


图 4 上下边缘区分

Fig.4 Upper and lower edges distinguish

下面对上述判别法进行理论推导。图 4 的平面图如图 5 所示, 图中 F 为摄像机光轴与测量平面垂直交点, 直线 FD 与伪边缘相切于点 D , 直线 FB 与伪边缘相切于点 B , O 点为圆弧 BD 对应的圆心, 直线 FO 交圆弧 BD 于点 C 。

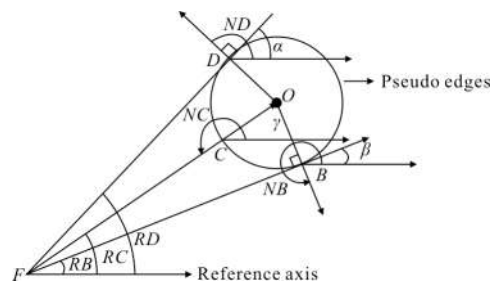


图 5 上下边缘平面示意图

Fig.5 Plane sketch of upper and lower edges

图 5 中, 根据两直线平行同位角相等定理可知, 有 $\angle \alpha = \angle RD$, $\angle \gamma = \angle RC$, $\angle \beta = \angle RB$, 则:

$$\begin{cases} |\angle ND - \angle RD| = |\angle ND - \alpha| = 90^\circ \\ |\angle NC - \angle RC| = |\angle ND - \gamma| = 180^\circ \\ |\angle NB - \angle RB| = |\angle NB - \beta| = 270^\circ \end{cases} \quad (10)$$

根据前面论述可知,靠近 F 点的圆弧 BCD 为上边缘,远离 F 点的圆弧 BD 为下边缘, D 和 B 为上下边缘的边界点。圆弧 DC 从 D 点到 C 点的过程中,径向角和法向角差值的绝对值从 90° 变化到 180° ,圆弧 CB 从 C 点到 B 点的过程中,径向角和法向角差值的绝对值从变化到 270° 。为了便于叙述,将径向角记为 φ ,法向角记为 η ,根据上面推导可以得出:对于伪边缘上的任意一点,若满足 $90^\circ < |\varphi - \eta| < 270^\circ$,则该点为上边缘点;若满足 $|\varphi - \eta| < 90^\circ$ 或 $|\varphi - \eta| > 270^\circ$,则该点为下边缘点;若满足 $|\varphi - \eta| = 90^\circ$ 或 $|\varphi - \eta| = 270^\circ$,则该点为边界点,可以认为是上边缘点也可以认为是下边缘点,文中将这类点判别为下边缘点。

利用上述判别法对伪边缘进行处理,将得到的上边缘点记为 $T = \{t_1, t_1, \dots, t_m\}$ 。

3.2 上边缘恢复

提出欧氏距离平均值法得到完整的上边缘。首先,使用阈值亚像素算法^[8]对零件图像进行边缘提取,得到的亚像素边缘为记 S ,将 S 表示为点集的形式 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$;然后,求取 T 中每一个点到轮廓 S 的欧氏距离,取其中最小距离值,记为 d_i ,如公式(11)、(12)所示:

$$\rho(t_i, s_j) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (11)$$

$$d_i = \min_{s_j \in S} (\rho(t_i, s_j)) \quad (12)$$

然后,求取所有 d_i 的平均值,如公式(13)所示:

$$d = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i \quad (13)$$

最后,将边缘 S 整体向内收缩 d 值距离,即可得到被测物完整的上边缘。

由于被测物具有一定的厚度,根据小孔成像的投影模型可知,得到的上边缘不能直接用于测量,文中利用参考文献[9]中的相似三角形法对上边缘进行坐标转换,从而得到被测物的测量边缘。

4 尺寸测量

进行尺寸测量之前,使用深度约束的零件尺寸测量系统标定方法^[10]进行标定,得到摄像机内外参,再根据边缘点所对应的光线与测量平面的交点来确定边缘点的世界坐标。

设边缘点的图像像素坐标为 $(r, c)^T$,将该点从图像像素坐标系转换到图像物理坐标系,如公式(14)所示:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x(c - c_x) \\ s_y(r - c_y) \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中: s_x 和 s_y 分别为水平和垂直方向上相邻像素的距离; $(c_x, c_y)^T$ 是主点坐标。

设摄像机光心坐标为 $(0, 0, 0)^T$,则由下边缘点和光心可以确定一条直线,通过摄像机标定模型,得到直线在摄像机坐标系中的方程:

$$L_c = (0, 0, 0)^T + k(u, v, f)^T \quad (15)$$

式中: k 是比例系数; f 是摄像机有效焦距。

利用摄像机外参将直线方程转换到世界坐标系下,如公式(16)所示:

$$L_w = O_w + kD_w \quad (16)$$

式中: O_w 为光心在世界坐标系下的坐标; D_w 为直线在世界坐标系下的方向向量。

计算世界坐标系下的直线与测量平面的交点,即可解算出边缘点的世界坐标。

5 实验与分析

5.1 实验系统

该测量系统主要由光源、摄像机和镜头、图像采集卡、计算机组成。系统设计遵循以下原则:实时性好、抗干扰能力强、鲁棒性好、成像清晰、保证图像有高对比度。测量系统结构如图 6 所示。

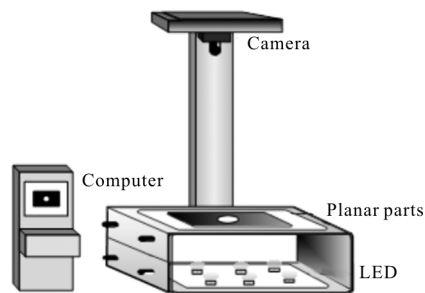


图 6 实验系统

Fig.6 Experimental system

该系统的光学成像部分采用的是分辨率为 6576×4384 的高质量工业相机,镜头选择的是 50 mm 镜头,系统测量范围的设计值为 $1500\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$,物距为 2100 mm ,实际有效测量范围约为 $1200\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 。根据透视投影的几何关系可以解算出像素当

量约为 0.228 mm。测量系统工作时,将被测零件放置于透明玻璃测量面板上,面板下安装了均匀平行背光源,被测零件在背光源的照射下在光学系统中成像,通过 CCD 芯片将光信号转换成电荷信号,再经过图像采集卡将模拟信号转换成数字信号并传输到计算机中,利用事先编写好的测量算法对被测物图像进行处理,最后输出测量结果。

5.2 边缘点判别

采用方向角差值边缘点判别法对结构如图 7 所示,厚度 1~10 mm 平面零件进行处理,提取到的亚像素边缘如图 8 所示。图中,曲线 *a* 为上边缘,曲线 *b* 为下边缘(注:穿过圆孔的直线不是边缘,是为了便于从图中直观看出上下边缘的分界而作的辅助线),曲线 *c* 为阈值亚像素算法提取的亚像素边缘。

通过图 8 中上下边缘点区分的结果可以看出,圆孔的伪边缘中,靠近摄像机光轴与测量平面交点一侧的边缘点被判别为上边缘点,远离摄像机光轴与测量平面交点一侧的边缘点被判别为下边缘点并且上下边缘点在分界处的判别误差不超过 2 个像素。

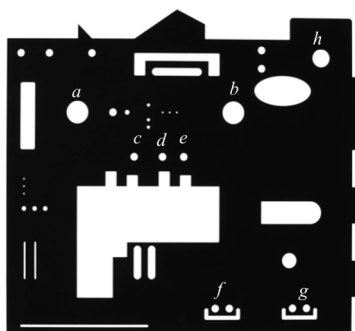
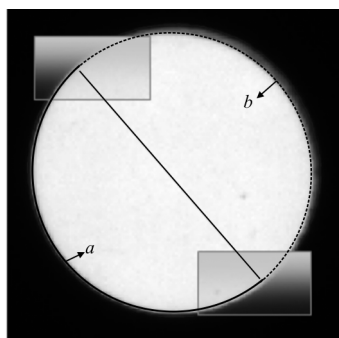


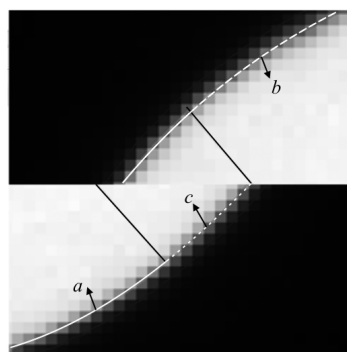
图 7 500 mm×500 mm 平面零件

Fig.7 Planar part of 500 mm×500 mm



(a) 厚度 5 mm 零件 *h* 孔

(a) *h* hole of 5 mm thickness parts



(b) *h* 孔局部图

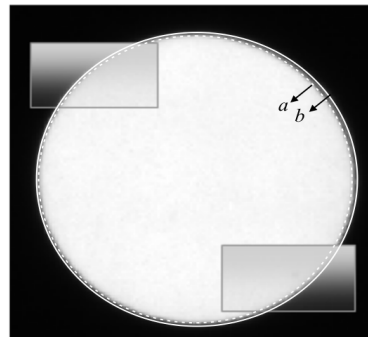
(b) Local image of *h* hole

图 8 边缘点区分

Fig.8 Edge points distinguish

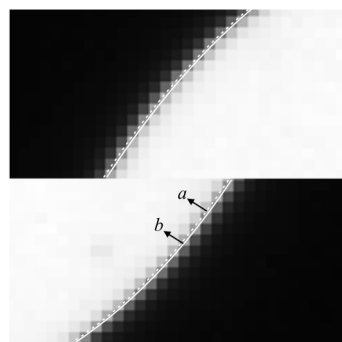
5.3 上边缘恢复

采用欧氏距离平均值法恢复被测物完整上边缘,结果如图 9 所示。图中,曲线 *a* 是使用基高斯曲面拟合的亚像素边缘检测算法提取的亚像素边缘,曲线 *b* 是使用边缘恢复法得到的被测物上表面亚像素边缘。



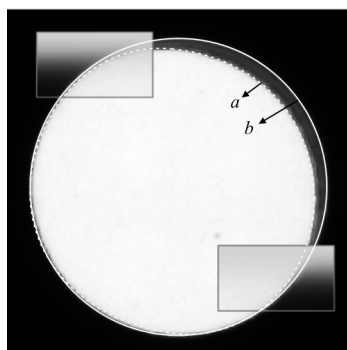
(a) 厚度 3 mm 零件 *h* 孔

(a) *h* hole of 3 mm thickness parts



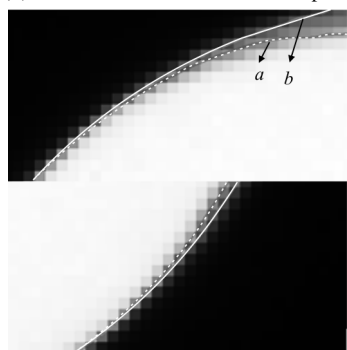
(b) *h* 孔局部图

(b) Local image of *h* hole



(c) 厚度 10 mm 零件 h 孔

(c) h hole of 10 mm thickness parts



(d) h 孔局部图

(d) Local image of h hole

图 9 上边缘恢复

Fig.9 Upper edge reconstruction

通过观察不同厚度平面零件的处理结果可以看出,当被测零件厚度在 3 mm 以下时,厚度对成像的影响较小,几乎没有边缘过渡带,此时使用边缘恢复法得到的上表面亚像素边缘和使用基于高斯曲面拟合的亚像素边缘检测算法提取的亚像素边缘几乎重合,二者之间偏差极小。随着被测物厚度的增加,边缘过渡带也不断扩大,当被测物厚度超过 5 mm 时,使用基于高斯曲面拟合亚像素边缘检测算法得到的伪边缘无法反映物体的真实形状,使用文中提出的边缘恢复法能够得到被测物较为真实的亚像素边缘。

5.4 尺寸测量

通过测量圆心距并将其与标准值进行对比来评估系统的测量精度,数据标准值由 VMS-4030F 数字影像测量仪获得,其测量精度为 $(3+L/200)$ μm。图 7 所示零件中,记圆孔 c、d 的圆心距为 L_1 ,圆孔 c、e 的圆心距为 L_2 ,圆孔 f、g 的圆心距为 L_3 ,圆孔 a、b 的圆心距为 L_4 。

对图 7 中不同厚度平面零件进行多次重复测量,测量结果如表 1 所示。

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)

Thickness/mm		L_1	L_2	L_3	L_4
1	Standard values	40.005	70.006	129.995	220.060
	Measured values	40.005	70.013	130.012	220.037
	Absolute error	0.000	0.007	0.017	0.023
	Relative error	0.000%	0.010%	0.013%	0.010%
3	Standard values	39.971	69.960	129.962	219.951
	Measured values	39.969	69.949	129.941	219.945
	Absolute error	0.002	0.011	0.021	0.006
	Relative error	0.005%	0.016%	0.016%	0.003%
5	Standard values	39.985	69.975	129.988	219.933
	Measured values	39.987	69.981	129.972	220.006
	Absolute error	0.002	0.006	0.016	0.073
	Relative error	0.005%	0.009%	0.012%	0.033%
10	Standard values	40.006	69.987	129.967	219.942
	Measured values	39.992	69.980	129.925	219.929
	Absolute error	0.014	0.007	0.042	0.013
	Relative error	0.035%	0.010%	0.032%	0.006%

从表 1 中的测量数据可以看出,厚度 1~10 mm 平面零件的圆心距 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 的测量绝对误差小于 0.08 mm,相对误差小于 0.05%,达到了较高的测量精度。

为了进一步验证边缘恢复的大尺寸平面零件测量方法方法测量更大尺寸平面零件时的精度,对结构如图 10 所示,长宽为 1 100 mm×300 mm,厚度为 1 mm 的零件进行多次重复测量。

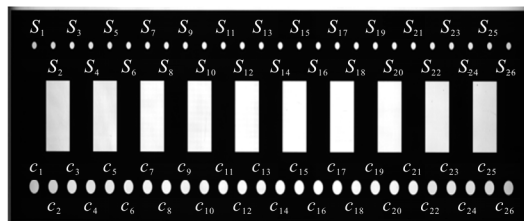


图 10 1 100 mm×300 mm 平面零件

Fig.10 Planar part of 1 100 mm × 300 mm

将小圆孔依次标记为 S_1, S_2, \dots, S_{26} , 大圆孔依次标记为 c_1, c_2, \dots, c_{26} , 记 S_{14-i} 与 S_{13-i} 的圆心距为 $l_i, i=1, 2, \dots, 13$, 记 c_{14-j} 与 c_{13-j} 的圆心距为 $d_j, j=1, 2, \dots, 13$ 。上述圆孔圆心距的测量结果分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 1 100 mm×300 mm 零件小孔圆心距测量结果 (单位:mm)

Tab.2 Measurement results of 1 100 mm × 300 mm part with small hole center distance(Unit: mm)

	l_5	l_7	l_9	l_{11}	l_{13}
Standard values	359.944	519.935	679.915	839.885	999.840
Measured values	359.982	519.957	679.868	839.839	1 000.004
Absolute error	0.038	0.022	0.047	0.046	0.164
Relative error	0.011%	0.004%	0.007%	0.006%	0.016%

表 3 1 100 mm×300 mm 零件大孔圆心距测量结果 (单位:mm)

Tab.3 Measurement results of 1 100 mm × 300 mm part with large hole center distance (Unit: mm)

	d_5	d_7	d_9	d_{11}	d_{13}
Standard values	359.981	519.989	679.974	839.967	999.965
Measured values	359.961	519.941	679.905	839.943	999.836
Absolute error	0.020	0.048	0.069	0.024	0.129
Relative error	0.006%	0.009%	0.010%	0.003%	0.013%

从表 2 和表 3 的数据可以看出, 小孔和大孔的圆心距在 920 mm 以下时测量绝对误差小于 0.08 mm, 相对误差小于 0.02%, 达到了较高的测量精度; 当测量尺寸为 1 000 mm 时, 测量绝对误差大于 0.1 mm。

为了验证边缘恢复法的有效性和准确性, 选择基于高斯曲面拟合的亚像素边缘检测法(简记为高斯曲面法)进行对比实验, 对结构如图 6 所示零件的圆心距 L_1, L_2, L_3 和 L_4 进行测量, 两种方法的测量结果如表 4 所示。

表 4 500 mm×500 mm 零件测量结果对比(单位:mm)

Tab.4 Comparison of measurement results of 500 mm×500 mm part (Unit: mm)

Thickness/mm		L_1	L_2	L_3	L_4
1	Standard values	40.005	70.006	129.995	220.060
	Gauss surface method	40.000	70.003	130.004	220.008
	Error	0.005	0.003	0.009	0.052
	Edge restore method	40.005	70.013	130.012	220.037
	Error	0.000	0.007	0.017	0.023
	Standard values	39.971	69.960	129.962	219.951
3	Gauss surface method	39.957	69.935	129.904	219.885
	Error	0.014	0.025	0.058	0.066
	Edge restore method	39.969	69.949	129.941	219.945
	Error	0.002	0.011	0.021	0.006
	Standard values	39.985	69.975	129.988	219.933
	Gauss surface method	39.961	69.936	129.886	219.787
5	Error	0.024	0.039	0.102	0.146
	Edge restore method	39.987	69.981	129.972	220.006
	Error	0.002	0.006	0.016	0.073
	Standard values	40.006	69.987	129.967	219.942
	Gauss surface method	39.939	69.884	129.675	219.526
	10	Error	0.067	0.103	0.292
Edge restore method		39.992	69.980	129.925	219.929
Error		0.014	0.007	0.042	0.013

通过观察测量结果可以得出, 当被测零件厚度较薄且尺寸较小时(厚度不超过 1 mm, 长度小于 220 mm), 高斯曲面法达到了很高的测量精度, 绝对误差值小于 0.05 mm; 随着零件厚度和尺寸的增加, 高斯曲面法的测量误差也在不断增加, 无法满足高精度测量需求, 而边缘恢复法能够有效降低零件厚度和尺寸增加带来的测量误差, 保证系统在一定测量范围内始终满足高精度测量需求。

6 结 论

文中对不同厚度平面零件在背光源下的成像

特征进行了分析,发现厚度零件存在伪边缘,在此基础上,提出了一种方向角差值边缘点判别法,利用此方法从被测物的伪边缘中区分出上边缘点。针对提取到的上边缘点,提出欧氏距离平均值法恢复完整的上边缘,并利用相似三角形法将上边缘转换为下边缘,最终实现尺寸测量。实验结果表明,在 1 200 mm×800 mm 的视野内,零件尺寸测量绝对误差小于 0.08 mm,测量相对误差小于 0.05%,能够满足工业生产中平面零件测量的精度要求。

参考文献:

- [1] Wang Chunfang. Improved sub-pixel edge location based on spatial moment [J]. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 2017, 17(11): 1-6.
- [2] Fernandes S R, Estrela V V, Saotome O. On improving sub-pixel accuracy by means of B-spline [C]//Imaging Systems and Technology, 2014 IEEE International conference on, 2014: 101109/IST.2014.6958448.
- [3] Sun Qiucheng, Hou Yueqian, Tan Qingchang. A subpixel edge detection method based on an arctangent edge model[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(14): 5702-5710.
- [4] Tong Jin, Wang Yahui, Lu Jisheng, et al. Coaxiality measurement of large-size forged components based on CCD [J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(4): 945-950. (in Chinese)
佟金,王亚辉,卢纪生,等.基于 CCD 的大型台阶轴锻件同轴度测量[J].吉林大学学报(工学版),2013,43(4): 945-950.
- [5] Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Dynamic length measuring system for large scale workpieces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2472-2478. (in Chinese)
周森,郭永彩,高潮.用于大尺寸工件的动态长度测量系统[J].光学精密工程,2012,20(11): 2472-2478.
- [6] Li Jiangjun, Wang Yuhao, Tong Chaonan, et al. An accurate zernike moment-oriented method for measuring flat strip dimension [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(7): 1432-1436. (in Chinese)
李江昀,王宇浩,童朝南,等.一种 Zernike 矩的高精度板材尺寸测量方法[J].电子学报,2015,43(7): 1432-1436.
- [7] Duan Xiaoyun, Wang Ning, Zhao Wenzhen, et al. Sub-pixel edge location algorithm based on Gauss integral curved surface fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 219-225. (in Chinese)
段振云,王宁,赵文珍,等.基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法[J].仪器仪表学报,2017,38(1): 219-225.
- [8] Guan Bo, Wang Junyuan, Du Wenhua, et al. Research on sub-pixel recise thresholding for tool contour extraction [J]. *Journal of Graphics*, 2014, 35(6): 950-953. (in Chinese)
关波,王俊元,杜文华,等.刀具轮廓亚像素精度阈值分割算法研究[J].图学学报,2014,35(6): 950-953.
- [9] Geng Lei, Ye Kun, Xiao Zhitao, et al. Measuring method for planar sheet metal parts based on upper and lower edges distinguish algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0617010. (in Chinese)
耿磊,叶琨,肖志涛,等.上下边缘区分的平面钣金零件尺寸测量方法[J].红外与激光工程,2016,45(6): 0617010.
- [10] Xiao Zhitao, Zhu Shasha, Geng Lei, et al. Calibration method for parts dimension measurement system based on depth constraint [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2831-2836. (in Chinese)
肖志涛,朱莎莎,耿磊,等.深度约束的零件尺寸测量系统标定方法[J].红外与激光工程,2015,44(9): 2831-2836.