

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615335

基于改进 F 范数齿廓亚像素边缘检测算法^{*}

支 珊¹, 刘琪瑞¹, 石先润¹, 杜 坡²

(1. 辽宁科技学院机械工程学院 本溪 117004; 2. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘 要:针对视觉测量齿廓图像边缘异常引发偶然性测量误差的问题,提出了一种基于拉依达准则 F 范数齿廓亚像素边缘检测算法。首先,通过高斯滤波和灰度双阈值二值法,获取齿廓的像素级定位边缘;然后,根据渐开线性质和齿轮参数的计算公式,确定齿廓边缘过渡带内点 P_k 对应的 10 个渐开线齿廓参数,创建完整齿廓参数信息矩阵;根据渐开线形成原理,将齿廓边缘过渡带内的点逆向映射在基圆周上,通过对基圆相位角 τ_i 离散分割,实现对渐开线齿廓像素级边缘切向的等弧长量化分割,从而构造出 Bertrand 灰度曲面模型;最后,利用改进 F 范数和 2σ 拉依达准则,剔除 Bertrand 灰度曲面模型 Σ_i 内的异常测量点,再对筛选后的边缘过渡带的点利用灰度重心法检测齿廓亚像素边缘,获取亚像素级齿廓定位边缘,通过计算齿廓渐开线的初始相位角,实现齿轮齿距测量。试验结果表明:该算法测量单个齿距的结果与改进 Bertrand 灰度曲面模型齿距视觉测量算法测量齿距的结果接近,最大偏差为 $1.1\ \mu\text{m}$;该方法测量单个齿距的结果与三坐标测量机测量齿距的结果,最大偏差为 $2.3\ \mu\text{m}$,平均偏差为 $0.9\ \mu\text{m}$,标准差为 $1.4\ \mu\text{m}$ 。试验结果表明,提出的改进 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法能够快速、高精度检测单个齿距偏差。可以满足 5 级精度直齿圆柱齿轮的齿距测量精度的较高要求。

关键词: 机器视觉;图像边缘异常;Bertrand 曲面; F 范数;齿轮

中图分类号: TH161+.12 TH741 TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

A tooth profile subpixel edge detection algorithm based on the improved F -norm

Zhi Shan¹, Liu Qirui¹, Shi Xianrun¹, Du Po²

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To address random measurement errors caused by edge anomalies in tooth-profile images during vision-based measurement, a sub-pixel edge detection algorithm for tooth profiles based on the Pauta criterion and the Frobenius norm is proposed. First, the local gear image is preprocessed using Gaussian filtering and dual-threshold gray-level binarization to obtain the pixel-level edge location of the tooth profile. Then, according to the properties of the involute curve and gear parameter calculation formulas, ten involute tooth-profile parameters corresponding to point P_k in the tooth-profile edge transition zone are determined, and a complete tooth-profile parameter information matrix is established. Based on the generation principle of the involute curve, the points in the tooth-profile edge transition zone are inversely mapped onto the base circle. By discretely dividing the base-circle phase angle τ_i , equal-arc-length quantized segmentation along the tangential direction of the pixel-level involute tooth-profile edge is achieved, thereby constructing a Bertrand gray surface model. Finally, the improved F -norm and the 2σ Pauta criterion are used to eliminate outliers in the Bertrand gray surface model Σ_i . The gray centroid method is then applied to the filtered points in the edge transition zone to detect the sub-pixel edge of the tooth profile, thereby obtaining the sub-pixel-level toothprofile edge location. Gear pitch measurement is realized by calculating the initial phase angle of the involute tooth-profile. The experimental results show that the single-pitch measurement results obtained using the proposed algorithm are close to those obtained using the improved Bertrand gray surface model-based visual pitch measurement algorithm, with a maximum deviation of $1.1\ \mu\text{m}$. Compared with the pitch measurement results obtained using a coordinate measuring machine, the proposed method achieves a maximum deviation of $2.3\ \mu\text{m}$, a mean deviation of $0.9\ \mu\text{m}$, and a standard deviation of $1.4\ \mu\text{m}$. These

收稿日期: 2026-05-23 Received Date: 2026-05-23

^{*} 基金项目: 广东省机器人与智能系统重点实验室开放基金项目(2924040132)资助

results demonstrate that the proposed improved F -norm based gray centroid sub-pixel edge detection algorithm rapidly and accurately detects single-pitch deviation. The proposed algorithm can meet the high precision requirements for pitch measurement of grade-5 spur gears.

Keywords: machine vision; image edge anomalies; bertrand surface; F -norm; gear

0 引 言

基于机器视觉测量齿轮具有速度快、非接触、分辨率高、图像边缘信息丰富、环境适应性强等优点,适用于加工过程中的齿轮进行在线测量,可以及时反馈齿轮各项参数误差^[1-3]。齿廓高精度的边缘定位是提高齿轮测量精度的关键步骤。采用亚像素边缘检测算法则可以突破相机和镜头的物理分辨极限,提高齿轮的测量精度^[4-6]。然而,在实际测量中,难以保证齿轮表面不受环境污染,比如油污、毛刺,以及微小异物等,导致测量误差^[7-9]。但是,在测量 5 级精度中小模数直齿圆柱齿轮时,要求齿廓边缘定位精度达到 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ($0.1 \sim 0.2 \text{ pixels}$),仅对齿廓亚像素边缘检测,不能剔除异常点,无法满足 5 级精度齿轮的测量要求^[9-11]。因此,研究快速、高精度齿轮边缘检测算法,成为提高视觉测量齿轮精度的重要课题^[12-13]。

有效剔除齿轮图像异常点是一项关键技术挑战,近年来国内外学者围绕该课题开展了多项研究。赵林等^[14]提出一种基于多尺度特征融合与分块注意力的分割网络算法,利用加权联合损失函数、Dice 损失、BCE 损失,以及梯度差异约束,解决齿轮细微缺陷区域质量问题;方一鸣等^[15]针对塑料齿轮黑点缺陷成因,采用 U-Net++ 的检测方法预测并修正了齿轮黑点区域,结合多特征融合分析评定黑点位置与大小的准确性。缺陷检测在实现零缺陷制造和提高制造系统可持续性方面起着重要作用。齿轮类型的多样性、端面结构的不均匀性,以及缺陷的体积小和多尺度,都是金属齿轮端面缺陷检测中常见的问题,这导致现有检测方法在检测率和精度方面表现不佳。Su 等^[16]提出了一种级联组合 SR-ResNetYOLO 方法,通过放大 16 倍采样区域,结合多尺度融合自动检测齿轮图像缺陷。上述方法,均基于深度学习方法对被测齿轮全局图像参数化遍历,由卷积和最大池化构成一系列降采样操作,最终锁定并去除齿轮黑点区域的异常点。

针对 Bertrand 曲面模型的亚像素边缘检测算法,不少学者也有深入研究。王宁等^[17]提出了基于 Bertrand 曲面模型的亚像素边缘检测算法,该方法可以达到微米级的齿廓边缘定位精度,但齿轮测量速度和精度有待提高;支珊等^[10]提出了齿距视觉测量的齿廓图像边缘失真修正算法,虽然测量速度和精度均有提高,但检测算法相对复杂。上述方法实质是在分割后的 Bertrand 曲面模型内,

计算齿廓亚像素边缘与像素级边缘的法向距离函数,进而确定齿轮齿廓亚像素边缘,属于典型的亚像素级灰度曲面拟合方法。在此基础上,采用齿廓图像边缘失真修正算法,再次对齿廓边缘进行分段修正,算法复杂、计算量大。

本文获取被测齿轮图像是中小模数直齿圆柱齿轮的局部图像,利用双阈值二值法,重点锁定齿轮齿廓边缘过渡带曲面区域;利用渐开线方程和渐开线特性构建齿廓边缘参数模型,创建齿廓参数数组;根据齿廓边缘过渡带内点的法线垂直于该点的切线性质,构建 Bertrand 曲面模型;最后,利用改进 F 范数和拉依达准则,剔除 Bertrand 灰度曲面模型内的异常点。论文结合齿轮成形原理和图像处理理论,提出一种新的齿廓亚像素边缘失真修正检测算法,并且,通过实验验证了该测量方法的准确性。

1 齿轮图像预处理

利用工业相机获取被测齿轮灰度图像,如图 1 所示。高斯滤波可以平滑图像和消除噪声,提高齿轮图像边缘检测的准确性,滤波后的齿轮图像,如图 2 所示。为保证图像边缘连续性,采用灰度双阈值二值法,获取齿轮的像素级边缘^[18],如图 3 所示。



图 1 获取局部齿轮图像
Fig. 1 Acquired local gear image



图 2 高斯滤波后的齿轮图像
Fig. 2 Gear image after Gaussian filtering

测量时采用平行背光光源投影,可以有效消除齿轮轮廓偏移,提升图像对比度和边缘定位精度。当调整光源亮度时,使图像达到饱和状态,即背景灰度值达到最大 $g_{\max} = 255$,前景灰度 $g_{\min} = (10 \sim 15)$,图像平均灰度 $g_m = 135$ 。基于灰度直方图法选取双阈值,低阈值 $g_1 = 105$,高阈值 $g_2 = 165$ 。

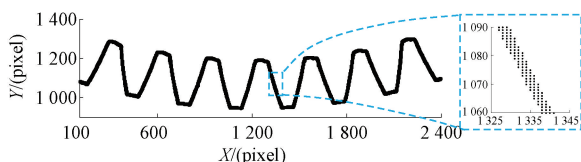


图3 像素级齿廓边缘带提取图像

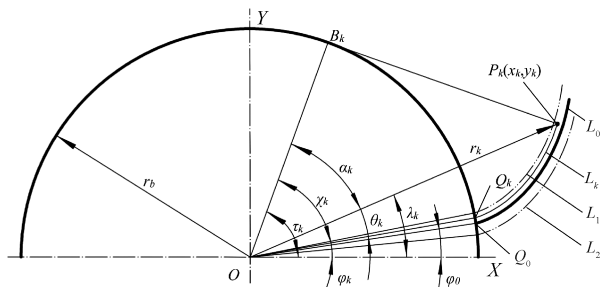
Fig. 3 Pixel-level gear contour edge band extraction image

2 齿廓边缘参数模型

齿廓边缘过渡带内像素点轨迹是利用灰度双阈值二值法提取齿廓边缘廓形的一簇渐开线。通过量化数字图像,齿廓边缘过渡带内任意像素点 P_k 具有不同灰度级 g_k 。根据渐开线性质和齿轮参数的计算公式,将每个像素点逆向映射到基圆上,可以计算每个像素点在渐开线上的位置参数分别为初始相位角、极角、极径、压力角、渐开线角,渐开线展开角等参数^[19-20]。

2.1 齿廓参数的确定

根据渐开线形成原理,构造齿廓边缘过渡带内像素点 P_k 的基本参数图,如图4所示。

图4 齿廓边缘过渡带内像素点 P_k 的基本参数Fig. 4 Basic parameter diagram of pixel P_k in the gear contour edge transition band

像素点 P_k 所在的渐开线 L_k 逆向映射到基圆上相交于点 Q_k 。根据渐开线性质,法线 $\overline{B_k P_k}$ 与基圆相切,连接基圆中心 $O(x_0, y_0)$ 与像素点 $P_k(x_k, y_k)$, 构成线段 $\overline{OP_k}$, 称为像素点 P_k 的极径 r_k ; $\overline{OP_k}$ 与 Ox 轴的夹角,称为像素点 P_k 的极角 λ_k 。

$$r_k = \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} \quad (1)$$

$$\lambda_k = \arcsin \frac{x_0 - x_k}{r_k} \quad (2)$$

渐开线齿廓边缘过渡带内像素点 P_k , 压力角 α_k 满足:

$$\alpha_k = \arccos \frac{r_b}{r_k} \quad (3)$$

渐开线角 θ_k 与压力角 α_k 具有特定函数关系,通常用符号 $\text{inv} \alpha_k$ 表示,利用极坐标方程表示为:

$$\theta_k = \text{inv} \alpha_k = \tan \alpha_k - \alpha_k \quad (4)$$

渐开线展开角 χ_k 是压力角 α_k 与渐开线角 θ_k 之和:

$$\chi_k = \tan \alpha_k = \theta_k + \alpha_k \quad (5)$$

齿廓边缘过渡带内像素点 P_k 所在渐开线的初始相位角 ϕ_k , 是渐开线 L_k 与基圆交点 Q_k 对应的相位角,公式为:

$$\phi_k = \lambda_k \pm \theta_k \quad (6)$$

其中,左齿廓取“+”符号,右齿廓取“-”符号。

根据式(5)和(6)可知,点 B_k 的相位角为:

$$\tau_k = \chi_k + \phi_k \quad (7)$$

2.2 创建齿廓参数数组

齿廓参数数组模型是对应渐开线齿廓图像边缘过渡带内像素点所有参数的离散变量的数据集合。行向量由边缘过渡带内像素点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 表示,列向量是像素点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 对应的初始相位角、极角、极径、压力角、渐开线角,渐开线展开角等参数。由此,生成一个 $n \times 10$ 的矩阵 E :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{左}i} &= \begin{bmatrix} x_{\text{左}i1} & y_{\text{左}i1} & g_{\text{左}i1} & r_{\text{左}i1} & \lambda_{\text{左}i1} & \alpha_{\text{左}i1} & \theta_{\text{左}i1} & \chi_{\text{左}i1} & \phi_{\text{左}i1} & \tau_{\text{左}i1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\text{左}ik} & y_{\text{左}ik} & g_{\text{左}ik} & r_{\text{左}ik} & \lambda_{\text{左}ik} & \alpha_{\text{左}ik} & \theta_{\text{左}ik} & \chi_{\text{左}ik} & \phi_{\text{左}ik} & \tau_{\text{左}ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\text{左}in} & y_{\text{左}in} & g_{\text{左}in} & r_{\text{左}in} & \lambda_{\text{左}in} & \alpha_{\text{左}in} & \theta_{\text{左}in} & \chi_{\text{左}in} & \phi_{\text{左}in} & \tau_{\text{左}in} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{\text{右}i} &= \begin{bmatrix} x_{\text{右}i1} & y_{\text{右}i1} & g_{\text{右}i1} & r_{\text{右}i1} & \lambda_{\text{右}i1} & \alpha_{\text{右}i1} & \theta_{\text{右}i1} & \chi_{\text{右}i1} & \phi_{\text{右}i1} & \tau_{\text{右}i1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\text{右}ik} & y_{\text{右}ik} & g_{\text{右}ik} & r_{\text{右}ik} & \lambda_{\text{右}ik} & \alpha_{\text{右}ik} & \theta_{\text{右}ik} & \chi_{\text{右}ik} & \phi_{\text{右}ik} & \tau_{\text{右}ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\text{右}in} & y_{\text{右}in} & g_{\text{右}in} & r_{\text{右}in} & \lambda_{\text{右}in} & \alpha_{\text{右}in} & \theta_{\text{右}in} & \chi_{\text{右}in} & \phi_{\text{右}in} & \tau_{\text{右}in} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{E}_{\text{左}i}$ 表示第 i 条左齿廓参数数组; $\mathbf{E}_{\text{右}i}$ 表示第 i 条右齿廓参数数组。

根据渐开线性质和齿轮参数的计算公式,保证了任意像素点参数唯一性。齿廓参数数组模型将齿廓边缘过

渡带内像素点参数规范化和统一化。建立完整齿轮参数信息矩阵,创建各参数的逻辑联系,简化了算法的冗余,提高了计算和数据的检索速度,为基于改进 Bertrand 曲面模型齿距视觉快速测量算法奠定了数据基础。

3 改进 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法

3.1 Bertrand 灰度曲面的等弧长量化分割

基于 Bertrand 灰度曲面模型的齿廓边缘检测算法,是检测像素级齿廓灰度边缘,选取齿廓边缘切向方向的带状域为对象,作为拟合区域,再利用 Bertrand 灰度曲面,沿母线边缘定位点法线与母线共面的性质,对拟合曲面进行归一化灰度值拟合,计算亚像素边缘到像素级边缘的法向偏距,从而实现图像亚像素边缘的定位^[17]。Bertrand 灰度曲面的构造是算法的定位精度的关键。利用渐开线法线与基圆相切性质,将渐开线进行相等弧长分段,转化成以基圆为中心的相位角分割,从曲面构造原理上,均化渐开线曲面的面积,并且简化了计算步骤,提高了计算速度。

假设曲线 L_0 是理想亚像素级渐开线,与基圆交点是 Q_0 , φ_0 为渐开线 L_0 的平均初始相位角。 L' 和 L'' 分别是利用灰度双阈值二值法提取的两条齿廓边界,如图 5 所示。

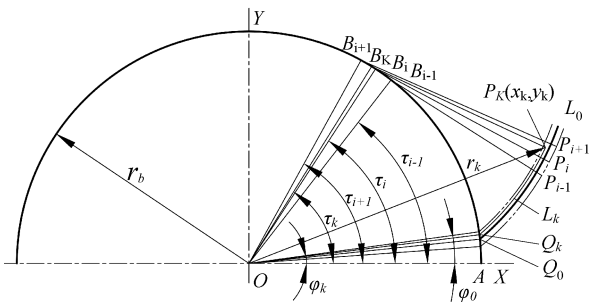


图5 Bertrand 灰度曲面的等弧长量化分割示意图

Fig. 5 Diagram of equal-arc-length quantized segmentation of the Bertrand gray surface

以理想渐开线 L_0 为基准进行等间隔分割,从而实现像素级边缘过渡带的灰度曲面 Σ 做边界的切向分割。从点 Q_0 到齿顶圆,对理想渐开线 L_0 进行相等弧长的曲面分段,得到分割曲面 Σ_i , P_i 是理想渐开线 L_0 的分割点 ($i = 1, 2, 3, \dots, M$ 是离散分割点的序号)。

由参考文献[10]可知递推公式为:

$$\tan \alpha_{i+1} = \Delta s / r_b \tan \alpha_i + \tan \alpha_i \quad (9)$$

式中: Δs 是分段弧长; r_b 是齿轮基圆半径。

根据 Bertrand 灰度曲面构造原则:沿渐开线的切向

和法向划分区域,由直线 $\overline{P_i B_i}$ 和 $\overline{P_{i+1} B_{i+1}}$ 分割出的像素级边缘过渡带的灰度曲面,称为 Bertrand 灰度曲面 Σ_i , 即应满足如下条件:

$$\tau_i \leq \tau_k \leq \tau_{i+1} \quad (10)$$

式中: $\tau_k = \tan \alpha_k + \varphi_k$, 根据式(7)可知, τ_k 是点 P_k 所在渐开线 L_k 该点处的切向相位角; $\tau_i = \tan \alpha_i + \varphi_0$, 是理想渐开线 L_0 在分割点 P_i 处的切向相位角。

利用上述公式将像素级边缘过渡带的灰度曲面 Σ 划分问题从复杂的曲线计算转化为简单的代数运算,利用渐开线性质的构造 Bertrand 灰度曲面模型,提高了齿廓边缘检测速度。通过选取不同大小的分段弧长 Δs , 进而改变 Bertrand 灰度曲面 Σ_i 切向分割的区域长度和曲面 Σ_i 内像素点的数量,由此保证灰度曲面的拟合精度和亚像素级齿廓定位点的检测精度。

3.2 改进 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法

由于图像边缘存在异常,如毛刺、油污和光斑等,影响齿廓定位精度,导致齿距测量精度不高。根据拉依达准则,剔除齿廓边缘异常。

1) 剔除异常值

对于矩阵 $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$, F 范数 (Frobenius norm) 是矩阵 A 所有元素的平方和,再开方:

$$\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_{i,j}|^2} \quad (11)$$

在 Bertrand 灰度曲面 Σ_i 内,矩阵 $A(x_k, y_k) \in \Sigma_i$, 找到一个单位向量 $\vec{v}_i$, 计算投影结果 $\vec{y}_k = x_k \vec{v}_i$ 的 L^2 范数:

$$\|\vec{y}_k\| = \|x_k \vec{v}_i\|, \text{ 且满足 } \|\vec{v}_i\| = 1 \quad (12)$$

对于列向量 $\vec{y}$ 的元素 y_k 就是在 $\vec{v}_i$ 方向上, y_k 到原点的距离,而 $\hat{y}$ 是列向量 $\vec{y}$ 最优解,则:

$$\|\vec{y} - \hat{y}\| = \sqrt{\sum_{p=1}^{\Sigma_i} s_p^2} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_{\Sigma_i}^2} \quad (13)$$

在 Bertrand 灰度曲面 Σ_i 内,通过最小化齿廓边缘过渡带内的点和投影 $\vec{v}_i$ 方向上的距离 s_p , 如图 6 所示。

在 Bertrand 灰度曲面 Σ_i 内,齿廓边缘过渡带内的点和投影 $\vec{v}$ 方向上的距离 s_i , 近似服从正态分布,如果 s_i 满足 $|s_i - \mu| > 2\sigma$, 则该值被判定为异常值。其中, μ 是算术平均值; σ 是标准差。齿廓边缘过渡带内的点和投影 $\vec{v}$ 方向上的距离 s_i 落在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 内的概率约为 95.44%。剔除齿廓边缘异常点后的 Bertrand 灰度曲面图像,如图 7 所示。

利用改进 F 范数和拉依达准则,在齿轮像素级边缘过渡带分割后的第 i 段灰度曲面 Σ_i 内,剔除边缘过渡带中的异常测量点,保留灰度曲面 Σ_i 内符合正态分布的齿廓边缘定位点,为齿廓亚像素边缘检测算法,提供了可靠

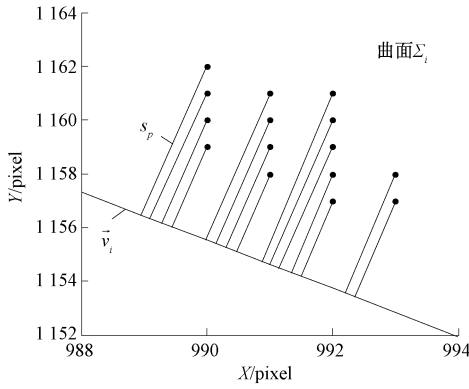


图 6 第 i 段灰度曲面边缘过渡带内的点投影在 $\vec{v}_i$ 方向上的距离 s_p

Fig. 6 Projection distance S_p of points on the i -th segment grayscale surface edge transition band in the direction $\vec{v}_i$

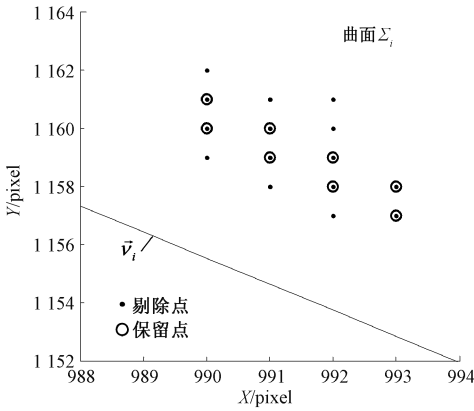


图 7 剔除齿廓边缘异常点后的 Bertrand 灰度曲面图像

Fig. 7 Bertrand grayscale surface image after removing abnormal gear contour edge points

的数据支持。

2) 齿廓亚像素边缘检测算法

灰度重心法是图像亚像素定位的经典算法。主要用于提取形状目标的中心。通过计算灰度的加权坐标的平均值,可以得到理论中心定位。

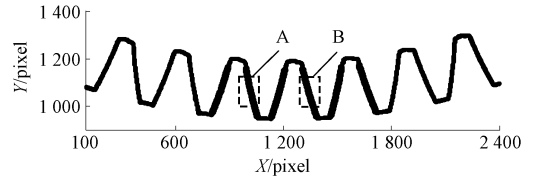
在 Bertrand 灰度曲面 Σ_i 内,设像素点 $P_k(x_k, y_k)$ 处对应的灰度值为 g_k , 则亚像素灰度重心坐标,如式 (14) 和 (15) 所示。

$$X_i = \frac{\sum_{k=1}^{k \in \Sigma_i} x_k \cdot g_k(x_k, y_k)}{\sum_{k=1}^{k \in \Sigma_i} g_k(x_k, y_k)} \quad (14)$$

$$Y_i = \frac{\sum_{k=1}^{k \in \Sigma_i} y_k \cdot g_k(x_k, y_k)}{\sum_{k=1}^{k \in \Sigma_i} g_k(x_k, y_k)} \quad (15)$$

式中: x_k 和 y_k 表示像素点 $P_k(x_k, y_k)$ 处的行向量和列向量的元素; g_k 表示像素点 $P_k(x_k, y_k)$ 处对应的灰度值; $\sum_i (X_i, Y_i)$ 表示第 i 个灰度曲面段,亚像素拟合后的第 i 个边缘点 Q_i 的精确定位。

测量齿廓时,为提高测量精度和速度,仅对齿轮图像中央的 6 条左、右齿廓,进行亚像素边缘定位。由齿廓图像(图 3)计算得到齿廓亚像素边缘,如图 8(a) 所示,齿廓亚像素边缘局部放大图,如图 8(b) 和 (c) 所示。



(a) 齿廓亚像素边缘
(a) Gear sub-pixel edge

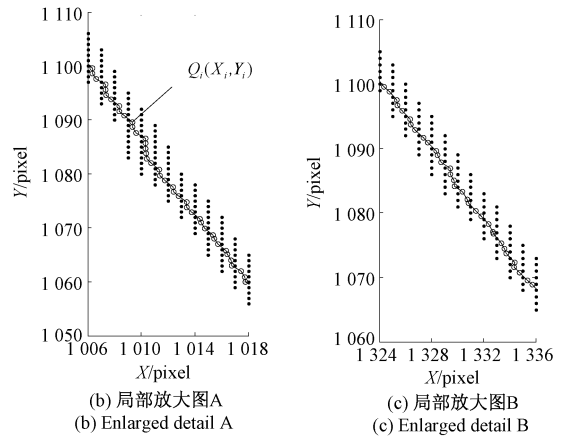


图 8 齿廓亚像素边缘定位

Fig. 8 Gear sub-pixel edge positioning image

改进 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法,是在齿廓离散后的 Bertrand 灰度曲面内,利用 F 范数算法,将灰度曲面内所有像素点投影在 $\vec{v}_i$ 方向上,计算像素点到原点的距离,通过拉依达定理,去除粗大误差,筛选 Bertrand 灰度曲面内距离的最优解,集成真实齿廓边缘定位点集,再利用灰度重心法,计算最优像素点的灰度权重,得到齿廓的边缘期望。方法从特征检测到精确定位,实现了灰度误差均化,减小奇异点对齿廓亚像素定位精度的影响。

4 实验验证

实验对象为标准渐开线直齿圆柱齿轮,齿轮参数为:

齿数 $z = 90$, 模数 $m = 2$, 变位系数 $\zeta = 0$, 精度等级 5 级, 如图 9 所示。被测齿轮通过芯轴安装在齿轮视觉测量仪上, 如图 10 所示。



图 9 被测齿轮

Fig. 9 Measured gear

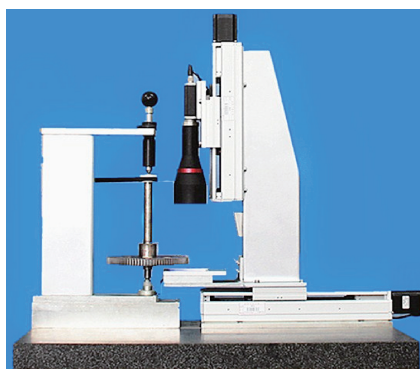


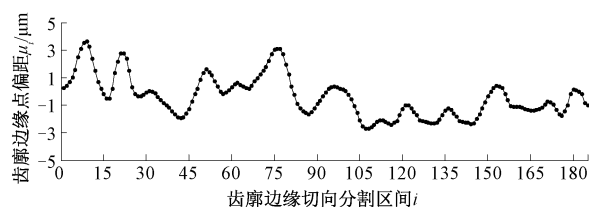
图 10 齿轮视觉测量仪结构

Fig. 10 Structure of gear vision measurement device

4.1 对比实验

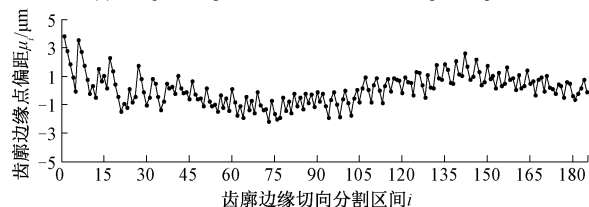
在齿轮视觉测量仪(图 10)上获取局部齿轮图像, 如图 1 所示。采用两种方法试验进行亚像素边缘检测, 方法 1 是改进 Bertrand 灰度曲面模型齿距视觉测量算法^[10]; 方法 2 是本文提出的基于 Bertrand 灰度曲面模型 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法; 提取图 1 中央位置的左、右 6 条齿廓。两者的计算时间分别为方法 1 用时 1.56 s; 方法 2 用时 1.43 s, 是采用拉依达准则剔除齿廓边缘异常点后的测量时间。其中一条齿廓的亚像素法向偏距, 如图 11 所示, 图 11(a) 所示为改进 Bertrand 灰度曲面模型的计算结果, 图 11(b) 为基于 Bertrand 灰度曲面模型 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法的计算结果。

可以看出, 两种计算方法都是亚像素定位算法, 测量精度相近, 最大偏差值为 $0.4 \mu\text{m}$, 本文算法单齿测量速度节约 0.13 s。方法 1 利用高斯拟合计算齿廓偏距, 再统计分离测量误差类型, 最终定位齿廓边缘; 方法 2 属于亚像素定位算法中的插值法, 优点是计算速度快、边缘定



(a) 原算法亚像素边缘检测结果

(a) Sub-pixel edge detection results of the original algorithm



(b) 新算法亚像素边缘检测结果

(b) Sub-pixel edge detection results of the proposed algorithm

图 11 齿廓亚像素边缘法向偏距

Fig. 11 Normal deviation of gear sub-pixel edge

位具有均化误差, 对齿廓边缘噪声有很好的抑制效果, 使齿廓边缘更加平滑, 缺点是定位精度有限, 但是本文方法结合 F 范数和拉依达准则, 在 Bertrand 灰度曲面 (1 pixel, 即约 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$) 内锁定目标区域, 通过 F 范数, 突出目标区域的纹理特征和异常点, 突出图像的鲁棒性, 通过拉依达准则去除边缘异常点, 筛选后的边缘像素点, 再次缩小目标定位区域; 最后, 计算灰度重心加权定位齿廓边缘中心, 从而获得齿廓边缘的高精度定位。

4.2 单个齿距偏差测量实验

被测齿轮(图 9)是逐齿拍摄, 选取其中的 1 副图像作为实验对象, 采用 3 种方法进行对比试验, 方法 1 是采用瑞典海克斯康 Explorer06. 10.06 型三坐标测量机, 测量精度为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$, 如图 12 所示。三坐标测量机对 3 个直齿, 每个直齿测量 7 个坐标点, 分 3 层进行齿距测量, 测量过程中的测量界面, 如图 13 所示。参考文献[10]中 $p_{dj} = r_d(\varphi_j - \varphi_{j-1})$ 和 $f_{pj} = p_{dj} - p_{dp}$; 其中, $p_{dp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^Z p_{dj}$ 为齿距测量值的平均值, Z 为被测齿轮的齿数。利用式(6)计算 φ_j , 最终得到齿距 p_{dj} 和单个齿距偏差 f_{pj} 的测量结果。方法 2 是参考文献[10]的改进 Bertrand 灰度曲面模型齿距视觉检测方法计算齿廓平均初始相位角 φ_j , 通过计算齿距 p_{dj} 和单个齿距偏差 f_{pj} 的测量结果。方法 3 是采用本文提出的改进 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法, 参考文献[10]中 $p_{dj} = r_d(\varphi_j - \varphi_{j-1})$ 和 $f_{pj} = p_{dj} - p_{dp}$; 利用式(6)计算 φ_j , 最终得到齿距 p_{dj} 和单个齿距偏差 f_{pj} 的测量结果。3 种方法的齿距偏差的试验结果, 如表 1 所示。

表 1 中, 方法 1 属于接触式测量由于逐点采集, 测量速度较慢, 但抗干扰能力强, 测量精度稳定性较高; 方法 2



图 12 Explorer06.10.06 型三坐标测量机

Fig. 12 Explorer06.10.06 type coordinate measuring machine (CMM)

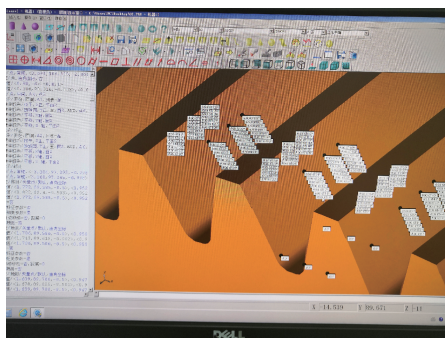


图 13 三坐标测量机测量界面

Fig. 13 Measurement interface of coordinate measuring machine

表 1 3 种方法测量的单个齿距

Table 1 Single pitch measured by three methods/ μm					
方法 1 测量齿距 P_{dj}	方法 2 测量齿距 P_{dj}	本文方法 测量齿距 P_{dj}	本文方法 与方法 1 比较差值	本文方法 与方法 2 比较差值	本文方法 测量齿距 偏差 f_{pj}
6 282.5	6 283.8	6 284.9	2.4	1.1	0.8
6 282.9	6 284.3	6 284.3	1.4	0	1.3
6 287.5	6 285.9	6 286.5	-1.0	0.6	-0.9

和方法 3 属于非接触式测量,测量精度与方法 1 的测量精度相近,但测量速度快,单齿测量时间可以达到 1 s 左右。采用本文方法测量单个齿距的结果与三坐标测量机测量齿距的结果,最大偏差为 2.3 μm ,平均偏差为 0.9 μm ,标准差为 1.4 μm ;采用本文方法测量单个齿距的结果与文献[10]测量齿距的结果接近,最大偏差为 1.1 μm ,平均偏差为 0.6 μm ,标准差为 0.4 μm 。通过实验统计结果不难看出,本文方法有效降低了异常点对测量精度的影响,并且使随机误差更小、降低了干扰因素对测量结果的波动幅度,使测量更稳定。

试验结果表明,3 种测量方法的测量精度相近,但方法 2 和方法 3 的测量速度快,适用于齿轮在线检测。本文提出的改进 F 范数灰度重心齿廓亚像素边缘检测算法能够快速、高精度检测单个齿距偏差。可以满足 5 级精度直齿圆柱齿轮的齿距测量精度的较高要求。

5 结 论

本文针对视觉测量齿廓图像边缘异常引发偶然性测量误差的问题,提出了一种基于拉依达准则 F 范数齿廓亚像素边缘检测算法。建立完整齿轮参数信息矩阵,创建各参数的逻辑联系,通过构建 Bertrand 灰度曲面,采用拉依达准则、 F 范数和灰度重心的亚像素检测相结合的算法,利用 F 范数和拉依达准则筛选异常点,聚焦 Bertrand 灰度曲面目标边缘点,使灰度重心更加接近峰值,有效解决了插值法边缘检测精度中等和抗噪性较弱的缺点,并且,计算方法简单,保留了插值法亚像素边缘检测速度快的优点。试验结果表明,该算法测量单个齿距的结果与对比结果接近,最大偏差为 1.1 μm 。本文方法测量单个齿距的结果与 Explorer06.10.06 型三坐标测量机测量齿距的结果,最大偏差为 2.3 μm ,平均偏差为 0.9 μm ,标准差为 1.4 μm 。该算法准确定位齿廓边缘,消除齿廓图像边缘异常对齿距测量的干扰,检测速度快,可以满足齿距偏差在线测量的需要。

参考文献

[1] Wang X Y, Yao T Y, Shi Z Y. Calibration method based on virtual gear artefact for computer vision measuring instrument of fine pitch gear [J]. Sensors, 2024, 24(7): 2289.

[2] 石照耀, 于渤, 宋辉旭, 等. 20 年来齿轮测量技术的发展[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1009-1024.

Shi Zhaoyao, Yu Bo, Song Huixu, et al. Development of gear measurement technology during last 20 years [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 33(9): 1009-1024.

[3] 冯志鹏, 朱萍玉, 刘立, 等. 基追踪在齿轮损伤识别中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(1): 84-89.

Feng Zhipeng, Zhu Pingyu, Liu Li, et al. Application of basis pursuit to gear damage detection [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(1): 84-89.

- [4] 石照耀, 方一鸣, 王笑一. 齿轮视觉检测仪器与技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 74-86.
- Shi Zhaoyao, Fang Yiming, Wang Xiaoyi. Research progress in gear machine vision inspection instrument and technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 74-86.
- [5] 方一鸣, 石照耀. 小模数直齿轮免参数并行快速测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(6): 792-805.
- Fang Yiming, Shi Zhaoyao. Parameter-free parallel fast measurement of fine-pitch spur gears[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(6): 792-805.
- [6] Wang T, Yu Z X, Chang Y K. GORR: Feature-preserving preprocessing for complex gear point clouds in line-structured light metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2026, 37(4): 045203.
- [7] 石照耀, 孙衍强. 齿轮法向啮合齿廓及其测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 8-15.
- Shi Zhaoyao, Sun Yanqiang. Gear profile of the path of contact and its measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 8-15.
- [8] 孙禾, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于改进孪生支持向量机的齿廓图像边缘失真分类研究[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 185-197.
- Sun He, Zhao Wenzhen, Zhao Wenhui, et al. Classification of edge distortion of tooth profile image based on improved twin support vector machine[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(10): 185-197.
- [9] 王笑一, 朱董杰, 刘明康, 等. 双啮测量中码特齿轮误差修正方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(12): 164-172.
- Wang Xiaoyi, Zhu Dongjie, Liu Mingkan, et al. Error correction method for master gear in double-flank measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(12): 164-172.
- [10] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 齿距视觉测量的齿廓图像边缘失真修正算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 50-57.
- Zhi Shan, Zhao Wenzhen, Zhao Wenhui, et al. Algorithm of tooth profile image with pitch measurement for edge distortion correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4): 50-57.
- [11] 李捷, 刘永, 李昊泽, 等. 基于视觉原理的齿轮参数测量方法研究[J]. 工具技术, 2022, 56(10): 147-151.
- Li Jie, Liu Yong, Li Haoze, et al. Research on gear parameter measurement method based on vision principle[J]. Tool Engineering, 2022, 56(10): 147-151.
- [12] 杜坡, 段振云, 张静, 等. 基于双目视觉的大直径零件转角高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 35-43.
- Du Po, Duan Zhenyun, Zhang Jing, et al. High-precision measurement method of the corner of large-diameter parts based on binocular vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 35-43.
- [13] 石维, 侯宇, 周世凡, 等. 基于机器视觉的斜齿轮螺旋角参数测量方法[J]. 机械传动, 2020, 44(5): 171-175.
- Shi Wei, Hou Yu, Zhou Shifan, et al. Measuring method for helical angle parameter of helical gear based on machine vision[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(5): 171-175.
- [14] 赵林, 马思奇, 方一鸣, 等. 基于多尺度特征融合与分块注意力的齿轮表面缺陷分割算法[J]. 光学精密工程, 2025, 33(22): 3536-3548.
- Zhao Lin, Ma Siqi, Fang Yiming, et al. Gear surface defect segmentation algorithm based on multi-scale feature fusion and block-wise attention[J]. Optics and Precision Engineering, 2025, 33(22): 3536-3548.
- [15] 方一鸣, 石照耀, 宋辉旭. 基于 U-Net++ 和特征融合的塑料齿轮复杂黑点检测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(9): 3020-3029.
- Fang Yiming, Shi Zhaoyao, Song Huixu. Detection method for complex dark spots on plastic gears based on U-Net++ and feature fusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(9): 3020-3029.
- [16] Su Y T, Yan P, Yi R Z, et al. A cascaded combination method for defect detection of metal gear end-face[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 439-453.
- [17] 王宁, 段振云, 赵文辉, 等. 基于 Bertrand 曲面模型的边缘检测算法[J]. 光子学报, 2017, 46(10): 179-186.

Wang Ning, Duan Zhenyun, Zhao Wenhui, et al. Algorithm of edge detection based on bertrand surface model[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10): 179-186.

- [18] 支珊, 张宇航, 廖宇杰, 等. 基于机器视觉的飞机连接件识别与分类算法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(9): 102-109.

Zhi Shan, Zhang Yuhang, Liao Yujie, et al. Machine vision-based algorithm for recognition and classification of aircraft connecting components[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(9): 102-109.

- [19] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 225-231.

Zhi Shan, Zhao Wenzhen, Zhao Wenhui, et al. Machine vision measurement method of tooth pitch based on local image of gear [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 225-231.

- [20] 支珊. 中小模数齿轮视觉测量方法与齿距测量技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.

Zhi Shan. Research on visual measurement method of medium and small module gears and tooth pitch measurement technology [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.

作者简介



支珊(通信作者), 2007 年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 2019 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为辽宁科技学院讲师, 主要研究方向为人工智能与模式识别, 精密测量与智能系统, 视感新技术。

E-mail: zs110669654@163.com

Zhi Shan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2007, and her Ph. D. from Shenyang University of Technology in 2019. She is currently a lecturer at Liaoning Institute of Science and Technology. Her main research interests include artificial intelligence and pattern recognition, precision measurement and intelligent systems, and vision-sensing new technologies.



杜坡, 2012 年于辽宁工业大学获得学士学位, 2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail: dupo@sut.edu.cn

Du Po received his B. Sc. degree from Liaoning University of Technology in 2012, and his M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015. He is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests is machine vision inspection.