

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614969

计及蜗轮侧面动态跟踪的转角精密测量方法^{*}

郑 永^{1,2}, 段高歆³, 陈 艳⁴, 张天恒^{1,2}, 何智颖^{1,2}

(1. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054; 2. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054; 3. 重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054; 4. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘 要:测量蜗轮旋转角度是评估蜗轮蜗杆传动动态性能与早期故障诊断(加工误差、装配偏心)的核心基础。目前,相关研究集中在蜗轮端面静态测量,通过优化标定、图像处理算法等达到高精度,但测量系统结构复杂且缺乏传动运行稳定性评估,不具有工程应用性。为解决测量系统灵活性并动态评估传动系统平稳性,故提出一种计及蜗轮侧面动态跟踪的转角精密测量方法。首先,对蜗轮完整旋转周期图像序列进行双边滤波与 CLAHE 增强图像,并结合 Otsu 阈值法划定感兴趣区域。其次,引入 Canny 算子改进定向快速角点与旋转二进制描述子(ORB)特征提取算法,获取高响应的稳定特征点集,并融合多尺度金字塔光流法与卡尔曼滤波器,实现相邻帧特征点的鲁棒跟踪。最后,通过构建帧间运动模型提取旋转分量,完成蜗轮相邻帧转角与累积转角解算,并基于转角波动峰峰值评估传动平稳性。实验结果表明,在不同光照、不同转速及不同齿数工况下,该方法测量的相邻帧转角平均绝对误差控制在 $0.003^{\circ} \sim 0.004^{\circ}$, 均方根误差为 $0.005^{\circ} \sim 0.006^{\circ}$, 95% 分位绝对误差为 $0.010^{\circ} \sim 0.018^{\circ}$, 累积转角与编码器结果高度一致,转角波动最大偏差控制在 0.024° 内。所提方法无需端面基准即可在蜗轮蜗杆传动过程中有效进行蜗轮转角精密测量,抗运动干扰能力强,具有良好的动态检测能力和工程应用前景。

关键词: 机器视觉; 蜗轮侧面; 动态跟踪; 转角测量; 金字塔光流法; 传动平稳性

中图分类号: TH132 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Precision measurement method for rotation angle considering dynamic tracking of worm gear flanks

Zheng Yong^{1,2}, Duan Gaoxin³, Chen Yan⁴, Zhang Tianheng^{1,2}, He Zhiying^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China; 3. School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 4. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Measuring the rotation angle of a worm wheel is the core basis for evaluating the dynamic performance of worm gear transmission and for early fault diagnosis, such as machining errors and assembly eccentricity. Currently, existing research mainly focuses on the static measurement of the worm wheel end face. Although high precision can be achieved by optimizing calibration and image processing algorithms, the measurement systems are structurally complex, lack the capability to evaluate transmission stability during operation, and thus have limited engineering applicability. To enhance the flexibility of the measurement system and dynamically evaluate transmission smoothness, this paper proposes a precise rotation angle measurement method considering dynamic tracking of the worm wheel side surface. First, bilateral filtering and CLAHE are applied to the image sequence over a complete rotation cycle of the worm wheel, and the region of interest is determined using the Otsu thresholding method. Second, the Canny operator is introduced to improve the oriented features from accelerated segment test (FAST) and rotated binary robust independent elementary features (BRIEF)

收稿日期: 2026-02-27 Received Date: 2026-02-27

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3209400)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202301161)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-M202301104)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0360)资助

(ORB) feature extraction algorithm, so as to obtain a stable feature point set with high response, and a multi-scale pyramidal optical flow method and Kalman filter are integrated to achieve robust tracking of feature points between adjacent frames. Finally, the rotational component is extracted by constructing an inter-frame motion model, thereby completing the calculation of the inter-frame rotation angle and cumulative rotation angle of the worm wheel, and the transmission smoothness is evaluated based on the peak-to-peak value of rotation angle fluctuation. Experimental results show that, under different illumination conditions, rotational speeds, and numbers of teeth, the mean absolute error of the inter-frame rotation angle measured by the proposed method is controlled within $0.003\ 9^{\circ} \sim 0.004\ 7^{\circ}$, the root mean square error is $0.005\ 3^{\circ} \sim 0.006\ 7^{\circ}$, the 95th percentile absolute error is $0.010\ 7^{\circ} \sim 0.018\ 2^{\circ}$, the cumulative rotation angle is highly consistent with the encoder results, and the maximum deviation of rotation angle fluctuation is controlled within $0.024\ 7^{\circ}$. The proposed method can effectively achieve precise measurement of the worm wheel rotation angle during worm gear transmission without requiring an end-face reference, showing strong resistance to motion interference, good dynamic detection capability, and promising engineering application prospects.

Keywords: machine vision; worm wheel flank; dynamic tracking; angular displacement measurement; pyramidal optical flow; transmission smoothness

0 引言

蜗轮蜗杆传动装置凭借其结构紧凑、大传动比、自锁性能好等优势,被广泛应用于航空航天伺服系统、精密仪器仪表高精度传动等领域^[1]。蜗轮旋转角度的测量是评估传动系统啮合状态的关键,加工误差、装配偏心及齿面磨损等因素会造成转速波动,测量的角度-时间序列可反映传动系统的平稳性,定位存在加工缺陷或局部磨损的故障齿^[2]。

目前旋转角度测量方法可分为接触式测量和非接触式测量。机械式分度台通过多齿盘啮合完成分度,精度可达亚秒级,但易受啮合磨损且设备价格高昂^[3]。角位移传感器能够实现对整周任意位置角度的直接读取,但安装过程复杂,且测量精度受温度、磁电干扰^[4]。光学式测角通过误差补偿实现高精度,但算法补偿实现困难,有延时误差^[5]。近年来,基于机器视觉的非接触式转角测量通过高分辨率工业相机获取图像,运用图像处理、特征匹配等技术解算出旋转角度,避免了接触式测量带来的磨损,能够从单幅或序列图像中提取亚像素级别的特征实现精密测量,具有低成本、灵活安装、无损测量等优势^[6]。Zhang等^[7]提出了一种基于旋转光斑图像和机器视觉的非接触式角度测量方法,通过椭圆轨迹拟合可实现非精密安装条件下的精确测量。Yan等^[8]针对旋转视觉系统的动态外方位问题,提出了几何标定方法,提高了旋转视觉系统在动态测量中的精度与稳定性。Shan等^[9]提出了基于单目视觉与协作靶标的姿态测量方法,实现俯仰角和滚转角的测量。杜坡等^[10]基于双目视觉测量大模数齿轮转角,在小转角范围内可实现高精度测量。以上都是测量基准板建立标定坐标系以计算旋转角度,端面采集装置复杂且仅适用于静态角度解算。吴常铨等^[11]从侧面拍摄柱状旋转体周向的靶标图像实现旋转角度的测量,证明了侧面采集的可行性,但依赖协作靶标,不能解决蜗轮侧面周期重

复纹理问题。俞翔栋等^[12]提出了一种基于复数神经网络的双视角视觉转角测量方法,通过双视角图像信息融合提高了转角测量精度。张玉杰等^[13]提出了一种优化定向快速角点与旋转二进制描述子(oriented features from accelerated segment test (FAST) and rotated binary robust independent elementary features (BRIEF), ORB)特征匹配与径向基神经网络的衬套偏转角度测量方法,解决了图像特征被遮挡导致的无法匹配问题,但角度值不具有关联性,不适于动态测量。针对蜗轮测量的相关研究中,常通过分析蜗轮齿距偏差^[14-16]、齿廓误差^[17-18]和径向圆跳动^[19]等参数间接推导其对传动系统的影响,难以直接反映蜗轮蜗杆在动态啮合过程中的平稳性和误差定位。

在实际工程中,一般选用大模数蜗轮作为低速大扭矩传动系统的核心零件,考虑安装空间,很难在蜗轮端面上方放置图像采集设备,故本文提出了一种基于蜗轮侧面的动态跟踪方法测量蜗轮转角。通过等时间间隔采样策略,获取蜗轮完整旋转周期的图像序列以构建数据集,再进行预处理实现去噪与对比度增强,并定义感兴趣区域(region of interest, ROI),改进ORB算法提取稳定特征点,引入结合图像金字塔的LK(Lucas-Kanade)光流法,实现对相邻帧间特征点的亚像素级动态跟踪,并融合卡尔曼滤波器以提升轨迹平滑性与跟踪鲁棒性,最后解算相邻图像帧间的运动模型,精确计算蜗轮旋转角度增量。根据蜗轮实际旋转位置和理论旋转位置的角度波动可以判断蜗轮单面啮合偏差并反映蜗轮蜗杆传动过程中啮合的平稳性。

1 理论分析

1.1 图像预处理

图像预处理的主要目的是去除噪声、增强ROI对比度,有利于提高后续图像分析和测量的准确度。本文从

侧面采集蜗轮齿形图像,齿顶面与齿槽呈明暗条带交替分布,低照度情况下会产生噪声干扰,故本文采用双边滤波去除图像噪声。双边滤波是一种非线性的滤波方法,采用加权平均的方式对输入图像进行处理,能同时考虑邻域内像素的空间邻近性和灰度相似性,达到保边去噪的目的,如式(1)所示。

$$I_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|f_p - f_q|) f_q \quad (1)$$

其中, I_p 表示双边滤波结果, S 表示滤波窗口范围, f_p, f_q 表示点 p, q 的灰度值, $|f_p - f_q|$ 表示灰度值差, $\|p - q\|$ 表示两点之间的欧几里得距离, σ_s 为空间邻域标准差, σ_r 为像素亮度标准差, W_p 表示灰度权值和空间权值乘积的加权和,如式(2)所示。

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|f_p - f_q|) = \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{2\sigma_s^2} - \frac{|f_p - f_q|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (2)$$

采用峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 和结构相似度 (structural similarity index measure, SSIM) 作为客观评价指标进行参数优化。遍历测试结果表明:较小的 σ_s 有利于保持图像边缘清晰度,适当增大 σ_r 可有效改善齿顶面光照不均现象,较小的 S 可降低计算耗时。综合保边去噪效果与运算效率,最终选取 S 值为 5, σ_s 和 σ_r 设置为 50。此时,预处理后图像的 PSNR 为 39.46 dB, SSIM 为 0.965 1, 平均耗时约为 15.2 ms, 实现了齿顶面亮带噪声的有效平滑,同时抑制了齿顶边缘至齿槽暗带过渡区域的过度平滑。为进一步增强齿顶面纹理与边缘细节,采用限制对比度自适应直方图均衡化 (contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE) 对图像进行局部对比度增强。将网格分块尺寸设定为 12×12 , 对比度限制阈值设定为 5.0, 该参数组合在有效提升齿顶面纹理对比度的同时,较好地抑制了齿槽暗区噪声放大。预处理结果如图 1 所示。

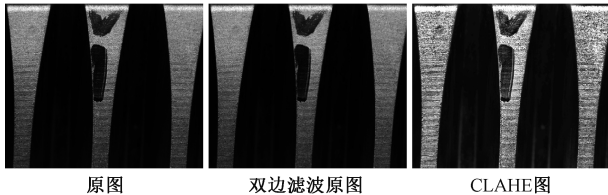


图1 预处理结果

Fig. 1 Preprocessing results

本文后续算法只需在齿顶面区域计算,因此采用图像分割技术将齿顶面与齿槽分离并创建齿顶掩膜区域以便约束特征点提取。阈值分割法通过确定阈值与检测目标、背景的像素灰度值比较进行分类生成二值图,因计算

简单且速度快而广泛应用,但光照不均时,全局阈值分割可能漏检弱边缘或误检强噪声,故本文采用基于 Otsu 的自适应阈值法实现分块局部分割。在每小块子图像中计算最佳阈值,再用插值法平滑阈值避免分块边界不连续,设每块 Ω_k 大小为 $m \times n$, 灰度总级数为 k , 各级灰度出现概率为 p_i , 按任意阈值 t 将像素分类,灰度值高于 t 为目标区域,反之为背景,两类像素值均值可根据其分布概率计算得到,如式(3)~(5)所示。

$$\mu_0(t) = \frac{1}{\sum_{i=0}^t p_i} \sum_{i=0}^t i \times p_i \quad (3)$$

$$\mu_1(t) = \frac{1}{\sum_{i=t+1}^k p_i} \sum_{i=t+1}^k i \times p_i \quad (4)$$

再计算两类类间方差为:

$$\sigma_b^2(t) = \sum_{i=0}^t p_i [\mu_0(t) - \sum_{i=0}^k i \times p_i]^2 + \sum_{i=t+1}^k p_i [\mu_1(t) - \sum_{i=0}^k i \times p_i]^2 \quad (5)$$

使得 $\sigma_b^2(t)$ 值最大的阈值 t 为最佳阈值。再把各分块的 t 做插值法进行平滑抑制伪影最终得到齿顶面为白色、齿槽为黑色的二值图像。

由于齿顶面黑色数字标记及其与齿槽背景的局部连通,初始分割结果存在目标区域不完整的问题。为此,本文采用闭运算、区域填充和连通域筛选相结合的多层形态学方法构建完整掩膜 (mask)。将掩膜图 $M(x, y)$ 与增强图 $E(x, y)$ 叠加进行与运算实现齿顶面增强、抑制齿槽的选择性处理,以 3×3 卷积核为例,叠加原理如图 2 所示。

200	20	100	0	0	1	0	0	100
0	25	255	0	1	1	0	25	255
9	0	3	1	1	1	9	0	3
灰度图			&			mask		
						叠加图		

图2 mask 叠加原理

Fig. 2 Principle of mask superposition

ROI 图像生成过程如图 3 所示。



图3 ROI 生成过程

Fig. 3 Process of ROI generation

最后,将数据集中所有原始灰度图转为增强的 ROI 图像,为提取高质量特征点奠定基础。

1.2 特征点提取与匹配

ORB 是一种特征检测和描述算法,速度快适合动态检测^[20]。加速分段测试特征(features from accelerated segment test, FAST)角点检测是通过比较像素点周围邻域内的像素强度来提取特征点,若周围水平垂直的 4 个位置存在 3 个点与中心点灰度差值大于阈值 t 则中心点作为特征点候选,再比较邻域内总的 16 个像素点与候选点差值,若有 12 个以上满足条件才作为高响应特征点,如图 4 所示。

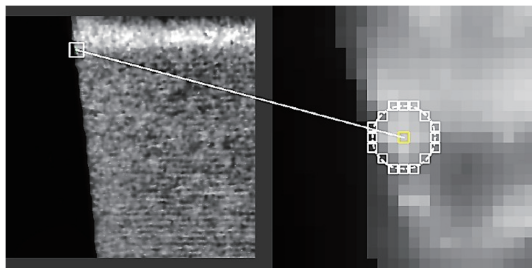


图 4 FAST 检测结果

Fig. 4 FAST detection results

二进制鲁棒独立特征(binary robust independent elementary features, BRIEF)通过比较随机点对的灰度强度响应,实现了快速的描述子构建。建立过程通过取以特征点 p 为中心的 $S \times S$ 大小邻域窗口,在邻域内随机取 N 对点,再比较 N 对像素点的灰度值大小,如式(6)所示。

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1, & f_x < f_y \\ 0, & f_x \geq f_y \end{cases} \quad (6)$$

其中, f_x, f_y 分别为点对 x, y 的灰度值。最后将 N 对点比较结果生成的二进制码串组成一个 N 维向量即 ORB 的特征点描述子。二进制描述子便于高速匹配,提高了计算速度,但蜗轮齿顶面两侧边缘通常为光滑的弧线,角点特征不明显,FAST 算法在边缘附近提取的特征点少,本文引入 Canny 算子以增加边缘特征点数量。首先使用 Sobel 算子计算 ROI 图像中每个像素点的梯度幅值 G 和梯度方向 θ , 因其 3×3 核能对垂直边缘和水平边缘表现最强响应,可以更好的检测蜗轮每个齿顶面的两条边缘,如式(7)和(8)所示。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (8)$$

其中, G_x, G_y 为水平和竖直方向的一阶导数。

为消除在梯度方向上不是真正边缘的像素从而得到更加精确的边界定位,需对梯度幅值进行非极大值抑制,仅保留局部梯度最大的点。在 3×3 区域内,定义 4 个边缘方向:水平、垂直、 45° 、 -45° ,如图 5 所示。

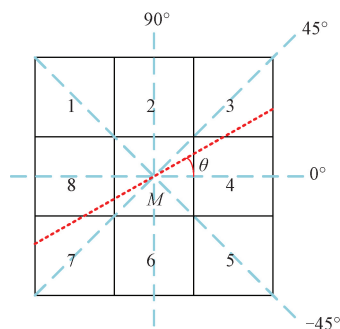


图 5 非极大值抑制

Fig. 5 Non-maximum suppression

中心像素点为 M ,沿梯度方向 θ 与 3、7 两邻域分别有交点,通过线性插值计算得到交点像素值,若满足点 M 的像素值是邻域内的最大值且梯度值最大,可判断该点为边缘像素点,否则剔除伪边缘点。最后再使用前文已用的 Otsu 阈值法检测得到边缘掩码区域,并在区域内再次使用 ORB 提取边缘特征点,再进行融合得到最终特征点提取情况,保证特征点在 ROI 内具有足够的空间覆盖与统计代表性,如图 6 所示。

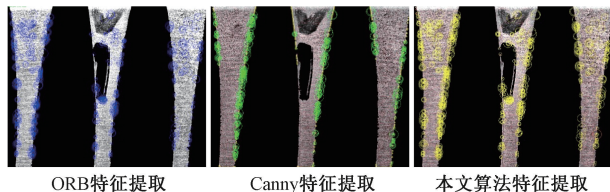


图 6 特征提取结果

Fig. 6 Feature extraction results

暴力匹配根据汉明距离比较两个二进制码串的相似性,两个等长字符串在对应位置的不同字符数目越少表示特征匹配成功,即选择距离最小或者距离满足阈值要求的描述子作为匹配结果,结果对比在实验分析部分详细介绍。

1.3 动态跟踪转角测量

LK 光流法是一种经典的在图像序列中追踪特征点位置变换的算法,有 3 个基本假设:亮度恒定不变、相邻帧之间特征点位移小、相邻像素运动一致性^[21]。本文数据集相邻帧特征点可能存在大位移变化,故采用金字塔 LK 光流法进行跟踪。首先建立一个 3 层高斯金字塔,最低分辨率在最顶层,原始图片在底层,根据上一帧 ORB 特征点,找到当前帧最匹配位置,原理如图 7 所示。

在动态跟踪时,因视野遮挡或光照变化导致特征点跟踪丢失,或者因蜗轮齿形具有周期性导致特征点跟踪“跳齿”,使得检测结果存在随机性变化,影响最终结果,本文引入随机抽样一致性(random sample consensus,

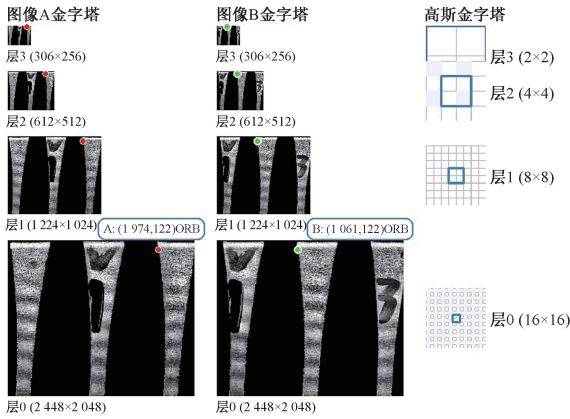


图7 基于高斯金字塔的特征匹配

Fig. 7 Feature matching based on Gaussian pyramid

RANSAC)算法,进行全局运动一致性估计来剔除掉外点,消除误匹配点对、减少误差累计,得到相邻帧特征匹配的单应性矩阵,确保跟踪的稳定性。再将 RANSAC 输出的内点位置作为当前状态输入卡尔曼滤波器来预测下一状态,实现对后续帧中特征点位置的更新与最优估计,具体步骤为:

1) 设 x_t, y_t 为 t 时刻特征点像素坐标, v_{xt}, v_{yt} 为各方向运动速度, $\sigma_{vx}^2, \sigma_{vy}^2$ 为速度方差,则 t 时刻特征点的运动状态向量 X_t 、状态转移矩阵 F 及过程噪声协方差矩阵 Q , 如式(9)~(11)所示。

$$X_t = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ v_{xt} \\ v_{yt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{vx}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{vy}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

可得状态估计误差的协方差矩阵,如式(12)所示。

$$P_{t|t-1} = FP_{t-1}F^T + Q \quad (12)$$

又匀速运动模型在状态空间中如式(13)所示。

$$X_{t|t-1} = FX_{t-1} \quad (13)$$

其中, $X_{t|t-1}$ 为当前帧的先验状态预测, X_{t-1} 为上一帧的最优估计。

2) 计算卡尔曼增益 K_t 以修正预测状态并更新状态,使下一步预测估计更加准确,如式(14)所示。

$$\begin{cases} S_t = HP_{t|t-1}H^T + R \\ K_t = P_{t|t-1}H^TS_t^{-1} \\ D_t = Z_t - HX_{t|t-1} \\ X_t = X_{t|t-1} + K_tD_t \\ P_t = P_{t|t-1} - K_tHK_t^T \end{cases} \quad (14)$$

其中, S_t 为观测残差总不确定性,不确定性越大表示越不信任预测, K_t 值变大,更信任观测, H 为 4×2 的位置矩阵, D_t 为观测值与预测值之差,如果为 0,说明预测和观测完全一致不需要更新。在卡尔曼滤波器中,过程噪声协方差矩阵 Q 和观测噪声协方差矩阵 R 的选取直接决定了滤波器的动态响应速度与平滑性能。 Q 代表蜗轮蜗杆传动过程因啮合间隙导致的波动。对于大模数蜗轮蜗杆传动,其机械惯量极大,速度极难发生突变,故将 Q 设置为较小值来遵循匀速运动模型。 R 代表光流法的匹配误差,受环境光照变化及蜗轮表面纹理特征波动的影响,观测结果可能存在一定的高频噪声。当位移跳变剧烈时, R 变大代表滤波器不信任视觉测量,将曲线变平滑,从而有效抑制了光流观测值的异常跳变,保证了特征点动态跟踪轨迹的极致平滑。

最后计算相邻帧同一特征点的灰度值记为 $f(x, y)$ 、 $f(x', y')$, 从拟合的仿射变换矩阵中提取旋转角度,再提取其旋转角度分量,如式(15)所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ 矩阵表示线性变换,包括旋转、缩放等变换, $\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$ 向量对应 x 轴和 y 轴上的位移。

式(15)的等价表达式如式(16)所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

可得旋转角度结果如式(17)所示。

$$\Delta \theta = \tan^{-1}(a_{21}, a_{11}) \quad (17)$$

1.4 传动平稳性量化评估模型

蜗轮旋转角度的精确测量能直接反映蜗轮蜗杆传动过程中的平稳性。在理想的刚性且无误差的传动系统中,若输入端即蜗杆以恒定转速运行,输出端即蜗轮的实际累积转角应与理论累积转角严格一致。然而,由于蜗轮加工的齿距累积误差、齿廓偏差、径向跳动以及装配偏心等综合因素,实际测量转角往往会偏离理论值,产生转角波动。第 n 帧的转角波动 $\Delta \theta$ 计算如式(18)所示。

$$\Delta \theta = \theta_n - \theta_{nt} \quad (18)$$

其中, θ_n 为第 n 帧的测量累积旋转角度值, θ_m 为第 n 帧理论累积旋转角度值。

2 实验验证

本文搭建了基于蜗轮侧面动态采集视觉系统以测量蜗轮旋转角度值,如图 8 所示。主要的硬件设备包括海康品牌 MV-CS050-10GC 全局快门彩色相机、0.3x 双远心镜头、LED 条形光源、相机支架升降平台和蜗轮蜗杆啮合仪组成。图像采集由海康公司开发的 MVS 软件进行, GigE 千兆网口数据接口与计算机相连,图像处理技术在 Pycharm2025 环境下运行。

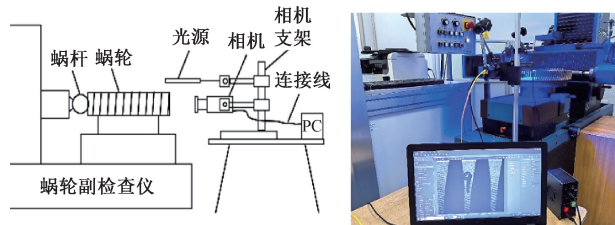


图 8 视觉测量系统平台

Fig. 8 Vision measurement system platform

本文采集的蜗轮齿数为 100,直径 360 mm,由蜗杆主传动带蜗轮旋转,蜗杆头数为 1,可知蜗轮蜗杆传动比为 1:100。设定蜗杆转速为 60 rpm,则蜗轮 100 s 转一圈,设置相机间隔 1 s 采 1 帧。由于本文改进的融合特征提取策略,强化了对齿顶物理边缘轮廓的特征提取,在局部存在轻度油斑或粉尘覆盖时,仍能稳定提取出足够数量的有效边缘特征点供后续匹配;引入的卡尔曼滤波器通过构建匀速运动模型,有效平滑了振动带来的瞬态误差。故针对不同光照下蜗轮左右齿面单啮合传动进行图像采集,如图 9 所示。

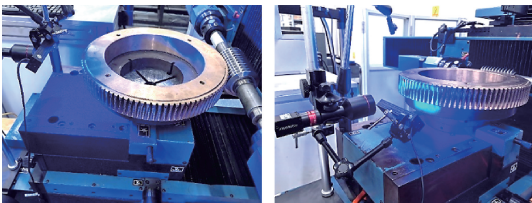


图 9 不同光照

Fig. 9 Different lighting conditions

2.1 特征点算法对比

为验证本文提出的 ORB-Canny 融合多特征匹配算法在蜗轮 ROI 特征匹配中具有计算效率高且匹配正确率优良的特点,选择了两种具有代表性的传统方法作为对照基准:1)经典的 ORB 特征匹配算法,计算速度快,但在边缘信息密集的区域易产生大量误匹配;2) Shi-Tomasi 角点检

测的匹配方法,该方法虽在角点定位稳定性方面表现较好,但在全局特征描述与匹配效率上存在局限。任选两张相邻帧图像进行特征点检测与匹配,结果如表 1 所示。

表 1 各算法的特征匹配结果对比

Table 1 Comparison of feature matching results of each algorithm

算法	总点对/匹配点对	正确率	总耗时/ms	特征点检测时间/ms	描述子计算时间/ms
ORB	349/326	0.934	2 235.07	1 793.02	181.82
Shi-Tomasi	832/776	0.933	412.82	266.24	129.42
本文算法	221/211	0.955	147.99	81.42	53.93

实验结果表明,与传统 ORB 算法相比,本文方法通过引入 Canny 边缘特征进行多维度信息融合,在保持相近甚至更优计算速度的同时,显著提升了特征匹配的鲁棒性与准确率;而与 Shi-Tomasi 角点检测方法相比,本文算法在蜗轮 ROI 的局部细节描述与整体结构匹配方面均表现出更全面的特征表征能力与更高的匹配正确率,从而验证了所提算法通过 Canny 约束后特征点对减少,保留高响应特征点并缩短了匹配时间。3 种算法的特征匹配图如图 10 所示。

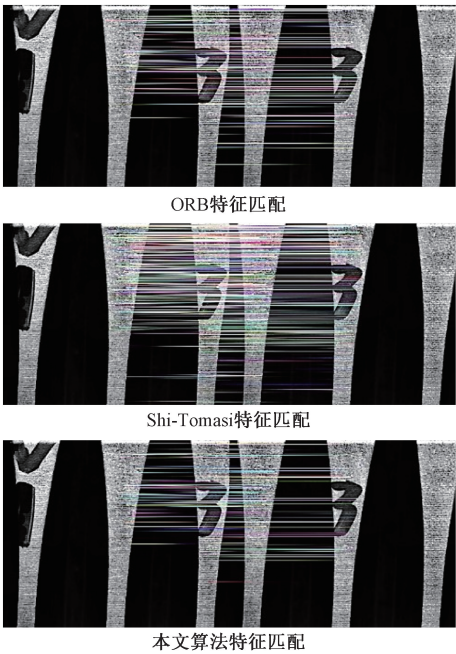


图 10 特征匹配结果对比

Fig. 10 Comparison of feature matching results

2.2 动态跟踪对比

光流法动态跟踪特征点的稳定性,一个关键的评价参数在于其计算相邻帧间像素位移的准确性与平滑性。

本文通过在图像金字塔的不同层级上迭代计算光流,逐层优化像素位移估计,从而兼顾大位移跟踪的鲁棒性与亚像素级位移估计的精细度。结合卡尔曼滤波对连续帧间的像素位移进行状态建模与最优估计,一方面可抑制单帧计算中的异常噪声,另一方面通过对运动趋势的预测,补偿因存在遮挡或纹理缺失造成的跟踪信息缺失。跟踪的相邻帧光流场如图 11 所示。

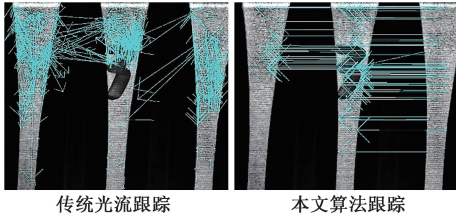


图 11 光流场跟踪对比

Fig. 11 Comparison of optical flow tracking results

在蜗轮齿顶面同一平面放置标定板,建立测量系统输出值与真实物理量之间的精确数学关系,本文使用小方格边长为 1.5 mm,具有 11×8 内角点的棋盘标定板。标定结果显示,横纵像素当量分别为 11.74 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、11.73 $\mu\text{m}/\text{pixel}$,说明尺度一致性好,且所有角点都符合几何模型,如图 12 所示。

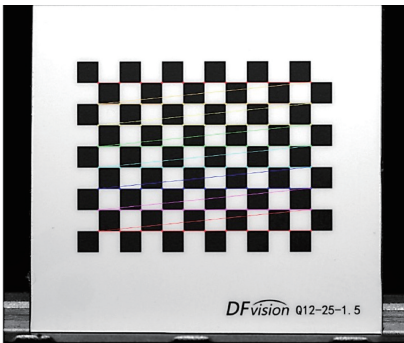


图 12 标定结果

Fig. 12 Calibration results

本文算法在保持实时计算效率的同时,显著提升了动态跟踪稳定性。

2.3 转角测量对比

将跟踪位移放入经典的 RANSAC 算法中进行仿射矩阵的求解,并通过仿射矩阵中的旋转角度分量计算相邻帧蜗轮旋转角度值,结果如图 13 所示。

从不同光照工况的变化规律来看,光照条件不仅影响特征点数量,更直接影响特征点的可重复性和跟踪连续性。光照 1 下图像亮暗层次更有利于齿顶边缘与齿槽暗带的分离,因此无论是相邻帧转角还是累积转角曲线,均表现出较好的平滑性;而光照 2 下,由于局部对比度分布发生变化,传统 ORB+LK 方法更易出现局部错配和转

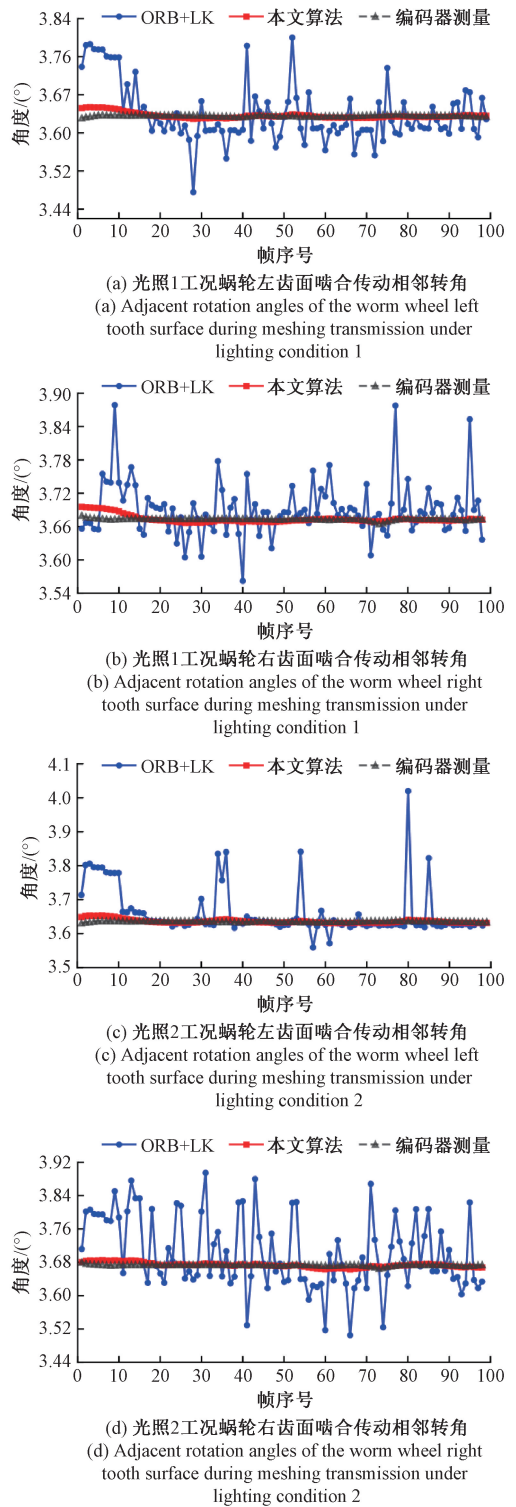


图 13 相邻转角测量结果

Fig. 13 Measurement results of adjacent rotation angles

角波动增大。本文算法之所以在两种光照下均能保持较高精度,主要原因在于:双边滤波与 CLAHE 增强改善了齿面纹理和边缘的可见性;Canny 约束下的特征点融合减少了弱判别特征进入匹配过程的概率,再结合金字塔

LK 和卡尔曼滤波对时序信息进行约束,使得算法对光照扰动具有更强的容错性。对比了各算法的瞬时角度稳定性,为进一步评估长期性能,现从微分角度分析转向积分角度分析,考察角度误差的累积效应,为便于对比,截取 40~45 帧的累计角度并放大,如图 14 所示。

可以看出,本文算法与编码器累积测量值相近,没有出现漂移造成累积误差,证明了本文算法的稳定性与准确性。

为证明本文所提方法具有高抗运动干扰能力,在恒定光照 1 下,设置蜗杆转速为 30、50 rpm 进行了测角实验。相邻帧左齿面蜗轮旋转角度值,结果如图 15 所示。

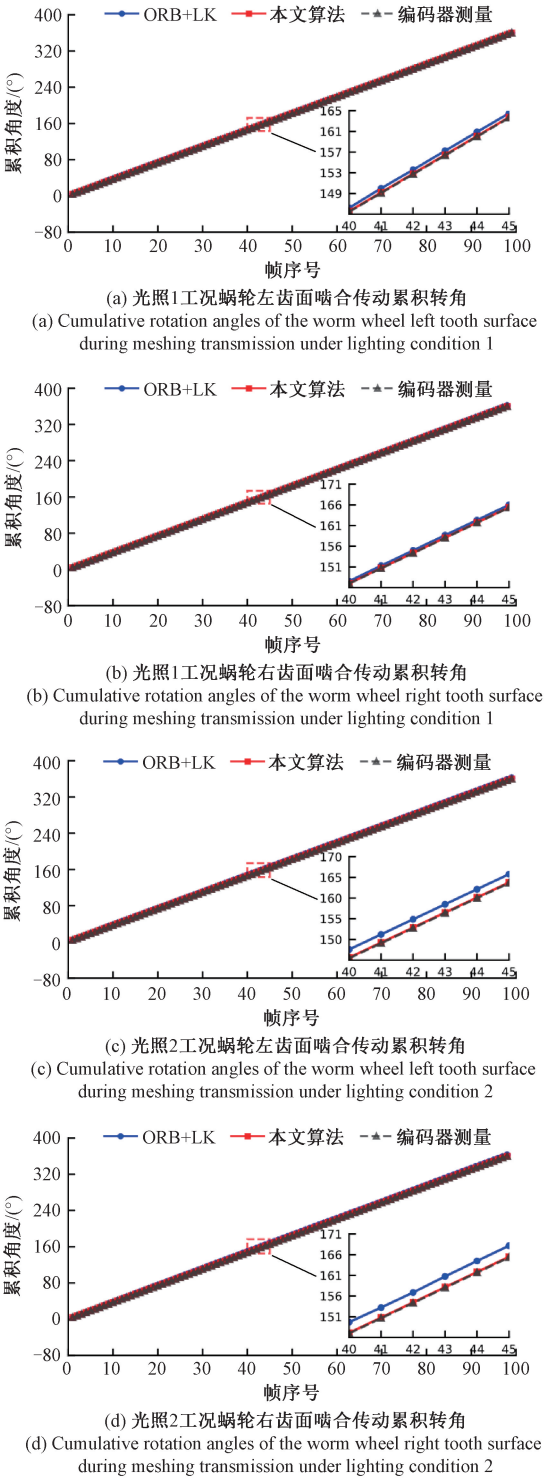


图 14 累积转角测量结果

Fig. 14 Measurement results of cumulative rotation angles

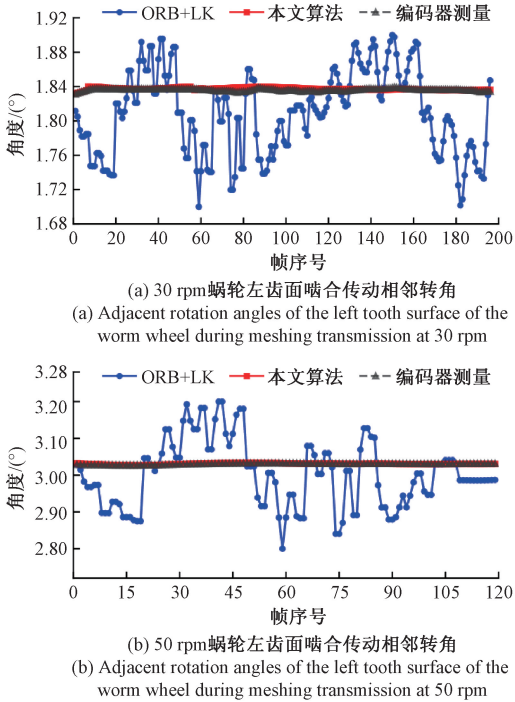
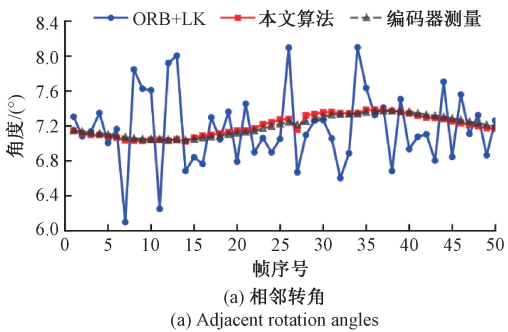


图 15 不同转速下左齿面啮合转角测量结果

Fig. 15 Measurement results of the left tooth surface meshing angle at different rotational speeds

对比可知,ORB+LK 算法对剧烈运动干扰高度敏感且易失效。本文算法在各种转速下均能持续、稳定地输出角度预测值,且与编码器测量曲线高度重合,验证了本文算法具有高抗运动干扰能力。

为证明本文方法通用性高,选择齿数 45,模数 2 mm,直径 100 mm 的蜗轮随蜗杆 60 rpm 转速传动,左齿面啮合工况下,相邻帧旋转角度和累积角度结果如图 16 所示。



(a) 相邻转角
(a) Adjacent rotation angles

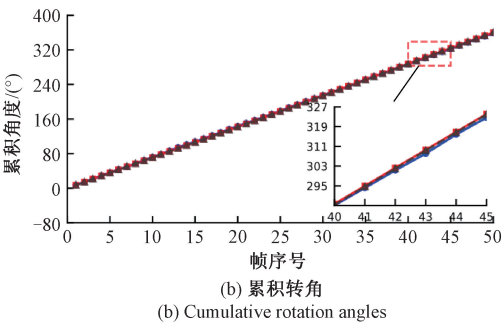


图 16 相邻转角与累积转角测量结果

Fig. 16 Measurement results of adjacent and cumulative rotation angles

从图 16(a)可以看出,本文算法解算的相邻帧转角依然和编码器测量值高度重合。这表明本文算法能够自适应全新的 ROI 并提取高质量的边缘特征点。从图 16(b)的累积转角曲线可以看出,本文算法的累积角度与理论上的严格线性增长趋势保持高度一致。无论蜗轮大小,本文测量系统无需更改核心算法架构或进行重新标定,即可自适应输出高精度转角序列。这充分证明所提

方法打破了单一型号限制,具备极高的跨规格通用性,可广泛应用于各类蜗轮蜗杆传动的动态平稳性检测。

2.4 误差指标分析

为进一步验证本文算法测量蜗轮转角的精度,通过计算平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、误差标准差 σ_e 、95%分位绝对误差,比较与真实值之间的误差大小。误差计算如式(19)~(21)所示。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{19}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{20}$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[y_i - \hat{y}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \right]^2} \tag{21}$$

其中, n 为数据点 T 总数, y_i 为预测值, $\hat{y}_i$ 为真实值。MAE 用于衡量预测值与真实值之间的平均误差,MAE 越小,表示偏差程度越小;RMSE 用于衡量预测值与真实值之间的差距,RMSE 越小,表示预测结果越接近真实值; σ_e 用于衡量误差围绕平均值的波动大小。误差数据结果如表 2 所示。

表 2 误差数据对比结果
Table 2 Comparison of error data (°)

齿面	工况	算法	MAE	RMSE	σ_e	95%分位绝对误差
左齿面啮合	光照 1	ORB+LK	0.046 2	0.061 6	0.061 5	0.140 8
		本文算法	0.004 4	0.006 4	0.006 4	0.016 3
	光照 2	ORB+LK	0.038 2	0.075 9	0.071 7	0.173 3
		本文算法	0.004 6	0.006 2	0.006 2	0.015 6
右齿面啮合	光照 1	ORB+LK	0.035 8	0.052 5	0.049 4	0.099 6
		本文算法	0.004 7	0.006 7	0.006 7	0.018 2
	光照 2	ORB+LK	0.072 7	0.092 3	0.087 4	0.170 1
		本文算法	0.003 9	0.005 3	0.005 3	0.010 7

实验表明,本文算法在 MAE 与 σ_e 展现出明显优势,说明其在提升估计精度的同时,大幅改善了结果的稳定性和一致性;95%分位绝对误差指标上,本文算法误差最小,证明在面对大角度旋转、纹理弱化及遮挡等挑战性场景时,具备更优的鲁棒性与可靠性,从而系统性提升了旋转运动估计的整体质量。

为了宏观量化整个动态啮合周期的传动平稳性,引入转角波动的峰峰值(peak-to-peak, P-P)作为核心评估指标,其反映了传动过程中的最大冲击与极限几何偏差,不同转速下左齿面啮合相邻转角波动最大偏差如表 3 所示。

数据对比表明,ORB+LK 算法跟踪特征点易受环境干扰发生漂移,导致计算出的转角波动峰峰值过大,表现

表 3 不同转速下相邻转角波动最大偏差对比

Table 3 Comparison of the maximum deviation in adjacent rotation angle fluctuations at different rotational speeds (°)

方法	30 rpm	50 rpm	60 rpm
ORB+LK	0.200	0.400 0	0.324 5
本文算法	0.008	0.006 9	0.024 7

为虚假波动。而本文算法提取的转角序列在 60 rpm 工况下,最大偏差控制在 0.025°内,说明该算法精度高、鲁棒性强,能够稳定地捕捉到极其微小的机械传动波动。

从工程应用角度看,本文算法的优势主要体现在无

需在蜗轮端面布置复杂测量基准,可直接利用侧面自然纹理实现动态测角,因此更适合安装空间受限且需要在现场评估传动平稳性的场景。但该方法仍存在一定局限性,在极端遮挡条件下,局部有效特征显著减少时,跟踪稳定性面临更高要求;对于小模数蜗轮齿面纹理较稀疏的情况,特征提取与匹配难度也会有所增加。针对上述情况,后续将结合多目视觉测量、特征提取质量提升、误匹配剔除和状态估计优化等方法,进一步增强复杂工况下转角测量的稳定性与鲁棒性。

3 结 论

本文针对传统蜗轮蜗杆转角测量中端面布置受限、动态测量适应性不足及传动平稳性难以直接表征等问题,提出了一种计及蜗轮侧面动态跟踪的转角精密测量方法。结果表明,所构建的 Canny 边缘引导 ORB 特征提取方法在保证计算效率的同时具有较高匹配精度,特征匹配正确率达到 0.955,总耗时为 147.99 ms;在不同光照、转速及齿数工况下,该方法均表现出良好的精度、鲁棒性与通用性,平均绝对误差控制在 0.005° ,累积转角结果与编码器测量高度一致。同时,基于累积转角序列建立的传动平稳性量化评估模型能够有效提取传动过程中的微小角度波动,为蜗轮蜗杆传动状态评价提供定量依据。总体而言,该方法可在非接触条件下实现高精度转角测量与传动平稳性评估,具有较好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 彭东林,石照耀,郑永,等.超精密蜗轮副加工成套工艺研究[J].中国机械工程,2022,33(9):1051-1056.
PENG D L, SHI ZH Y, ZHENG Y, et al. Research on complete set technology of ultra-precision worm gear pair[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(9): 1051-1056.
- [2] PUEO M, ACERO R, GRACIA A, et al. Measuring sensors calibration in worm gear rolling testers[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3148.
- [3] 黄明,刘品宽,夏仰球,等.自研角度计量转台在圆分度器件校准中的应用[J].光学精密工程,2019, 27(1):110-120.
HUANG M, LIU P K, XIA Y Q, et al. Calibration of circular division artifacts using a self-developed angle comparator[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 110-120.
- [4] 张天恒,彭东林,王阳阳,等.绝对式角位移传感器的研究综述[J].仪器仪表学报,2025,46(6):1-16.
ZHANG T H, PENG D L, WANG Y Y, et al. A review of research on absolute angular displacement sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 1-16.
- [5] 马新宇,朱维斌,黄垚,等.基于 Kalman 的动态角度测量方法研究[J].仪器仪表学报,2023,44(3):119-127.
MA X Y, ZHU W B, HUANG Y, et al. Research on the dynamic angle measurement method based on Kalman[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 119-127.
- [6] DU P, DUAN ZH Y, ZHANG J, et al. The design and implementation of a dynamic measurement system for a large gear rotation angle based on an extended visual field[J]. Sensors, 2025, 25(12): 3576.
- [7] ZHANG F, WANG L, ZHANG J H. A visual-based angle measurement method using the rotating spot images: Mathematic modeling and experiment validation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15): 16576-16583.
- [8] YAN G Z, ZHANG J, CHENG ZH, et al. Geometric calibration of rotational vision system for dynamic exterior orientation[J]. Instrumentation, 2023, 10(3): 23-33.
- [9] SHAN D R, ZHU ZH H, WANG X F, et al. Pose measurement method based on machine vision and novel directional target[J]. Applied Sciences, 2024, 14(5): 1698.
- [10] 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 P, DUAN ZH Y, ZHANG J, et al. A high-precision measurement method for rotation angles of large-diameter components based on binocular vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 35-43.
- [11] 吴常铖,杨德华,曹青青,等.基于视觉和最大长度序列的旋转角度测量系统[J].中国测试,2022,48(1): 122-128.
WU CH CH, YANG D H, CAO Q Q, et al. Rotation angle measurement system based on visual and maximum length sequence[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 122-128.
- [12] 俞翔栋,于文峰,柯瑞庭,等.基于复数神经网络的双视角视觉转角测量方法[J].电子测量技术,2024, 47(18):9-14.
YU X D, YU W F, KE R T, et al. Double-perspective visual angular measurement method based on complex neural networks[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(18): 9-14.
- [13] 张玉杰,谢兴龙.基于机器视觉的汽车压装衬套偏转角度测量[J].组合机床与自动化加工技术,2024(9):118-122, 127.
ZHANG Y J, XIE X L. Machine vision-based

- measurement of deflection angle in automotive press-fit bushings [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024(9): 118-122, 127.
- [14] 郑永, 谢伟, 陈艳, 等. 基于改进引导滤波算法的蜗轮齿廓边缘保持方法[J]. *机电工程*, 2024, 41(12): 2152-2162.
- ZHENG Y, XIE W, CHEN Y, et al. Maintain edge method of worm gear tooth profile based on improved guided filter algorithm [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(12): 2152-2162.
- [15] ZHANG D H, LI J H, LI Y Q, et al. A coaxial multi-ring detection method for measuring the pitch and thickness accuracy of cylindrical gears[J]. *Measurement and Control*, 2024, 57(6): 736-750.
- [16] GUO SH, SONG H X, SUN Y Q, et al. Rapid and high-precision measurement method for fine pitch gears without high-precision installation [J]. *Measurement*, 2024, 237: 115157.
- [17] 汤洁, 刘小兵, 李睿. 未知参数小模数齿轮齿距和齿廓偏差视觉测量[J]. *光学 精密工程*, 2021, 29(1): 100-109.
- TANG J, LIU X B, LI R. Vision measurement of pitch and profile deviations for small modulus gears with unknown parameters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 100-109.
- [18] BAI Y J, ZHANG Z H, FU SH, et al. Recent progress of full-field three-dimensional shape measurement based on phase information[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2024, 7(2): 26-41.
- [19] LI W J, LI F Q, JIANG ZH S, et al. A machine vision-based radial circular runout measurement method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(9/10): 3949-3958.
- [20] 行芳仪, 徐成, 高宏伟. 高效高精度光照自适应的 ORB 特征匹配算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(7): 140-147.
- XING F Y, XU CH, GAO H W. Efficient and high-precision illumination adaptive ORB feature matching algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(7): 140-147.
- [21] 王海龙, 陈思民, 张从广, 等. 基于自适应改进 LK 光

流算法的结构位移视觉测量技术在复杂环境下的性能研究[J]. *中国公路学报*, 2025, 38(12): 361-371.

WANG H L, CHEN S M, ZHANG C G, et al. The study on the performance of structure displacement visual measurement technology based on an adaptive improved LK optical flow algorithm in complex environments [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025, 38(12): 361-371.

作者简介



郑永(通信作者), 2011 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为重庆理工大学副教授, 主要研究方向为传动精度检测理论与仪器、智能位移传感器、机器视觉蜗轮检测。

E-mail: sdzzy@cqut.edu.cn

Zheng Yong (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2011. He is currently an associate professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include transmission accuracy measurement theory and instrumentation, intelligent displacement sensors, and machine vision-based worm gear inspection.



段高歆, 2021 年于成都工业学院获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉蜗轮检测技术。

E-mail: 3200415469@qq.com

Duan Gaoxin received her B.Sc. degree from Chengdu Technological University in

2021. She is currently a master's student at Chongqing University of Technology. Her main research interest is machine vision-based worm gear inspection technology.



陈艳, 2012 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授, 主要研究方向为储能电池建模及应用, 光伏逆变器及其控制技术, 电源技术。

E-mail: chenyan2012@cqut.edu.cn

Chen Yan received her Ph. D. degree from Chongqing University in 2012. She is currently a professor at Chongqing University of Technology. Her main research interests include energy storage battery modeling and applications, photovoltaic inverters and their control, and power supply technology.