doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.073

基于直纹曲面模型的测量图像亚像素边缘定位

张　静[1]　赵文辉[1]　杜　坡[2]　赵文珍[1]　张　明[1]
(1.沈阳工业大学机械工程学院,沈阳 110870;2.沈阳工业大学工程实训中心,沈阳 110870)

摘要:针对现有亚像素边缘定位算法复杂难解、检测精度不高和计算速度较慢等问题,本文提出一种基于直纹曲面模型的边缘检测算法。采用 sigmoid 曲面模型代替传统高斯积分曲面模型表征测量图像边缘,利用模型反函数可求特性,在获取像素级边缘的基础上,对像素级边缘灰度矩阵进行对数变换,对变换后矩阵元素进行光强补偿,从而标定图像饱和度不足或过盈带来的误差。搭建视觉测量系统,采用背光源照明的方式获取清晰的测量图像,使用点阵标定板确定像素当量 A_r 为 19.472 1 μm/像素,应用量块标定出光强补偿系数 ΔL_s 为 0.13。量块边缘定位误差试验结果表明,相比于高斯曲面拟合算法,基于直纹曲面模型的边缘检测算法定位亚像素边缘更平滑,直线度误差为 0.6 μm,相同软硬件条件下计算效率提升 3.3 倍,测量精度从 3.3 μm 提升到 1 μm。将本文算法应用于内齿轮齿廓总偏差测量,采集齿轮图像后定位出齿圈外圆弧和内齿轮齿廓亚像素边缘点,由外圆弧边缘点确定内齿轮中心,计算齿廓边缘点初始相位角,根据齿廓总偏差计算模型计算出齿廓总偏差,其误差均低于国家标准最大允许值,表明该视觉边缘定位算法可以应用于高精度机械零件测量。

关键词:视觉测量;直纹曲面模型;边缘定位;sigmoid;亚像素
中图分类号:TP302.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0802-07　　**OSID**:

Sub-pixel Edge Detection of Measurement Image Based on Ruled Surface Model

ZHANG Jing[1]　ZHAO Wenhui[1]　DU Po[2]　ZHAO Wenzhen[1]　ZHANG Ming[1]
(1. *School of Mechanical Engineering*, *Shenyang University of Technology*, *Shenyang* 110870, *China*
2. *Center of Engineering Training*, *Shenyang University of Technology*, *Shenyang* 110870, *China*)

Abstract: Aiming at problems of existing measuring edges image detection models such as complex and difficult to solve, low detecting accuracy and slow speed, an edge detection algorithm was proposed based on the ruled surface model. In the algorithm, the sigmoid surface model was used instead of the traditional Gaussian integral surface model to represent the edges of the measured image. Combining the characteristics of the solution model, the gray value of the image was normalized in advance, and a logarithmic gray difference matrix was constructed. The light intensity compensation value was added to the transformed matrix elements to calibrate the errors caused by insufficient saturation or interference in the image. A visual measurement system and capture clear measurement images were built by using backlight illumination. The pixel equivalent A_r = 19.472 1 μm/pixel and the light intensity compensation coefficient ΔL_s = 0.13 were determined by using dot matrix calibration plate and measuring block as objects. The experimental results of measuring block edge positioning error showed that compared with the Gaussian surface fitting algorithm, the edge detection algorithm based on the ruled surface model located sub-pixel edges smoother, with an edge straightness error of 0.6 μm. Under the same software and hardware conditions, the computational efficiency was increased by 3.3 times, the measurement accuracy was improved from 3.3 μm to 1 μm. The algorithm proposed was applied to internal gear measurement of tooth profile total deviation. The gear images were collected, sub-pixel edge points of the outer arc and inner gear profile of the gear ring were located, the center of the inner gear from the outer arc edge points was determined, the initial phase angle of the tooth profile edge points was calculated, and the model

收稿日期:2024-07-04　修回日期:2024-09-27
基金项目:国家自然科学基金项目(52005344)、辽宁省科技厅面上项目(2022-MS-271)和国家重点研发计划项目(2020YFC2006701)
作者简介:张静(1989—),女,工程师,主要从事精密测量和机器视觉研究,E-mail:zhangjing0512@yeah.net
通信作者:赵文辉(1978—),男,教授,主要从事数字化制造和精密测量研究,E-mail:zhaowenhui@sut.edu.cn

based on the total deviation of the tooth profile was calculated. The calculation results of the total deviation of the tooth profile indicated that the error values were all lower than the maximum allowable value of the national standard. This visual edge localization algorithm had the potential to be applied to high-precision mechanical part measurement.

Key words: vision measurement; ruled surface model; edge detection; sigmoid; sub-pixel

0　引言

图像边缘检测一直是机器视觉、数字图像处理、图像分析和识别领域中的研究热点[1-3]。近年来，机器视觉测量技术因其具有高灵敏度、高分辨率、高速度和非接触等优点，在诸多领域应用广泛[4-5]，因此，对于边缘检测精度和速度提出了更高的要求。为了达到较高的精度要求，通常采用亚像素边缘检测。亚像素边缘检测是指边缘检测精度小于 1 个像素单元，检测过程中需根据目标特性对图像进行处理分析与计算[6-8]。从计算原理角度基本上分为矩方法、插值法和拟合法[9]。其中拟合法又包括曲线拟合和曲面拟合[10]。文献[11]提出了一种计算量小、抗噪性好的改进矩方法，解决了传统 Zernike 矩运算复杂的问题，但在定位细小边缘时精度较低。文献[12]使用的插值算法鲁棒性好，可减弱噪声对边缘定位精度的影响，提升了模糊边缘模型拟合的求解速度，但该方法只适用于直边缘。文献[13]提出的 sigmoid 算法可快速定位显微图像边缘，定位精度达到几十纳米，但只适用于直线、圆或者椭圆等已知形状零件尺寸测量。文献[14]提出的高斯积分曲面拟合法不需要进行梯度幅值计算，解决了传统高斯曲面拟合法中梯度幅值会对边缘定位产生影响的问题，但该算法求解过程需要查表，计算比较复杂，速度较慢。

针对以上问题，本文提出一种基于直纹曲面模型的亚像素边缘检测算法。在对数字图像进行高斯滤波和归一化处理的基础上，采用双阈值法，获得像素级边缘灰度矩阵，矩阵元素进行对数变换，对变换后矩阵元素进行补偿，以标定图像饱和度不足或过盈带来的误差。以像素级边缘点为中心选取计算单元，在每个计算单元中应用直纹曲面模型拟合出亚像素边缘点，得到亚像素边缘。以标准量块和齿轮为测量对象进行亚像素边缘定位，并与高斯曲面拟合法[14]进行对比，以验证本文算法定位精度和计算速度。

1　直纹曲面模型算法

1.1　直纹曲面模型建立

视觉测量图像在边缘定位时一般转换为数字图像灰度矩阵[15-16]，并对图像灰度进行归一化处理。矩阵中每个元素行列值设为像素点位置纵坐标 y 与横坐标 x，元素数值 $G(x,y)$ 表示该处灰度。将图像矩阵视为以行列值为 y 坐标和 x 坐标，灰度为 z 坐标曲面，即为灰度曲面。理想情况下，灰度曲面边缘法向截面曲线如图 1a 所示，但实际上，由于透镜成像原理[17-18]实际边缘可以看作是图 1a 所示的理想阶跃边缘和点扩散函数卷积结果，相当于通过点扩散函数对图像进行低通滤波，这会使得图像丢失一部分高频信息，失去了较为敏感的棱边出现模糊区域，即在图像背景与前景之间存在的一定宽度的边缘过渡区域[19-21]，如图 1b 所示，该区域灰度可以用高斯积分曲线表示[14]。由于 sigmoid 函数和高斯积分曲线在边缘过渡带附近曲线几乎完全重合，反函数可求的特性免去了高斯曲面拟合法查表求解步骤，函数形式可跟随待求边缘表达式变化等优点，本文利用 sigmoid 曲线代替高斯积分曲线表示实际边缘法向模型，用 sigmoid 曲线沿边缘切向运动形成的 sigmoid 曲面表示边缘灰度曲面。直接应用 sigmoid 曲面进行亚像素边缘定位理论上可行，但在实际求解过程中计算模型复杂，求解难度大，因此利用 sigmoid 函数特性进行数学推导，提出了一种基于直纹曲面模型的亚像素边缘定位方法。

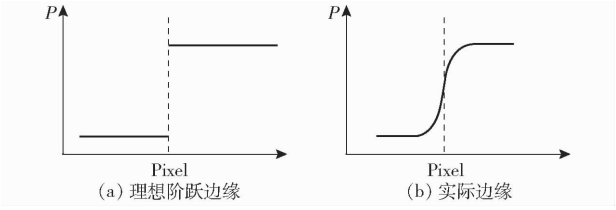


图 1　理想阶跃边缘与实际边缘法向模型

Fig. 1　Ideal step edge and actual edge normal models

1.2　直纹曲面构建与其性质

本文提出的直纹曲面母线通过对 sigmoid 曲线进行坐标变换、取对数和变量替换等数学运算得到。测量边缘法向灰度符合 sigmoid 曲线直线边缘和圆弧边缘灰度曲面模型为

$$G(x,y)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-(ax+by+c)}} \tag{1}$$

$$G(x,y)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-\frac{1}{k}\left[\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}-R\right]}} \tag{2}$$

沿图像边缘分段检测时，一般用直线段或圆弧

段进行逼近,当逼近圆弧段曲率半径趋近于无穷大时即为直线,以圆弧段逼近边缘曲线为例阐述直纹曲面模型建立过程。

式(2)为测量图像边缘以(x_0,y_0)为圆心以R为半径的圆弧时的边缘灰度曲面模型。对式(2)进行简单整理、取对数和变量置换。

令$L_s=\ln G(x,y)-\ln(1-G(x,y))$,整理可得

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=k^2L_s^2+2RkL_s+R^2 \tag{3}$$

即

$$x^2+y^2-a-bx-cy-dL_s-eL_s^2=0 \tag{4}$$

其中

$$a=R^2-(b^2+c^2)/4 \quad b=2x_0$$

$$c=2y_0 \quad d=2Rk \quad e=k^2$$

实际上,式(3)可用来表示一个以直线$L_s=(x-b/2-R)/k$或$L_s=(y-c/2-R)/k$为母线,以直线$x=b/2,y=c/2$为轴线的圆锥面。该圆锥面内$L_s=0$时圆截线即为图像边缘线表达式

$$x^2+y^2-a-bx-cy=0 \tag{5}$$

上述数学变换将母线从 sigmoid 曲线变换成以x或y为自变量,以L_s为因变量的直线,直母线沿着边缘方向运动形成直纹曲面模型。

由于受图像饱和度[22-23]的影响边缘位置通常会发生偏移,通过边缘提取算法得到的精边界往往是实际边界等距线[15]。通过对L_s进行补偿,令$L_s=L_s+\Delta L_s$,调整计算精边界位置,使其更接近于实际边界,提高计算精度。通过标定试验,确定对数灰度补偿值ΔL_s,标定的ΔL_s为系统光强补偿系数。

由式(3)可知,当测量图像边缘等效为圆弧线段时,求解模型是直母线沿着圆弧边缘准线运动形成的圆锥曲面。测量图像边缘如等效为直线段可看成圆弧线段特殊形式,即半径无限大,直线边缘求解模型是直母线沿着直线边缘准线运动形成的平面。综上,本文提出的直纹曲面模型由直母线沿着不同边缘准线运动形成。该模型母线由符合边缘灰度分布规律的 sigmoid 曲线变换而得,具有 sigmoid 曲线基本性质,变换为一次函数形式后求解过程中可沿法线方向直接进行补偿。

1.3 直纹曲面模型求解

当测量图像边缘为齿轮等复杂边缘时,将测量图像边缘曲线拆分成小段,每一段都可以看成圆弧线段或直线段;当被测图像边缘为已知方程曲线,特别是圆和直线时可以采用一次拟合方式进行求解。以圆和直线形式测量图像边缘的一次拟合为例阐述直纹曲面模型的求解。采用直纹曲面模型定位圆弧或直线测量图像亚像素边缘求解过程为

(1)根据图像边缘灰度一般规律和已知图像边缘特性,提取沿边缘方向的带状域作为拟合区域,包含边缘过渡区和前景与背景图像部分,控制前景和背景范围为最小,在边缘方向上选取的区域应既能达到足够的拟合精度,又能够尽量减小计算量,一般向边缘两侧各取 3 个像素。

(2)将提取区域内各点灰度进行归一化处理并存入图像灰度矩阵$\boldsymbol{G}$,$G(x,y)$表示x行y列像素点灰度。

令$L_s(x,y)=\ln(1-G(x,y))-\ln G(x,y)$,取得$L_s$对数差灰度矩阵,在此基础上对$L_s$进行补偿,即$L_s=L_s+\Delta L_s$。

(3)将对数差灰度矩阵$\boldsymbol{L}_s(x,y)$代入直纹曲面模型进行求解,为了便于计算可以用矩阵计算形式表示为$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}$。

当测量边缘为直线$ax+by+c=0$时有

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}a\\b\\c\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\overline{x} & \overline{y} & 1\\ \overline{xy} & \overline{y^2} & \overline{y}\\ \overline{x^2} & \overline{xy} & \overline{x}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\overline{L_s}\\ \overline{L_sy}\\ \overline{L_sx}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{6}$$

当测量边缘为圆曲线$x^2+y^2-a-bx-cy=0$时有

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}a & b & c & d & e\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & \overline{x} & \overline{y} & \overline{L_s} & \overline{L_s^2}\\ \overline{x} & \overline{x^2} & \overline{xy} & \overline{xL_s} & \overline{xL_s^2}\\ \overline{y} & \overline{xy} & \overline{y^2} & \overline{yL_s} & \overline{yL_s^2}\\ \overline{L_s} & \overline{xL_s} & \overline{yL_s} & \overline{L_s^2} & \overline{L_s^3}\\ \overline{L_s^2} & \overline{xL_s^2} & \overline{yL_s^2} & \overline{L_s^3} & \overline{L_s^4}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\overline{x^2}+\overline{y^2}\\ \overline{x^3}+\overline{xy^2}\\ \overline{x^2y}+\overline{y^3}\\ \overline{x^2L_s}+\overline{y^2L_s}\\ \overline{x^2L_s^2}+\overline{y^2L_s^2}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{7}$$

(4)使用数学计算软件代入直纹曲面模型进行求解得到测量边缘表达式,进而求得被测尺寸参数。

应用直纹曲面模型边缘检测时,选取曲面拟合区域为沿边缘方向的带状域,利用直纹曲面特征,在应用边缘检测模型前将提取区域像素点信息进行处理,得到对数差灰度矩阵。对于直边缘和圆弧边缘等已知方程的待测边缘可用一次性求解方式,将所

有粗边缘点一次代入模型进行计算，直接得到边缘方程参数进而得到边缘方程和测量尺寸；对于复杂的无法确定方程形式的曲线边缘可采用分段拟合方式，沿着边缘导线方向建立以像素级边缘点为原点的活动坐标系，在设定的窗口内进行求解，将复杂边缘分成简单的直线段和圆弧段，逐段求解亚像素边缘点；最后，应用最小二乘法[24-25]获取边缘轮廓并计算尺寸参数。

2　试验

2.1　视觉测量系统

视觉测量系统如图 2 所示，主要包括全帧型面阵 CCD 相机、TC2348 型双远心镜头、LED 平行光源、测量平台、物距调节机构、立柱以及大理石工作台和计算机。其中，相机分辨率为 2 448 像素 × 2 050 像素，像素尺寸为 3.45 μm × 3.45 μm；双远心镜头视场范围为 48 mm × 36 mm，畸变率小于 0.1%，景深 20 mm；光源控制器采用脉宽调制方法，分 1 000 级调节，对应光源电压为 0 ~ 24 V，测量平台为中空结构，内部放置 LED 平行光源，上表面用玻璃覆盖；计算机使用 Intel(R) Core(TM) i5 - 8500 CPU，内存 8 GB，64 位 Windows 10 操作系统。标定与测量程序基于 Matlab R2020b 软件进行编写。



图 2　视觉测量系统

Fig. 2　Visual measurement system

视觉测量系统工作过程为：被测工件放置在测量平台玻璃盖板上，通过物距调节机构和立柱水平移动实现镜头、光源和被测工件之间的位置调整。在试验测量系统条件下，光源等级为 82 级时，图像达到饱和状态，即图像背景灰度为 255，归一化后 $G(x,y)=1$。采用背光源照明方式获取清晰的数字背光图像，经图像采集卡将图像存入计算机。对于获取的测量图像，采用全域高斯滤波进行预处理，尽可能减少随机噪声对测量的影响。分析图像灰度分布信息，利用边缘定位算法提取亚像素边缘。

2.2　系统标定

在系统硬件参数、物距确定情况下，像素当量固定，物理尺寸与像素尺寸关系为

$$A_r=\frac{L}{N} \tag{8}$$

式中　A_r——像素当量

L——物理尺寸

N——像素尺寸

像素当量标定采用点阵标定板（图 3）由 7 行 7 列 49 个等直径的圆构成，圆直径为 2 mm，圆心距为 4 mm，几何误差为 1 μm。先将点阵标定板放置在相机视野中央，在标准物距设定下光源等级为 82 级，进行采集图像，再应用本文算法提取点阵标定板中心区域的 3 行 3 列 9 个标定圆的亚像素边缘，拟合出圆心坐标。光强变化会使边缘定位结果在边缘法向发生偏移，而圆心距不受边缘位置变化的影响，因此可根据圆心距物理尺寸和像素尺寸比值求得像素当量。最后，计算中心点到其周围 8 个圆心像素距离和，求出圆心距平均像素尺寸，进而确定 A_r 为 19.472 1 μm/像素为视觉测量系统像素当量值。

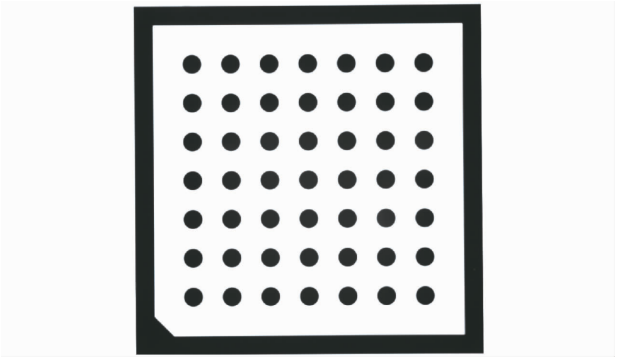


图 3　点阵标定板

Fig. 3　Lattice calibration plate

直纹曲面模型通过给对数灰度矩阵元素直接加 ΔL_s 即可实现提取的亚像素边缘在边缘法线方向上的移动，直接实现光强标定。以尺寸为 5 mm 的一等量块为测量对象，当 ΔL_s 为 -0.2 ~ 0.2 时，每间隔 0.01 计算一次测量值与理论尺寸差值，记为量块测量误差，当 $\Delta L_s=0.13$ 时，量块像素距离为 256.772 像素，测量误差最小值为 -0.11 μm。为验证补偿系数设定值是否合理，分别对 2、3、4 mm 量块进行误差测量试验，平均测量误差绝对值小于 1 μm，确定光强补偿系数 ΔL_s 为 0.13。

2.3　量块边缘定位误差试验

根据国家标准 1 ~ 10 mm 的一等量块测量面精度为 0.05 μm。鉴于量块具有测量面精度高、边缘形式简单的特性[26]，有利于高精度提取边缘。因此，使用本文算法和高斯曲面拟合算法对一等量块进行亚像素边缘定位，验证本文算法有效性。

在对量块图像边缘定位时，考虑到提取区域过大会降低运算速度，提取区域过小会降低拟合精度等问题，本文以像素级边缘为中心取 7 × 7 的窗口作为拟合单位，窗口沿着边缘切向等步长移动逐一拟

合得到亚像素级边缘点。以像素级边缘坐标(1 322 像素,1 115 像素)点为例,其对应的边缘过渡带计算窗口如图 4 所示,在窗口中应用本算法即可得到亚像素级边缘点(1 321.993,1 115.304)像素。

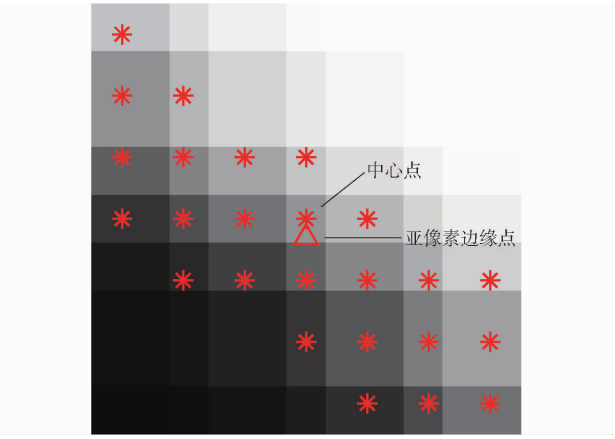


图 4 边缘过渡带计算窗口

Fig. 4 Edge transition zone calculation window

使用本文算法和高斯曲面拟合法对同一量块灰度图像的测量边缘段进行亚像素边缘定位,结果如图 5 所示,算法和高斯曲面拟合算法定位的亚像素边缘具有一致性,表明本文算法的有效性。计算亚像素边缘点到拟合直线距离如图 6 所示。可以看出,本文算法相比于高斯曲面拟合算法,定位的亚像素边缘局部跳跃量更小,边缘更加平滑,直线度误差为 0.6 μm,具有较更强的抗噪能力。

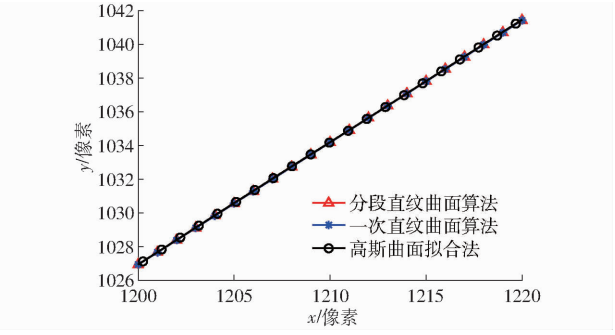


图 5 3 种算法拟合的亚像素边缘

Fig. 5 Sub-pixel edge location results of three algorithms

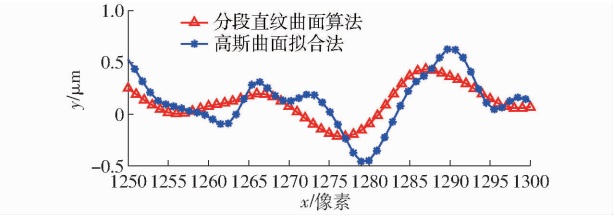


图 6 亚像素边缘点到拟合直线距离

Fig. 6 Distance from sub-pixel edge point to fitting line

从计算效率上看,相同软硬件条件下,应用 Matlab 软件的程序运行计时功能测得高斯曲面拟合算法程序执行时间为 43 ms,应用本文算法程序执行时间为 13 ms,计算速度相比高斯曲面拟合算法提高 3.3 倍。

为了验证算法测量精度,应用 2 种算法对 2、3、4 mm 3 种尺寸量块的不同位姿进行多次图像测量。使用本文算法一次拟合方法、分段拟合方法和高斯曲面拟合算法定位量块直线边缘。对一侧边缘点应用最小二乘法拟合成直线,计算另一侧亚像素级边缘点到拟合直线平均距离,理论距离与实测距离差值[27]为测量误差。3 种算法测量误差结果如表 1 所示。采用本文算法定位亚像素边缘可靠性更高,与高斯曲面拟合算法相比测量误差更小,平均误差小于 1 μm,可以实现亚像素边缘精确定位。

表 1 量块尺寸测量误差对比

Tab. 1 Comparison of measurement errors in block size μm

量块尺寸/mm	位姿	本文算法		高斯算法
		一次拟合	分段拟合	
2	1	−0.956	−1.001	−2.796
	2	−1.018	−1.002	−2.168
	3	0.093	1.003	−5.133
3	1	1.089	1.108	−3.199
	2	0.524	0.636	−4.314
	3	−1.600	−1.600	−3.283
4	1	1.605	1.360	−2.940
	2	−0.241	−0.544	−2.984
	3	−0.158	−0.606	−3.187
平均测量误差		−0.735	−0.664	−3.333

2.4 内齿轮齿廓总偏差测量试验

所测对象为标准的渐开线直齿圆柱内齿轮,其模数 m 为 2 mm,齿数 z 为 60,压力角 α 为 20°,外径 D 为 170 mm,精度等级 8 级。使用视觉测量方法对内齿轮进行偏差测量时,需定位齿圈外圆弧边缘点和内齿轮齿廓边缘点信息,由外圆弧边缘点确定内齿轮中心,进而计算齿廓边缘点初始相位角。具体步骤为:

(1)内齿轮数字图像采集:调节相机到标准物距、光源强度设置为 82 级,保持镜头、光源和内齿轮的相对位置不变,设置内齿轮每次转动一个齿所对应的角度,连续采集 60 幅被测齿轮的局部图像。

(2)对图像进行预处理,高斯滤波后通过双阈值法确定出图像边缘过渡带。

(3)使用基于直纹曲面模型的亚像素边缘定位算法定位内齿轮外圆弧边缘,应用最小二乘法进行定半径圆拟合,获得该幅图像中内齿轮中心位置。

(4)使用基于直纹曲面的亚像素边缘定位算法提取齿廓边缘,将该图像中局部齿轮的中心与测量区域齿廓点分别代入内齿轮齿廓总偏差测量模型与单个齿距偏差测量模型中,计算出内齿轮偏差。

视觉测量系统采集的内齿轮局部图像，如图 7 所示。亚像素外圆弧边缘定位结果如图 8 所示。亚像素齿廓边缘定位结果如图 9 所示。

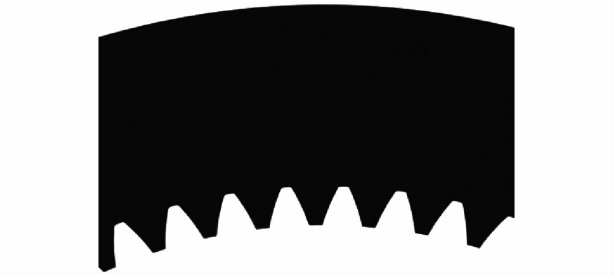


图 7　内齿轮图像

Fig. 7　Internal gear image

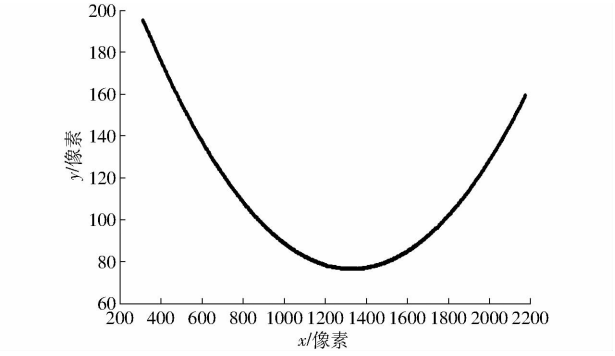


图 8　内齿轮外圆亚像素边缘

Fig. 8　Sub-pixel edge of outer circle of internal gear

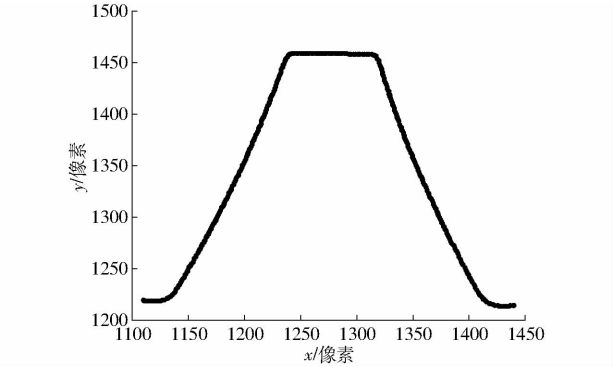


图 9　亚像素齿廓边缘

Fig. 9　Sub-pixel tooth profile edge

内齿轮齿廓总偏差测量时，目标齿为距离镜头中心最近的轮齿，每隔 3 个齿选取 1 幅局部内齿轮图像，每幅图像中的目标齿处理方式相同，提取这 15 幅图像中的内齿轮外圆弧及齿廓边缘点，每幅图像都能通过定半径圆拟合得到一个内齿轮中心位置，利用齿廓边缘点计算出每个点初始相位角，根据齿廓总偏差计算模型计算出齿廓总偏差，如表 2 所示。

表 2　内齿轮齿廓总偏差测量结果

Tab. 2　Total deviation measurement results of internal gear tooth profile　μm

被测齿序	左齿廓	右齿廓
4	9.84	10.12
8	12.20	11.58
12	12.80	10.62
16	8.00	11.09
20	14.34	13.95
24	6.07	7.56
28	8.50	8.16
32	11.74	13.05
36	12.13	9.74
40	7.56	10.52
44	6.31	14.03
48	9.56	13.72
52	6.85	10.00
56	13.43	13.08
60	6.59	14.21

从表 2 可以看出，所测得的齿廓偏差最大值为 14.34 μm 均小于最大允许值（GB/T 10095），满足齿轮齿廓总偏差精度要求。

3　结束语

分析现有边缘提取算法优缺点基础上提出了一种基于直纹曲面模型的边缘检测算法，直纹曲面模型由符合边缘灰度曲面特征的 sigmoid 曲面进行变换得到，具有 sigmoid 函数特性。与基于高斯曲面的亚像素边缘定位方法相比，直纹曲面模型求解方法更简便。试验结果表明，基于直纹曲面模型边缘检测算法边缘定位精度可达到微米级，计算速度相比高斯曲面算法提高 3.3 倍，满足高精度零件测量要求，测量结果可靠。

参　考　文　献

[1]　杨杰伟. 基于机器视觉的齿轮在线检测系统的研究[D]. 天津：天津工业大学，2017.
YANG Jiewei. Research on online gear inspection system based on machine vision[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017. (in Chinese)

[2]　段瑞玲，李庆祥，李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术，2005，31(3)：415－419.
DUAN Ruiling, LI Qingxiang, LI Yuhe. Summary of image edge detection[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 415－419. (in Chinese)

[3]　王植，贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报，2004，9(8)：957－962.
WANG Zhi, HE Saixian. An adaptive edge-detection method based on Canny algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(8): 957－962. (in Chinese)

[4]　李开平，蔡萍. 数字图像相关方法的亚像素算法性能研究[J]. 仪器仪表学报，2020，41(8)：180－187.
LI Kaiping, CAI Ping. Study on the performance of sub-pixel algorithm for digital image correlation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 180－187. (in Chinese)

[5] 孔盛杰,黄翔,周崩,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021,42(4):247 - 255.
KONG Shengjie, HUANG Xiang, ZHOU Kuai. Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 247 - 255. (in Chinese)
[6] 刘浩,任宏,赵丁选,等. 基于亚像素定位的图像边缘检测策略研究[J]. 农业机械学报,2024,55(2):242 - 248.
LIU Hao, REN Hong, ZHAO Dingxuan, et al. Image edge detection strategy based on sub-pixel location[J]. Transaction of the Chinese Scoiety for Agricultral Machinery, 2024, 55(2): 242 - 248. (in Chinese)
[7] HERMOSILLA T, BERMEJO E, BALAGUER A, et al. Non-linear fourth-order image inerpolati on for subpixel edge detection and localization[J]. Image Vision Comput, 2008, 26(9): 1240 - 1248.
[8] 陆明洲,光二颖,陈子康,等. 基于双视角图像的山羊体尺自动测量方法[J]. 农业机械学报,2023,54(8):286 - 295.
LU Mingzhou, GUANG Erying, CHEN Zikang, et al. Automatic measurement method of goat body size based on double vision angle camera image[J]. Transaction of the Chinese Scoiety for Agricultral Machinery, 2023, 54(8): 286 - 295. (in Chinese)
[9] TAN J B, AO L, CUI J W, et al. Subpixel edge location based on orthogonal Fourier-Mellin moments[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(4): 563 - 569.
[10] 王宁,段振云,赵文辉. 基于 Bertrand 曲面模型的边缘检测算法[J]. 光子学报,2017(10):179 - 186.
WANG Ning, DUAN Zhenyun, ZHAO Wenhui. Algorithm of edge detection based on Bertrand surface model[J]. Acta Photonica Sinica, 2017(10): 179 - 186. (in Chinese)
[11] 魏本征,赵志敏,华晋. 基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(4):838 - 844.
WEI Benzheng, ZHAO Zhimin, HUA Jing. Sub-pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 838 - 844. (in Chinese)
[12] 孙秋成,周亚洲,宁闯,等. 基于三次样条插值的亚像素边缘检测方法[J]. 控制工程,2014,21(2):290 - 293.
SUN Qiucheng, ZHOU Yazhou, NING Chuang, et al. A sub-pixel edge detection method based on cubic spline interpolation [J]. Control Engineering of China, 2014, 21(2): 290 - 293. (in Chinese)
[13] LEE S W, LEE S Y, PAHK H J. Precise edge detection method using sigmoid function in blurry and noisy image for TFT - LCD 2D critical dimension measurement[J]. Current Optics and Photonics, 2018, 2(1): 69 - 78.
[14] 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.
DUAN Zhenyun, 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)
[15] 段振云, 庞文琦, 张静,等. 基于逻辑回归的测量图像亚像素边缘定位[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(12): 97 - 100.
DUAN Zhenyun, PANG Wenqi, ZHANG Jing, et al. Sub-pixel edge location of measurement image based on logistic regression [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(12): 97 - 100. (in Chinese)
[16] TRUJILLO-PINO A, KRISSIAN K. Accurate subpixel edge location based on partial area effect[J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(1): 72 - 80.
[17] ZHIMULEVA E S, ZAVYALOV P S, KRAVCHENKO M S. Development of telecentric objectives for dime- nsional inspection systems[J]. Optoelectronics Instrumentation & Data Processing, 2018, 54(1): 52 - 60.
[18] 王侨,刘卉,杨鹏树,等. 基于机器视觉的农田地头边界线检测方法[J]. 农业机械学报, 2020,51(5):18 - 27.
WANG Qiao, LIU Hui, YANG Pengshu, et al. Detection method of headland boundary line based on machine vision[J]. Transaction of the Chinese Scoiety for Agricultral Machinery, 2020, 51(5): 18 - 27. (in Chinese)
[19] 李龙. 基于卷积神经网络的圆锯片基体尺寸视觉检测技术研究[D]. 济南:山东大学,2020.
LI Long. Visual detection technologies of dimension of circular saw blade based on convolutional neural network[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
[20] 徐平,薛凌云,常英杰. 汽车发动机进气歧管高精度亚像素边缘检测[J]. 计量学报,2018,39(3):321 - 325.
XU Ping, XUE Lingyun, CHANG Yingjie. Subpixel edge detection with high precision for vehicle engine intake manifolds[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(3): 321 - 325. (in Chinese)
[21] 王嘉喆,王慧琴,刘瑞,等. 基于分区域自适应阈值 Zernike 矩的骨签轮廓尺寸测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023,60(14):433 - 437.
WANG Jiazhe, WANG Huiqin, LIU Rui, et al. Bone stick contour dimension measurement based on sub-regional adaptive threshold Zernike moments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(14): 433 - 437. (in Chinese)
[22] SUN Zhaohui, YANG Feng, GUO Peng, et al. Flash-based in-memory compiting for stochastic computing in image edge detection[J]. Journal of Semiconductors, 2023, 44(5): 159 - 164.
[23] CHERNOV N, LESORT C. Least squares fitting of circle[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2005(23): 239 - 252.
[24] 刘珂,周富强,张广军. 半径约束最小二乘圆拟合方法及其误差分析[J]. 光电子激光,2006(5):604 - 607.
LIU Ke, ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun. Radius constraint least-square circle fitting method and error analysis[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006(5): 604 - 607. (in Chinese)
[25] FEI Z G, XU X J, ANTHIMOS G. Short-arc measurement and fitting based on the bidirectional prediction of observed data[J]. Measurement Science and Technology, 2016(27): 025013.
[26] YANG Y J, ZENG W, SONG T Q. Optimizing conformality of NURBS surface by general bilinear transformation[J]. Computer-Aided Design, 2015, 63: 12 - 25.
[27] RAVARI A N, TAGHIRAD H D. Reconstruction of B-spline curves and surface by adaptive group testing[J]. Computer-Aided Design, 2016, 74: 32 - 44.