

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107468

基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法

孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 李航宇
(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要:齿形结构作为传动装置的关键零部件,齿顶圆的精确检测是后续装配的重要依据。在齿顶圆的视觉测量中,传统图像处理方法检测精度较低,齿形结构倾角过大时轮齿存在遮挡导致算法的鲁棒性差。针对上述问题,现提出基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法。首先基于自适应阈值的曲率尺度空间(CSS)技术对轮齿进行亚像素角点检测,其次采用超最小二乘法拟合齿顶椭圆,最后通过补偿准偏心误差优化椭圆参数。实验结果表明,该方法不仅可以提取包含全部轮齿图像的齿顶圆,对于轮齿存在遮挡的图像也能进行高精度检测,同时能够补偿透镜畸变产生的椭圆准偏心误差,齿顶圆圆心测量精度为0.056 mm,法向量测量精度为0.068°,满足齿形结构视觉测量要求。

关键词:齿顶圆;亚像素角点;超最小二乘;椭圆拟合;准偏心误差

中图分类号: TH161 TP391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision

Kong Shengjie, Huang Xiang, Zhou Kuai, Li Hangyu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The gear structure is a key component of the transmission device, and the accurate detection of the addendum circle is an important basis for subsequent assembly. In the visual measurement of addendum circle, the traditional image processing method has low detection accuracy, and when the inclination angle of the gear structure is too large, the gear teeth will be occluded, which leads to the poor robustness of the algorithm. Aiming at the above problems, Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision is proposed. First, the sub-pixel corner detection of the gear teeth is performed based on the curvature scale space (CSS) technology with adaptive threshold, second, the hyper least square method is used to fit the addendum ellipse, and finally the ellipse parameters are optimized by compensating for the quasi-eccentricity error. The experimental results show that the algorithm can not only extract the addendum circle that contains all the gear teeth images, but also can perform high-precision detection of the occluded images of the gear teeth. At the same time, it can compensate the elliptical quasi-eccentricity error caused by lens distortion. The measurement accuracy of the addendum circle center is 0.056 mm, and the measurement accuracy of normal vector is 0.068°, which meets the requirements of visual measurement of gear structure.

Keywords: addendum circle; sub-pixel corner; hyper least squares; ellipse fitting; quasi-eccentricity error

0 引言

近年来,随着数字化测量技术的兴起,基于机器视觉的数字化装配技术在工业领域已被广泛应用^[1-2]。齿轮作为传动装置中的关键零部件,具有较高的装配精度要求^[3],在齿形结构的装配中,大多数采用的是人工装配法,对于航空航天领域的大尺寸齿形结构件,人工装配法

效率低,人力资源消耗大,因此需要借助机器视觉技术测量出齿形结构的空位姿,经过坐标系转换等过程计算出调姿机构的驱动量从而实现自动化装配^[4-5]。目前针对齿形结构图像处理的研究较少,大多为齿轮缺陷的检测^[6-7]。高志强等^[8]采用遍历像素的方法获得齿轮分度圆直径,齿轮存在倾角时质心会发生偏移,无法获得精确的分度圆。王宁等^[9]提出了一种边缘跟踪法提取齿轮的轮廓,经过多次迭代获得齿轮质心进而拟合齿顶圆,该方

法的弊端是忽略了透镜畸变对椭圆质心的影响,齿顶圆拟合精度不高。邵勇等^[10]介绍了一种基于齿轮外轮廓凸包顶点的齿顶圆检测方法,利用凸包顶点拟合齿顶圆,该方法不适用于检测轮齿存在遮挡的齿轮图像,齿顶圆提取的鲁棒性较差。

上述齿轮检测算法无法精确提取齿轮齿顶圆,本文提出基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法,采用超最小二乘法将亚像素齿顶角点拟合成齿顶圆,补偿准偏心误差优化齿顶圆参数,实现齿形结构齿顶圆的高精度测量。该方法提取效率高、鲁棒性强,丰富了机器视觉领域中齿形结构检测的研究内容,对保障齿形结构装配质量具有重要意义。

1 齿形结构齿顶圆检测方法

图1为齿形结构模拟件,齿形结构齿顶圆检测方法的流程如图2所示。

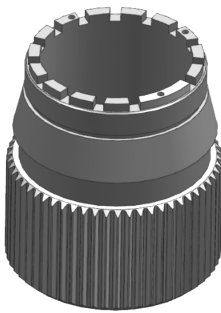


图1 齿形结构模拟件

Fig. 1 Gear structure simulation parts

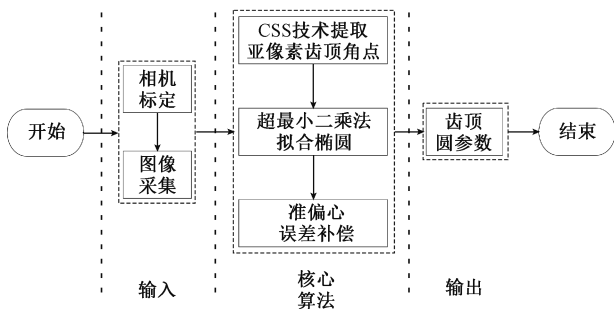


图2 齿形结构齿顶圆检测的方法流程

Fig. 2 The flow chart of addendum circle detection method of gear structure

图3为两幅典型的输入图像测试本文的方法,图3(a)为正投影图像,图像中轮齿呈均匀分布状态;图3(b)中轮齿显示不全,右下部分轮齿因齿轮轴线存在倾角而被上端面圆所遮挡。由于齿形结构装配时要求工作距离较大导致轮齿至相机光平面的距离较远,根据透

视投影原理,齿轮轮廓在图像中并不明显。

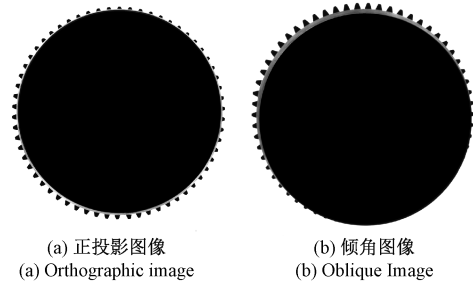


图3 输入图像

Fig. 3 The input image

1.1 改进的CSS角点检测算法

齿形结构齿顶圆提取的前提是检测齿顶轮廓,齿顶角点作为齿顶轮廓上的关键特征,具有曲率大、边缘变化不连续等特点。Mokhtarian等^[11]提出了一种基于曲率尺度空间(curvature scale space, CSS)的角点检测方法,这种方法精度较高且对图像噪声具有鲁棒性,适用于在多种尺度下恢复平面曲线的不变几何特征,由于齿形结构的位置具有不确定性,在相机中所成的像存在多种尺度,因此本小节基于曲率尺度空间的基本思想,对该方法进行了自适应阈值边缘检测与角点判定的改进。将曲线用弧长 u 参数化表示为:

$$\Gamma(u) = (x(u), y(u)) \quad (1)$$

曲线随着尺度不同可变化为:

$$\Gamma(u) = (X(u, \nu), Y(u, \nu)) \quad (2)$$

式中: $X(u, \nu) = x(u) \otimes \text{Gaussian}(u, \nu)$, $Y(u, \nu) = y(u) \otimes \text{Gaussian}(u, \nu)$ 。

采用带有比例因子 ν 的高斯卷积核 $\text{Gaussian}(u, \nu)$ 过滤曲线中的噪声同时平滑曲线; x, y 分别为曲线上的点在像素坐标系下的横纵坐标。则曲率可表示为:

$$k(u, \nu) = \frac{X_u(u, \nu)Y_{uu}(u, \nu) - X_{uu}(u, \nu)Y_u(u, \nu)}{\sqrt{(X_u(u, \nu)^2 + Y_u(u, \nu)^2)^3}} \quad (3)$$

由式(3)计算各曲线的曲率,曲率绝对值的局部最大值所在的点即为候选角点^[12]。基于CSS齿顶角点检测的改进算法步骤如下:

1) 对输入图像(image_input)进行自适应阈值的Canny边缘检测^[13],得到边缘图像(Canny_edge)。

2) 在Canny_edge中进行环形(近似齿根圆至齿顶圆)掩膜,得到轮齿部分的感兴趣区域图像(ROI_edge)。

3) 在ROI_edge中提取齿顶轮廓,该轮廓是计算曲率并提取角点的前提,Canny边缘检测会造成部分轮廓丢失,需填充轮廓的间隙使其完整,由Canny连接而成的角点存储至Canny连接角点集(Canny_Point)。

4) 计算在大尺度状态下各轮廓曲线上所有点的曲率,曲率最大值的点为候选角点,若该点曲率的绝对值为相邻点内最小曲率的 k 倍,则判定该点为正确角点,存储至齿顶角点集 (Corner_Point)。

5) 在小尺度状态下遍历 Corner_Point 中的所有点,剔除距离大于阈值 t_1 的点,以此获得更好的定位精度。

6) 对比 Canny_Point 和 Corner_Point 中的点,剔除距离小于阈值 t_2 的点,剩余的为最终齿顶角点,将其更新至 Corner_Point。

至此,初步完成齿顶圆齿顶角点的提取,本小节提出了一种基于 CSS 技术的自适应阈值边缘检测与角点判定的齿顶角点提取算法。CSS 角点检测依赖 Canny 边缘检测的图像,不佳的高低阈值会影响角点提取的精度,而本算法采用一种自适应阈值的 Canny 边缘检测算法来提取边缘轮廓;CSS 角点检测使用固定阈值进行正确角点的判定,不同边缘的曲率存在不同的最佳阈值,而本算法针对各边缘曲率设定一种自适应阈值,提高角点检测的精度与鲁棒性。

1.2 亚像素角点定位

图像的基本单位为 pixel,采用改进的 CSS 角点检测算法提取齿顶角点的精度为 1 个 pixel,然而齿顶角点的真实坐标不为整数,Corner_Point 中的坐标与真实坐标存在偏差,为保障齿顶圆的拟合精度,本小节采用亚像素技术对齿顶角点精确定位^[14]。

使用二次多项式逼近角点反应函数 $R(x,y)$ 进而获取亚像素角点坐标,二次多项式为:

$$R(x,y) = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 \quad (4)$$

遍历 Corner_Point 中各角点 (x_i, y_i) 邻域的 9 个像素点,建立共含有 6 个系数 $a \sim f$ 的超定方程组,运用最小二乘法求解未知量,对式(4) 进行求导可解得亚像素角点 (x'_i, y'_i) 。

$$x'_i = \frac{2bf - ce}{e^2 - 4df}, y'_i = \frac{2cd - be}{e^2 - 4df} \quad (5)$$

将所有的亚像素角点更新至 Corner_Point,即完成齿顶角点的亚像素提取,齿顶圆的部分齿顶角点如图 4 所示,使用三坐标测量仪测量的齿顶角点作为理论值并将其变换至像素坐标系下,部分齿顶角点的像素级、亚像素级坐标和理论值如表 1 所示,亚像素坐标的精度优于像素坐标。

1.3 超最小二乘法拟合齿顶圆

当齿顶端面不平行于像平面时,齿顶圆成像为椭圆^[15],本小节利用 Corner_Point 中的齿顶角点拟合合成齿顶椭圆,进而获得齿顶圆参数。

随机采样一致^[16] (random sample consensus, RANSAC)和最小二乘法^[17]是目前应用较为广泛的椭

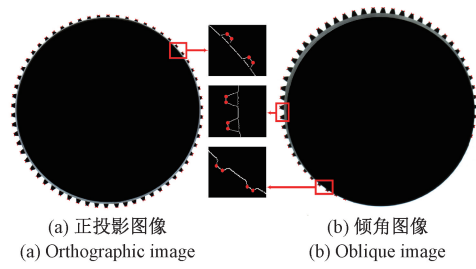


图 4 齿顶角点提取结果

Fig. 4 Extraction results of gear vertex corner

表 1 齿顶角点坐标

Table 1 Gear vertex corner coordinates

角点序号	像素坐标	亚像素坐标	理论值
1	(5 637, 934)	(5 637. 314, 933. 486)	(5 637. 337 14, 933. 458 53)
2	(5 611, 913)	(5 611. 072, 912. 846)	(5 611. 090 43, 912. 812 94)
3	(5 310, 690)	(5 310. 252, 690. 461)	(5 310. 274 97, 690. 499 46)
4	(5 348, 715)	(5 347. 561, 714. 186)	(5 347. 537 8, 714. 175 61)

圆拟合法,RANSAC 可以从一组含有较多噪声的数据中拟合出理想的椭圆,但它具有不确定性,针对这种齿轮存在遮挡的齿顶圆,只能提取约一半的齿顶角点,使用 RANSAC 法无法拟合出理想椭圆。最小二乘法易受噪声干扰,鲁棒性较低,通过实验测试得到:对遍布四分之三的齿顶角点进行拟合时,最小二乘法与超最小二乘法^[18]的精度相近;当齿顶角点小于一半时,使用最小二乘法拟合出的齿顶圆误差较大,超最小二乘法拟合出的齿顶圆与真实齿顶圆接近,齿顶圆拟合对比图如图 5 所示。

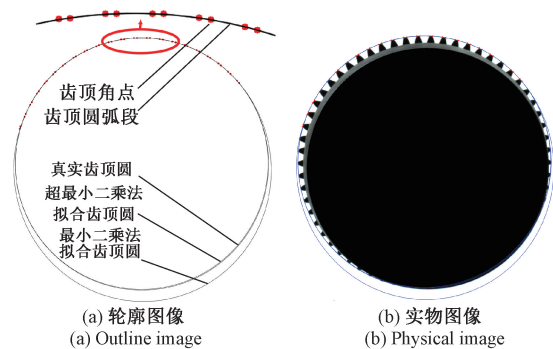


图 5 齿顶圆拟合对比图

Fig. 5 Addendum circle fitting contrast diagram

椭圆参数方程为:

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2f_0(Dx + Ey) + f_0^2F = 0 \quad (6)$$

定义

$$\xi = (x^2, 2xy, y^2, 2f_0x, 2f_0y, f_0^2)^T, \theta = (A, B, C, D, E, F)^T \quad (7)$$

将 Corner_Point 中的 (x_i, y_i) 代入 ξ 中得到向量 ξ_i , 则椭圆参数方程可表示为 $(\xi, \theta) = 0, \theta$ 和 λ 可展开为 $\theta = \bar{\theta} + \Delta_1\theta + \Delta_2\theta + \dots, \lambda = \bar{\lambda} + \Delta_1\lambda + \Delta_2\lambda + \dots$, 其中, $\bar{\theta}$ 和 $\bar{\lambda}$ 为真实值; Δ_1 和 Δ_2 分别为一阶和二阶噪声; 省略号为三阶及以上的噪声。二阶噪声项的偏差 $E[\Delta_2^\perp\theta]$ 代入 $M\theta = \lambda Z\theta$ 计算得:

$$E[\Delta_2^\perp\theta] = \bar{M} \begin{pmatrix} (\bar{\theta}, E(T)\bar{\theta}) \\ (\bar{\theta}, N\bar{\theta}) \end{pmatrix} N\bar{\theta} - E(T)\bar{\theta} = 0 \quad (8)$$

综上, 可进一步计算出椭圆参数:

$$\xi_c = (s_x^2, 2\gamma_{xy}, s_y^2, f_0x_c, f_0y_c, f_0^2)^T, \theta = (1, 0, 1, 0, 0, 0)^T,$$

其中: $\gamma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i$ 。

应用超最小二乘法将齿顶圆点进行拟合, 消除了最小二乘法噪声项的统计偏差, 提高齿顶圆精度与鲁棒性。齿顶圆拟合结果如图 6 所示, 圈内为齿顶圆弧段的局部放大图。

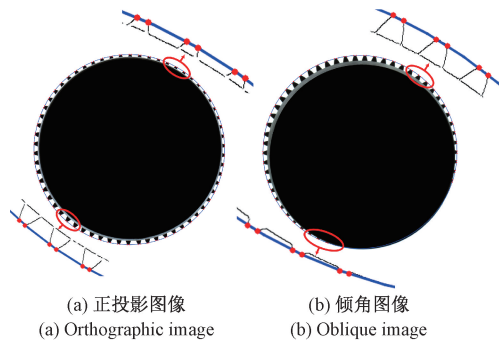


图 6 齿顶圆拟合结果

Fig. 6 Fitting results of addendum circle

1.4 准偏心误差模型及补偿

齿顶圆在透视投影中成像为椭圆, 由于镜头存在畸变与失真, 椭圆的偏心误差^[19]将转化为准偏心误差, 如图 7 所示, 畸变椭圆与透视椭圆存在较大偏差。

Luhmann^[20]指出偏心误差与相机的测量距离成正比, 本文测量时相机工作距离较大将影响椭圆质心精度。因此针对畸变椭圆的偏心误差即准偏心误差建立了数学模型^[21], 描述了圆心投影与椭圆中心的关系。

由于相机镜头存在畸变, 相机模型为非线性透视投影模型, 采用一种求畸变椭圆准中心的方法进行计算: 在齿顶圆上采样 k 个均匀分布的点, 坐标为 (x_i, y_i) , 相对于 (x_i, y_i) 的 k 个投影点 (u_i, v_i) 可以由内参矩阵计算得到。圆周点在世界坐标系下的坐标为 $[x_w \ y_w \ z_w]^T = [x_i \ y_i \ 0]^T$, 畸变椭圆由这 k 个点的投影点拟合而成。

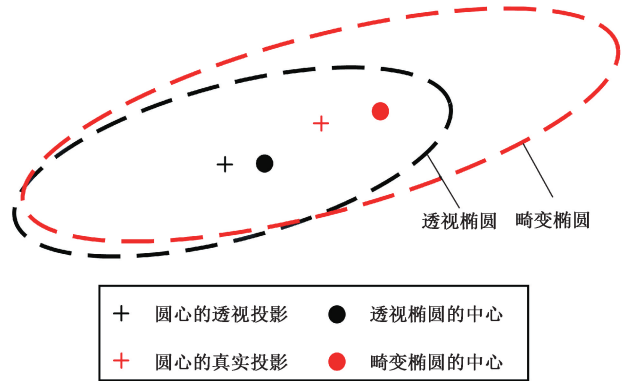


图 7 圆的投影图

Fig. 7 Projection of a circle

圆锥系数矩阵的参数为

$$[A \ B \ C \ D \ E]^T =$$

$$\arg \min_{A, B, C, D, E} \left\{ \sum_{i=1}^k (Au_i^2 + 2Bu_i v_i + Cv_i^2 + 2Du_i + 2Ev_i + 1)^2 \right\},$$

圆锥系数矩阵 Q 为

$$Q = \begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

文献[21]指出畸变椭圆的中心与其拟合椭圆的中心几乎没有差异, 因此使用拟合椭圆来代替畸变椭圆, 采用超最小二乘法进行椭圆拟合后, 畸变椭圆的中心

$$(u_d, v_d) \text{ 为 } u_d = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, v_d = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}.$$

式中: 圆心 (x_0, y_0) 的真实投影点 (u_c, v_c) 可由内参矩阵计算得到, 若 $[x_w \ y_w \ z_w]^T = [x_i \ y_i \ 0]^T$, 畸变椭圆的准偏心误差为 $(u_d - u_c, v_d - v_c)$ 。为保证高精度测量介绍了广义的补偿框架^[21]。根据准偏心误差模型, 通过相机标定得到相机的透视投影矩阵和畸变系数, 使用迭代法优化参数, 进而求解理想的齿顶圆。

由于齿顶圆的相对位置和半径是已知的, 准偏心误差补偿的具体步骤如下:

1) 使用张正友相机标定法^[22]得到相机透视投影矩阵 $K^{(0)}$ 和畸变系数 $P^{(0)}$ 的初始值。

2) 使用本小节的数学模型计算准偏心误差 $(\Delta x_{ij}^{(0)}, \Delta y_{ij}^{(0)})$, $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ (m 为标定板上圆的数量, n 为图像的数量) 并对像素坐标系下的椭圆中心进行误差补偿, 得到补偿后的中心坐标 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}) = (x_{ij}, y_{ij}) + (\Delta x_{ij}^{(0)}, \Delta y_{ij}^{(0)})$ 。

3) 将 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 代替 (x_{ij}, y_{ij}) , 采集 k 张不同角度的图像使用本算法更新透视投影矩阵和失真系数 $(K^{(1)}, P^{(1)}) = \text{CalibrateCamera}((\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}), (X_{ij}, Y_{ij}))$ 。

4) 重复步骤 2) 与步骤 3) 直至相邻迭代中准偏心的

误差变化小于阈值或已达到最高迭代次数,最终补偿的中心点为 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}) = (x_{ij}, y_{ij}) + (\Delta x_{ij}^{(k+1)}, \Delta y_{ij}^{(k+1)})$, 此时相机透视投影矩阵和畸变系数已更新至最优值 $(K^{(k+1)}, P^{(k+1)}) = \text{CalibrateCamera}((\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}), (X_{ij}, Y_{ij}))$ 。

本小节建立了准偏心误差的数学模型并介绍了一种补偿方法,通过迭代补偿法提高测量精度。同一标定板以 10 种不同位姿放置在空间中,将本小节的方法与不考虑补偿的张氏标定法对比,相机标定的结果如表 2 所示。

表 2 镜头存在畸变时相机标定的结果

Table 2 Camera calibration results when lens distortion exists

参数	镜头轻度畸变			镜头严重畸变		
	真实值	张氏标定法	本文方法	真实值	张氏标定法	本文方法
f_x	27 890.00	27 889.96	27 890.00	27 890.00	27 889.93	27 890.01
f_y	27 890.00	27 889.96	27 890.00	27 890.00	27 889.93	27 890.01
c_x	4 670.00	4 670.08	4 669.99	4 670.00	4 670.05	4 670.02
c_y	3 522.00	3 522.10	3 521.98	3 522.00	3 522.07	3 522.01
$k1$	-0.090 0	-0.092 0	-0.090 0	-0.350 0	-0.349 0	-0.350 0
$k2$	0.070 0	0.071 0	0.070 0	0.320 0	0.321 0	0.320 0
$p1$	-0.000 5	-0.000 5	-0.000 5	-0.002 0	-0.002 0	-0.002 0
$p2$	-0.000 5	-0.000 5	-0.000 5	-0.002 0	-0.002 0	-0.002 0
$k3$	0.045 0	0.044 0	0.045 0	0.900 0	0.905 0	0.900 0

2 实验结果与分析

精度与鲁棒性是评判方法优劣的重要依据,为此搭建了视觉测量平台进行验证,实验现场如图 8 所示。齿形结构模拟件固定于精密平台,上端面置有三个激光靶球孔位,工业相机安装于辅助调姿结构正上方,内齿与辅助调姿结构相连,光源打光方式为背光,可清晰捕捉到齿形结构外齿的轮廓边缘。

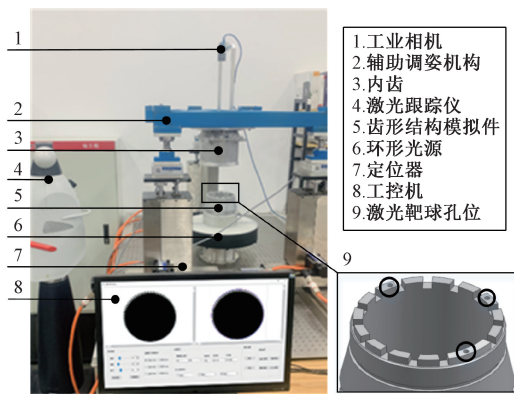


图 8 实验现场图

Fig. 8 Experimental site map

为验证本方法的精度,将此方法提取的圆心坐标转换至激光跟踪仪坐标系下,与激光跟踪仪测量的圆心坐标对比得到圆心偏差;根据文献[23]求解齿顶圆在激光

跟踪仪坐标系下的法向量,与激光跟踪仪测量的法向量对比得到夹角偏差。方法的鲁棒性通过多次变换模拟件的位姿,检验本方法的齿顶圆提取精度。实验平台采用相机的像素为 $9\ 216 \times 7\ 000$,相机工作距离为 $400 \sim 500\ \text{mm}$,齿顶圆直径为 $188.8\ \text{mm}$;相机参数: u, v 轴的像元尺寸均为 $3.2\ \mu\text{m}$,焦距 $f = 89.248\ \text{mm}$,相机主点坐标 $(u_0, v_0) = (4\ 669.82, 3\ 522.46)$ 。

一种齿形结构齿顶圆检测方法的精度与鲁棒性验证实验的具体步骤如下:

1) 使用上一小节提出的方法得到透视投影矩阵 K 与畸变系数 P 。

2) 处理靶球图像 (Image_target) 得到 3 个激光靶球心的像素坐标 $(x_i, y_i)^T$, 在测量齿顶圆无遮挡的条件下使用激光跟踪仪测量 3 个靶球心在激光跟踪仪坐标系下的三维坐标 $(X_i, Y_i, Z_i)^T$, 将上述两组坐标使用 PnP 算法^[24] 计算出像素坐标系至激光跟踪仪坐标系的变换矩阵 T 。

3) 采用本文方法处理 Image_input, 提取齿顶圆圆心的像素坐标 $(c_x, c_y)^T$, 通过下式求得齿顶圆圆心在激光跟踪仪坐标系下的三维坐标 $(C_x, C_y, C_z)^T$ 。

$$(C_x \ C_y \ C_z \ 1)^T = T^{-1}(c_x \ c_y \ 1)^T \quad (10)$$

4) 求解齿顶圆在激光跟踪仪坐标系下的法向量 $(n_x, n_y, n_z)^T$, 由于无法测量真实的齿顶圆圆心与法向量,在模拟件的设计过程中,3 个靶球心构成的圆心即为齿顶圆的圆心,3 个靶球心构成的平面与齿顶圆平行,因模拟件的加工精度为 $0.005\ \text{mm}$,加工误差忽略不计,该

平面的法向量即为齿顶圆的法向量,使用激光跟踪仪测量该圆心与法向量分别为 $(D_x, D_y, D_z)^T$ 和 $(N_x, N_y, N_z)^T$, 因此本方法检测圆心偏差为 $\Delta_d = \sqrt{(C_x - D_x)^2 + (C_y - D_y)^2 + (C_z - D_z)^2}$, 法向量夹角偏差为 $\Delta_\theta = \arccos(n_x \cdot N_x + n_y \cdot N_y + n_z \cdot N_z)$ 。

5) 变换模拟件的位姿, 重复步骤 3) 与步骤 4), 记录

10 组数据。

6) 分析实验数据, 比较本方法与激光跟踪仪的测量值。

同一齿形结构模拟件在 10 组不同位姿下, 采用本文方法和激光跟踪仪分别测量在激光跟踪仪坐标系下的齿顶圆圆心与法向量, 测量结果如表 3 和 4 的第 1~10 组数据所示。

表 3 齿顶圆圆心坐标测量数据

Table 3 Coordinate measurement data of addendum circle center

mm

组别	激光跟踪仪圆心坐标	本文方法圆心坐标	距离偏差 Δ_d
1	(5.456 7, 0.621 3, 752.112 4)	(5.458 2, 0.623 8, 752.158 7)	0.046 4
2	(6.739 8, 1.215 3, 754.172 4)	(6.711 3, 1.198 5, 754.190 1)	0.037 5
3	(5.040 7, 0.125 3, 738.245 8)	(4.998 9, 0.123 7, 738.237 8)	0.042 6
4	(2.436 5, 1.653 0, 740.542 5)	(2.437 8, 1.617 0, 740.570 8)	0.045 8
5	(3.458 0, 2.651 8, 748.674 4)	(3.467 0, 2.617 3, 748.645 3)	0.046 0
6	(4.750 7, 1.174 3, 749.443 8)	(4.712 7, 1.148 6, 749.438 7)	0.046 2
7	(6.156 0, 1.831 7, 742.450 1)	(6.137 7, 1.868 6, 742.440 8)	0.042 2
8	(5.347 8, 2.809 3, 742.156 7)	(5.317 8, 2.788 1, 742.174 2)	0.040 7
9	(4.780 7, 0.456 3, 747.428 4)	(4.745 7, 0.445 9, 747.415 8)	0.038 6
10	(4.839 7, 1.783 8, 746.154 0)	(4.817 9, 1.767 4, 746.177 6)	0.036 1
11	(3.820 61, 2.197 34, 745.866 39)	(3.841 87, 2.168 14, 745.870 69)	0.036 3
12	(3.820 58, 2.197 31, 745.866 36)	(3.841 82, 2.168 19, 745.870 66)	0.036 3
13	(3.820 52, 2.197 34, 745.866 39)	(3.841 84, 2.168 13, 745.870 69)	0.036 4
14	(3.820 59, 2.197 31, 745.866 37)	(3.841 81, 2.168 15, 745.870 67)	0.036 3
15	(3.820 64, 2.197 38, 745.866 33)	(3.841 88, 2.168 15, 745.870 63)	0.036 4
16	(3.820 61, 2.197 32, 745.866 36)	(3.841 87, 2.168 17, 745.870 66)	0.036 3
17	(3.820 66, 2.197 34, 745.866 35)	(3.841 94, 2.168 22, 745.870 65)	0.036 3
18	(3.820 63, 2.197 36, 745.866 37)	(3.841 89, 2.168 17, 745.870 71)	0.036 4
19	(3.820 59, 2.197 36, 745.866 34)	(3.841 84, 2.168 18, 745.870 61)	0.036 3
20	(3.820 64, 2.197 37, 745.866 36)	(3.841 91, 2.168 19, 745.870 73)	0.036 4

为验证重复测量精度, 同一齿形结构模拟件在相同位姿下进行 10 次测量, 将所采集的图像经过本文方法处理, 获取其齿顶圆圆心坐标和法向量, 测量数据如表 3 和 4 的第 11~20 组数据所示, 根据上述数据计算测量重复性, 齿顶圆圆心距离误差及法向量夹角误差的分布图分别如图 9 和 10 所示。

装配系统要求齿顶圆圆心误差应小于 0.060 mm, 法向量夹角误差应小于 0.080°, 重复测量标准差应小于 0.015 mm。在图 8 的实验环境下, 激光跟踪仪在 2 m 工作距离的测量精度为 0.027 mm, 根据上述算法和实验原理分析可知, 测量误差主要来源于算法建模误差、图像处

理误差和激光跟踪仪测量误差。由表 3 和 4 可得, 本文方法测得齿顶圆圆心偏差的变化范围为 0.036~0.047 mm, 法向量夹角的偏差的变化范围为 0.040°~0.056°, 通过文献[25-26]建立的误差传递模型计算出本方法测量的齿顶圆圆心误差为 0.056 mm, 小于系统所要求的 0.060 mm, 法向量误差为 0.068°, 小于系统所要求的 0.080°。由图 9 和 10 可得, 齿顶圆圆心距离的重复测量均值为 0.036 mm, 计算可得重复测量标准差为 0.009 mm。齿顶圆法向量夹角的重复测量均值为 0.045 mm, 计算可得重复测量标准差为 0.005 mm, 满足齿形结构的视觉测量要求。

表 4 齿顶圆法向量测量数据
Table 4 Normal vector measurement data of addendum circle

组别	激光跟踪仪法向量/mm	本文方法法向量/mm	夹角偏差 $\Delta_{\theta}/(^{\circ})$
1	(0.001 25, 0.000 23, 1.000 00)	(0.003 30, 0.001 02, 0.998 87)	0.047 47
2	(0.014 36, 0.002 60, 0.999 89)	(0.014 15, 0.003 01, 0.998 82)	0.046 38
3	(0.001 34, 0.000 17, 1.000 00)	(0.003 41, 0.002 35, 0.998 45)	0.055 61
4	(0.013 96, 0.001 75, 0.999 90)	(0.009 42, 0.002 81, 0.998 79)	0.048 43
5	(0.008 49, 0.014 51, 0.999 86)	(0.012 60, 0.010 14, 0.998 63)	0.050 15
6	(0.007 11, 0.012 16, 0.999 90)	(0.016 22, 0.001 59, 0.998 86)	0.046 94
7	(0.015 29, 0.000 30, 0.999 88)	(0.012 87, 0.008 27, 0.998 61)	0.051 08
8	(0.008 88, 0.009 64, 0.999 91)	(0.015 22, 0.001 59, 0.998 88)	0.045 88
9	(0.006 72, 0.007 30, 0.999 95)	(0.021 73, 0.017 41, 0.998 95)	0.040 65
10	(0.008 87, 0.009 77, 0.999 91)	(0.014 86, 0.001 68, 0.998 90)	0.045 56
11	(0.015 522, 0.001 359, 0.999 878)	(0.015 187, 0.009 884, 0.998 913)	0.043 81
12	(0.015 517, 0.001 314, 0.999 878)	(0.015 177, 0.009 876, 0.998 850)	0.045 25
13	(0.015 515, 0.001 333, 0.999 877)	(0.015 175, 0.009 875, 0.998 850)	0.045 26
14	(0.015 506, 0.001 333, 0.999 876)	(0.015 168, 0.009 868, 0.998 820)	0.045 95
15	(0.015 510, 0.001 306, 0.999 876)	(0.015 171, 0.009 871, 0.998 830)	0.045 73
16	(0.015 529, 0.001 312, 0.999 871)	(0.015 161, 0.009 861, 0.998 940)	0.043 37
17	(0.015 541, 0.001 328, 0.999 877)	(0.015 198, 0.009 896, 0.998 930)	0.043 44
18	(0.015 519, 0.001 358, 0.999 878)	(0.015 179, 0.009 878, 0.998 860)	0.045 01
19	(0.015 518, 0.001 348, 0.999 878)	(0.015 178, 0.009 877, 0.998 860)	0.045 02
20	(0.015 538, 0.001 326, 0.999 875)	(0.015 196, 0.009 894, 0.998 920)	0.043 72

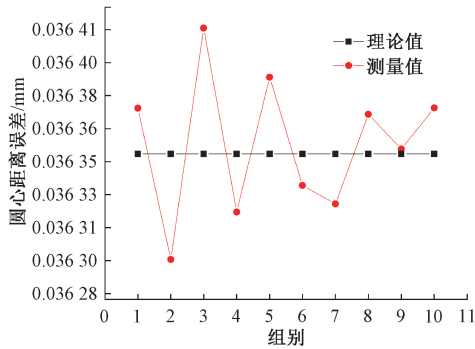


图 9 圆心坐标距离误差分布图

Fig. 9 Distance error distribution of center coordinates

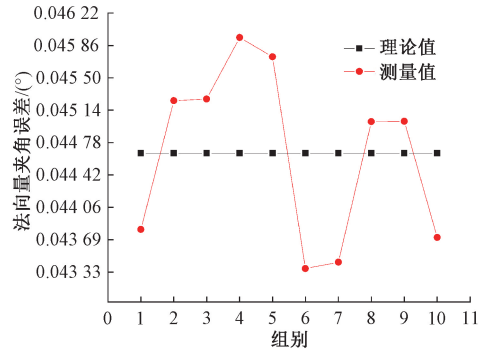


图 10 法向量夹角误差分布图

Fig. 10 The error distribution of the included angle of normal vectors

3 结 论

本文针对传统图像处理无法检测高精度齿形结构齿顶圆、对齿轮存在遮挡的齿顶圆提取鲁棒性差的问题,提出基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法,利用改进的 CSS 技术完成齿顶角点的提取并对角点进行亚像

素定位,采用超最小二乘法拟合齿顶椭圆,解决了轮齿存在遮挡时齿顶圆提取鲁棒性差的问题,通过补偿镜头畸变产生的准偏心误差进一步提高测量精度,最后进行了精度与鲁棒性验证实验。实验结果表明本文方法能够同时完成包含全部和部分轮齿图像齿顶圆的提取,齿顶圆圆心测量精度为 0.056 mm,法向量测量精度为 0.068°,

重复测量标准差优于0.01 mm,测量精度高且鲁棒性强,尤其是轮齿存在部分遮挡时具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 乔玉晶,王浩然,赵燕江.大尺寸曲面零件的双目视觉测量网络规划研究[J].仪器仪表学报,2015,36(4):913-918.
QIAO Y J, WANG H R, ZHAO Y J. Study on binocular vision measurement network layout for large curved surface parts [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(4): 913-918.
- [2] 支珊,赵文珍,段振云,等.视觉测量齿轮定位偏心对齿距测量精度的影响[J].仪器仪表学报,2019,(2):205-212.
ZHI SH, ZHAO W ZH, DUAN ZH Y, et al. Influence of gear location eccentricity in visual measurement on gear measurement accuracy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,(2):205-212.
- [3] 韩江,高婷,江本赤,等.非圆齿轮齿廓特性分析及偏差测量方法研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(10):1520-1533.
HAN J, GAO T, JIANG B CH, et al. Tooth profile characteristics analysis and deviation measurement study of noncircular gear [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30 (10): 1520-1533.
- [4] 鲍强伟,樊友高,丁晓宇,等.基于信息单元的装配尺寸链自动生成技术[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(11):1989-1999.
BAO Q W, FAN Y G, DING X Y, et al. A method of automatic generation of assembly dimension chains based on information cells [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28 (11): 1989-1999.
- [5] DENG Z P, LI S G, ZENG Q, et al. A coaxial alignment method for large aircraft component assembly using distributed monocular vision[J]. Assembly Automation, 2018, 38(4): 437-449.
- [6] 张广世,葛广英,朱荣华,等.基于改进YOLOv3网络的齿轮缺陷检测[J].激光与光电子学进展,2020,57(12):153-161.
ZHANG G SH, GE G Y, ZHU R H, et al. Gear defect detection based on improved YOLOv3 network [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (12): 153-161.
- [7] 林家春,张凌浩,石照耀.锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置设计[J].仪器仪表学报,2017,38(5):1176-1183.
LIN J CH, ZHANG L H, SHI ZH Y. Design of automatic detection device for grinding burn of bevel gear tooth surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5):1176-1183.
- [8] 高志强,曾志强,杜文华,等.基于机器视觉的尼龙齿轮检测研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020(5):74-77.
GAO ZH Q, ZENG ZH Q, DU W H, et al. Study on nylon gear detection based on machine vision [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(5): 74-77.
- [9] 王宁,段振云,赵文辉,等.视觉检测中齿轮外轮廓分段方法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2016(4):117-120.
WANG N, DUAN ZH Y, ZHAO W H, et al. Research on method of gear outer contour segmentation in vision measurement[J]. Modular Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2016(4): 117-120.
- [10] 邵勇,张钰婷,顾桂鹏,等.基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(9):1385-1393.
SHAO Y, ZHANG Y T, GU G P, et al. Research of spur gear detection method based on minimum convex hull [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument. 2017, 31(9): 1385-1393.
- [11] MOKHTARIAN F, SUOMELA R. Robust image corner detection through curvature scale space [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 1376-1381.
- [12] CUI J, XIE J, LIU T, et al. Corners detection on finger vein images using the improved Harris algorithm [J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(17): 4668-4671.
- [13] LEE J, TANG H, PARK J. Energy efficient canny edge detector for advanced mobile vision applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 28(4):1037-1046.
- [14] KONG Q, LI D, LIU G, et al. Subpixel corner point detecting method based on greyscale constraint used for calibrating industrial microscopic systems [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8852-8857.
- [15] 张辉,李泮泉,徐岩,等.一种面向叉耳式翼身对接的视觉测量方法[J].航空制造技术,2017,60(21):56-61.
ZHANG H, LI L G, XU Y, et al. A vision measuring method for fork type wing-fuselage docking [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 56-61.
- [16] LIU R, SUN H M, WEI J, et al. Ellipse detection and

- fitting based on RANSAC[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology, 2012, 10(4):35-46.
- [17] PILU A. Ellipse-specific direct least-square fitting[C]. IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2002.
- [18] KENICHI K, PRASANNA R. Hyper least squares fitting of circles and ellipses[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2010, 55(6):2197-2208.
- [19] 熊祥. 面向齿轮测量中心的误差修正技术[D]. 北京:北京工业大学, 2019.
- XIONG X. Error correction technology for gear measuring center [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [20] LUHMANN T. Eccentricity in images of circular and spherical targets and its impact on spatial intersection[J]. The Photogrammetric Record, 2014, 29(148): 417-433.
- [21] SHEN Y, ZHANG X, CHENG W, et al. Quasi-eccentricity error modeling and compensation in vision metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(4):29-45.
- [22] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [23] SHIU Y C, AHMAD S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision[C]. IEEE International Conference on Systems, IEEE, 2002.
- [24] LEPETITT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [25] 屈也频,侯旺. 基于误差传播理论的 PnP 问题姿态精度分析[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 479-487.
- QU Y P, HOU W. Attitude accuracy analysis of PnP based on error propagation theory [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 479-487.
- [26] 阎艳,王戈,张发平,等. 基于误差传递模型的精密装配几何误差灵敏度分析[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(7): 682-686.
- YAN Y, WANG G, ZHANG F P, et al. Precision assembly geometric error sensitivity analysis based on the error transformation model for precision assembly [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(7): 682-686

作者简介



孔盛杰, 2020 年于浙江师范大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为视觉测量。

E-mail: 761796299@qq.com

Kong Shengjie received his B. Sc. degree in 2020 from Zhejiang Normal University, now he is a graduate student in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research is vision measurement.



黄翔(通信作者), 1987 年于南京航空航天大学获得学士学位, 1990 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 1996 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为飞机装配和数字化测量。

E-mail: xhuang@nuaa.edu.cn

Huang Xiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1987 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, received his M. Sc. degree in 1990 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, received his Ph. D. degree in 1996 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, now he is professor and doctoral supervisor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include aircraft assembly and digital measurement.