

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.037

齿廓倒角装备的视觉辅助机器人系统开发

毕德学¹, 刘建锋¹, 王梓铭¹, 程颖¹, 邹旻²

(1. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津海河乳品有限公司, 天津 300308)

摘要:多规格小批量齿轮轮廓的自动倒角加工是行业难题。针对此问题,研制齿廓倒角装备的视觉辅助机器人系统,并对 3 项关键技术进行研究:基于活动式托盘与气动锥销相结合的自适应齿轮快速机械定位系统,实现齿廓倒角的初定位;基于理论齿廓模型与视觉测量齿廓的配准融合,测量齿轮轮廓的三维位姿误差并补偿,实现齿廓的精定位;针对倒角面的角度和宽度的加工指标要求,推导锥形铣刀的刀补模型,实现加工轨迹的精确定位。实验证明:对于直径为 600~700 mm 的齿轮,系统最大加工误差小于 0.2 mm;对于直径为 700~800 mm 的齿轮,系统最大加工误差小于 0.3 mm。可以满足齿廓的自动化倒角加工的精度要求。

关键词:视觉辅助;倒角加工;齿廓配准;刀补模型

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0200-07

Robot Tooth Profile Chamfer System Development with Visual Assistance

BI Dexue¹, LIU Jianfeng¹, WANG Ziming¹, CHENG Ying¹, ZOU Yang²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin Haihe Dairy Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract:To tackle the difficulty in automatic chamfering of specifications and small-batch gear profiles in the industry, this paper develops a vision aided robot system for tooth profile chamfer equipment, and studies its three key technologies. The adaptive gear rapid mechanical positioning system is established based on the combination of movable tray and pneumatic taper pin to realize initial positioning of tooth profile chamfer. Based on the registration fusion of theoretical profile model and visual profile measurement, the 3D pose error of gear profile is measured and compensated, and the precise positioning of tooth profile is realized. According to the requirements of the angle and width of the chamfer surface, the cutter complement model of the taper milling cutter is derived, and the precise location of the machining trajectory is realized. Experiments show that the maximum machining error of the system is less than 0.2 mm for gears with diameter of 600 to 700 mm, and for gears with a diameter of 700 to 800 mm, the maximum machining error of the system is less than 0.3 mm, meeting the precision requirements of automatic chamfering of tooth profile.

Keywords:visual assistance; chamfer processing; tooth profile registration; knife repair model

0 引言

齿轮作为机械制造业的核心部件之一,扮演着传递运动和动力的重要角色。大型齿轮在矿山开采、船舶制造、风力发电等行业得到广泛应用,而齿轮产品的制造也朝着小批量定制化、多样化方向发展,以满足不同类型的需求^[1]。在齿轮产品小批量、多样化生产的背景下,齿轮倒角的加工效率和质量显得尤为重要。然而,现有的齿轮倒角加工设备一般为自动化倒角加工专用机床,其具有较大的局限性,主要体现在其只能加工固定型号的齿轮,并不能满足加工多样化齿轮的需求。而对于小批量、多样化的齿轮倒角的生产目前只

能通过人工手持角磨机进行,如图 1 所示,它不仅耗时耗力,而且容易受到人为因素的影响,导致加工的效率低下和倒角质量的不稳定性^[2]。

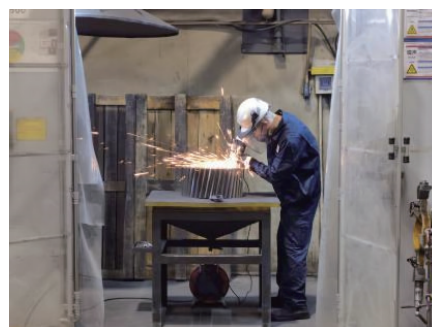


图 1 人工齿轮倒角加工

基金项目:国家青年科学基金项目(61705166);天津市教委科研计划项目(2017KJ019)

第一作者简介:毕德学(1969—),男,山东济南人,教授,硕士生导师,博士,研究方向为机器人与机器视觉,dexue@tust.edu.cn。

为了满足多批次小批量的齿轮倒角柔性加工需求,本文设计了一种多型号齿轮倒角自动加工系统,代替了人工的齿轮倒角方式,解决了原有的加工机床的局限性。机器人和自动化设备具有高精度和高重复性,通过编程实现多型号齿轮倒角加工,能够减少人为误差的影响,保证加工质量的一致性^[3]。同时,为了补偿不同型号齿轮的定位误差,采用视觉的方法进行测量和补偿^[4]。

基于工业机器人的多型号、小批量齿轮倒角自动加工系统的设计,有以下困难:1)满足不同型号产品连续工作的自动上料、夹紧定位及输送系统设计;2)加工工位齿轮的定位要适应不同型号的齿轮需求,机械定位的刚度和精度靠机械系统无法完成满足较高精度要求的倒角加工;3)倒角加工的轨迹精度要求倒角面满足一定的角度和宽度尺寸要求。因此需要建立刀具倒角加工的数学模型。

针对以上难题,本文研制了视觉辅助下的机器人齿廓自动倒角系统,并对3项关键技术进行了研究:1)基于活动式托盘与气动锥销相结合的自适应齿轮快速机械定位系统,实现齿廓倒角的初定位;2)基于理论齿廓模型与视觉测量齿廓的配准融合,测量齿轮轮廓的三维位姿误差并补偿,实现齿廓的精定位;3)针对倒角面角度和宽度的加工指标要求,推导了锥形铣刀的刀补模型,实现了加工轨迹的精确定位。实验证明,对于直径为600~700 mm的齿轮,系统最大加工误差小于0.2 mm;对于直径为700~800 mm的齿轮,系统最大加工误差小于0.3 mm。如表1所示,该系统可以满足齿廓的自动化倒角加工的精度要求。

表1 斜齿轮参数和加工精度

直径/mm	模数/mm	齿数	加工精度/mm
600~700	13.2	43	0.2
	18.3	35	
	18.8	35	
	20.6	35	
700~800	12.0	72	0.3
	11.7	89	

1 视觉辅助下的齿轮倒角加工系统设计

多规格齿轮倒角自动加工系统最关键的问题是加工工件的定位精度问题。本文设计了基于视觉辅助、活动托盘及气动锥销机械定位融合的齿

轮倒角加工系统,如图2和图3所示,系统分为3大部分:四工位输送系统(上下料工位、两个输送工位、加工工位)、机器人倒角系统及基于xyz-移动平台的视觉辅助系统^[5]。其中,加工工位如图3所示,包括机器人倒角系统(ABB机器人本体、旋转电主轴和加工刀具),加工刀具固定在机器人末端执行器的旋转电主轴上;视觉定位系统安装在xyz移动平台上,可以调整位置,由工业相机和激光位移传感器组成,分别测量齿廓图像和齿廓高度;加工工位由转台、气动锥销、活动托盘、四爪卡盘和加工工件组成。

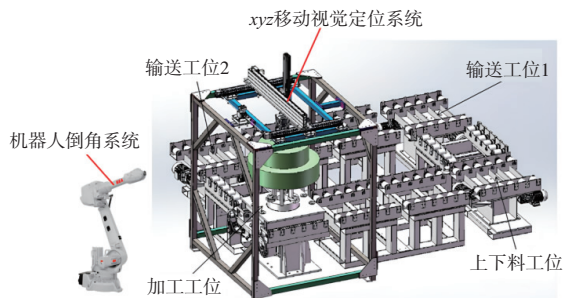


图2 齿轮自动倒角系统整体设备三维图

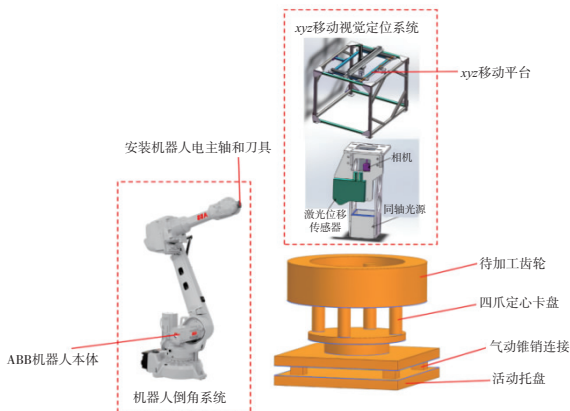


图3 加工工位示意图

在图2中,系统整体设备的三维图展现了待加工齿轮的加工流程。输送系统最多有4个活动托盘,每个工位1个;活动托盘上安装有四爪卡盘,侧面安装气动锥形销孔,四爪卡盘固定不同型号的齿轮,如图3所示。首先,待加工齿轮由上下料工位上料,安装在四爪卡盘上夹紧,然后输送至输送工位1,再经输送工位2,最终到达加工工位,通过活动托盘上的4个气动锥孔与转台上的锥销配合定位,视觉定位系统测量不同工件的机械定位误差,进行位姿误差补偿;根据倒角加工的指标要求,齿廓轨迹经过刀补模型转变为刀具加工轨

迹,最后机器人根据获得的加工轨迹,完成齿廓的倒角加工。以上过程循环进行,形成并行输送加工过程。加工完成后,机器人返回初始位置,加工好的齿轮从加工工位输送至上下料工位下料。这种四工位协调加工系统取代了传统的人工上下料逐个加工齿轮倒角的方式,显著提高了加工效率^[6]。

基于活动托盘及气动锥销融合定位的齿轮倒角加工系统,由于要适应齿轮的快速定位及多品种的夹紧需求,造成机械定位系统的整体刚度不足,对于 600 mm 以上直径的齿轮,定位精度大于 1.0 mm,无法满足齿轮倒角需求的 0.2 ~ 0.3 mm 以内,因此需要视觉测量系统进行误差补偿。

齿轮以是否是斜齿为标准分成两类,其中斜齿轮包含平面齿廓部分和斜角齿廓部分,而视觉传感器只能提取平面齿廓部分,而且容易受到污渍干扰,往往只能获得不完整的齿轮线。所以本文提出了一种新型的轮廓模型定位误差补偿方法:1) 推导完整的上下端面的齿廓模型;2) 基于视觉测量获得的齿廓数据,由于斜角或污渍干扰,可能并不完整;3) 利用完整的齿廓数学模型和视觉测量轮廓进行高精度配准,获取它们之间的位姿关系,并将完整的齿廓模型转换到视觉系统的相机坐标系,代替视觉测量的轮廓;4) 利用手眼标定方法,转换到机器人坐标系;5) 通过刀补模型将齿廓轨迹转换为刀具加工轨迹,完成机器人刀具加工。具体流程如图 4 所示。

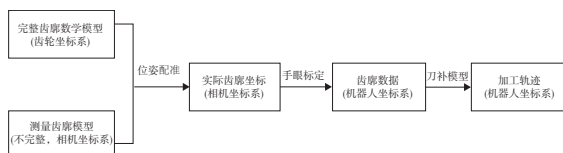


图 4 视觉辅助的齿廓倒角流程图

2 视觉辅助下的齿廓坐标获取方法研究

2.1 齿轮上下端面轮廓的数学模型

齿轮齿廓线的数学模型通常基于齿廓法线法和包络法求出,齿轮齿廓线模型比较复杂,与齿轮滚刀刀具参数相关,因此本项目直接用高精度三坐标测量仪测量得到斜齿轮的齿廓横截面数据,拟和轮廓。以齿轮中心作为坐标原点、齿轮齿廓的对称轴线作为 y 轴,建立三维坐标系。以一个斜齿轮的齿为例,三坐标测量仪测得的坐标系建立后的上端面齿廓数据模型如图 5 所示。

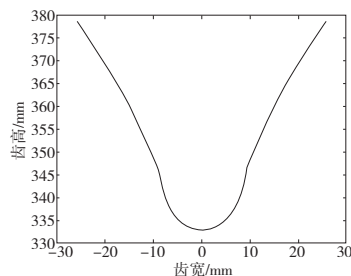


图 5 三坐标测量仪齿廓模型

渐开线斜齿圆柱齿轮展开图如图 6 所示。

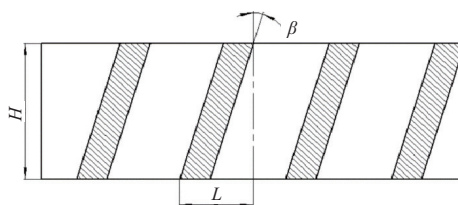


图 6 斜齿圆柱齿轮展开图

下端面的齿廓点 (x, y, z) 与上端面 (x_1, y_1, z_1) 的关系方程为

$$\begin{cases} x = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \times \cos\left(\frac{2H\sin\beta}{m_n \times z} + \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right)\right) \\ y = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \times \sin\left(\frac{2H\sin\beta}{m_n \times z} + \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right)\right) \\ z = z_1 - H \end{cases} \quad (1)$$

式中: β 为螺旋角; H 为齿轮厚度; L 为上下端面齿廓偏移量; r 为齿轮分度圆半径; r_a 为齿轮齿顶圆的半径; m_n 为法向模数。

2.2 视觉测量齿廓模型的获取

视觉测量装置如图 7 所示,包括单目相机、激光位移传感器和光源等,其中单目相机和光源用来获得齿轮的平面二维信息,但是单目相机获得的信息深度方向缺失信息,因此借助激光位移传感器获得齿轮深度信息,用于补偿单目相机的测量局限,从而实现对齿轮轮廓的三维模型测量。在提取齿轮轮廓之前需要对单目相机和激光位移传感器机型标定,以保证单目相机和激光位移传感器在测量齿轮时稳定工作。

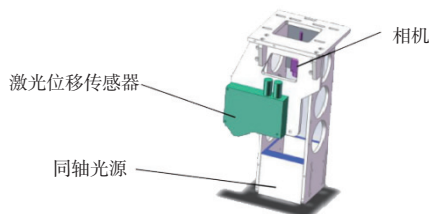


图 7 视觉测量装置

1) 齿廓亚像素坐标的获取

基于德国产 Basler 1920-150 um 相机,拍摄齿廓图像,并利用 Canny 算子实现轮廓的高精度亚像素坐标提取,如图 8 所示。

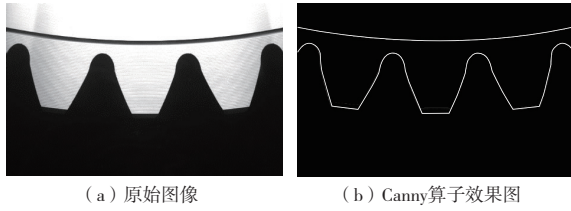


图 8 边缘检测算子效果图

2) 相机坐标系下的齿廓坐标获取

基于小孔成像模型和激光传感器测得的物距,获得相机坐标系下的轮廓坐标,如图 9 所示。相机坐标系原点建立在镜头的光心上, x 轴方向与像素坐标系的水平方向平行,光轴方向为 z 轴方向。

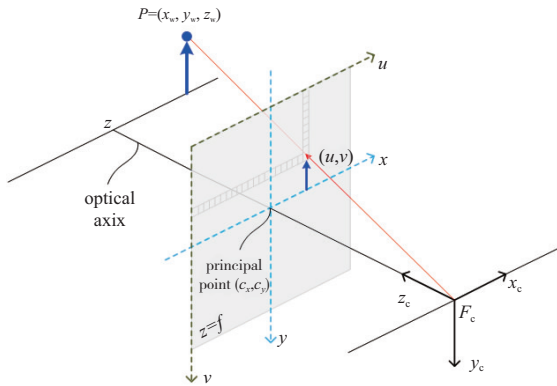


图 9 针孔相机模型

因此建立如下关系式:

$$\begin{cases} \mu = \frac{f_x x_c}{z_c} + c_x \\ \nu = \frac{f_y y_c}{z_c} + c_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: (μ, ν) 为齿廓的像素坐标; z_c 由激光器测得的距离 s 经过激光器与相机坐标系的位姿(标定已知)变换获得; (c_x, c_y) 为光轴的像素坐标。因此,已知齿廓的亚像素坐标 (μ, ν) ,可以根据上式获得相机坐标系中的齿廓坐标 (x_c, y_c, z_c) 。为了获得更准确的坐标,可以把镜头的畸变模型也考虑进去,去除畸变误差。

$$\begin{cases} x_{c_distorted} = x_c (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y_{c_distorted} = y_c (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1, k_2 为镜头的畸变系数,通过相机标定得

到; r 为点到光轴的距离。

3 基于粗-精融合的齿廓位姿配准方法研究

由前面部分可知,齿轮轮廓视觉测量不完整,轮廓线上的噪点干扰或斜面的部分无法准确测量,因此需要利用模型配准的方法补齐视觉未能测量的轮廓线。如图 10 所示,此图为斜齿轮的例子,齿廓的一部分由于是斜齿无法准确获得。

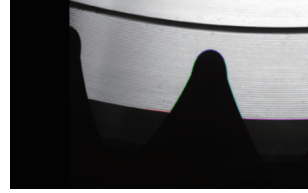


图 10 图像处理算法提取的斜齿轮齿廓

将前面利用图像处理提取的齿廓视觉模型与建立的齿廓数学模型进行匹配^[7-8],可以得到二者的位姿关系矩阵,并将完整的数学模型转换到相机坐标系的相应位姿,代替不完整的视觉测量轮廓线。

齿廓视觉与数学模型点云配准的主要过程为分别求取图像处理提取的齿廓视觉模型与理论齿廓数学模型点云法向量,并计算点云快速点的特征直方图^[9](FPFH)。利用特征直方图,再通过 SAC 算法将轮廓视觉模型与齿廓数学模型进行初步的配准,将二者的位姿大致匹配到一起,此方式又称为点云粗配准,其目的是在初始对齐或预处理阶段给后续步骤提供一个良好的初始估计。通过 ICP 算法将两个模型进行更加精确地配准,在配准阶段,算法会使用一些优化方法来最小化点云之间的差异,使它们更好地对齐或融合,此方式又称为点云精配准。通过这种粗-精融合的点云配准方法,可以将两种模型精确地对齐。配准流程图如图 11 所示。



图 11 点云配准流程图

3.1 SAC 粗配准

根据点云的点对特征进行筛选匹配点对^[10-11],SAC 粗配准算法的具体过程如下。

1) 将齿廓数学模型作为待配准点云 P , 在点云 P 里选择 n 个样本点; 将齿廓视觉模型作为目标点云 Q , 从目标点云 Q 里找出与所选择的样本

点相似的 FPFH 点作为采样点的对应点。

2) 通过计算齿廓数学模型到视觉模型的刚体变换矩阵,用得到的矩阵进行点云配准,用 Huber 罚函数表示点云配准后计算对应点的误差和函数:

$$H(e_i) = \begin{cases} e_i^2/2 & \|e_i\| \geq l_e \\ l_e(2\|e_i\| - l_e)/2 & \|e_i\| \leq l_e \end{cases} \quad (4)$$

式中: l_e 为设定的阈值; e_i 为第 i 组对应点进行变换后的距离差。

3) 重复上述步骤,对所有点通过矩阵进行变换,筛选出粗配准过程中的最优变换矩阵,选择标准是所有的矩阵变换中误差和值最小的矩阵。

3.2 ICP 精配准

ICP 算法的具体过程如下:

1) 在三坐标测量仪数据建立的齿廓数学模型的点云 P 中提取特征点集,再利用图像处理提取的齿廓视觉模型的点云 Q 中找到与其欧几里得距离最近的点集,从而构成对应点集。

2) 用奇异值分解法求解对应点集的刚体变换矩阵,使得目标函数值最小,并根据求解得到的变换矩阵更新源点云 P ,得到更新的点云 P' 。

3) 计算新的点云 P' 和目标点云 Q 对应点的平均距离,其中 w_i 是针对每个点的权重系数:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \|Q_i - P_i\|^2 \quad (5)$$

根据上式求得平均距离作为判断迭代是否终止,当 d 小于设置的阈值或者达到了设置的迭代次数,则算法停止,否则返回步骤 2) 继续迭代。

4 齿轮倒角的刀补模型及加工轨迹规划

获得机器人坐标系下的轮廓数据后,需要进行刀具模型的补偿,以便生成实际加工所需的数据。这是因为机器人加工实际上是刀具加工的路线,利用锥形刀具刀尖的轨迹代表。倒角加工的技术指标包括两个部分,第 1 个技术指标是倒角面与齿廓平面的夹角,通常在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间。第 2 个技术指标是倒角面的宽度即为如图 12 中 A 、 B 两点之间的距离。选择轮廓夹角为 90° 的锥形铣刀通常能满足第一个技术指标。因此刀补模型推导主要由第 2 个技术指标确定。

如图 12 所示,刀具在加工平面齿廓的过程中始终与齿廓面垂直,刀尖与齿廓面始终保持在同一高度上, D 、 D' 两点分别为左、右齿廓的轨迹点, C 、 C' 为刀具加工的轨迹点, l_{AB} 、 $l_{A'B'}$ 分别为左、右倒

角面的宽度。

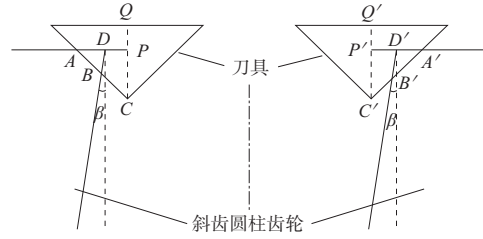


图 12 刀具加工上端面齿廓示意图

刀具的形状是一个锥角为 90° 的圆锥,直径为 d 。在本文中,所选刀具的直径为 9.9 mm,刀具的切削高度 h_{PC} 是刀具高度 h_{QC} 的 $2/3$,倒角的加工量分别是 l_{AB} 和 $l_{A'B'}$,而刀具左右两侧的加工量分别是 l_{AD} 和 $l_{A'D'}$ 。由于受到螺旋角 β 的影响,刀具左、右两侧的加工量会有所不同。左侧倒角的关系为

$$\frac{l_{AB}}{\sin(90^\circ - \beta)} = \frac{l_{AD}}{\sin(45^\circ + \beta)} \quad (6)$$

右侧倒角的关系为

$$\frac{l_{A'B'}}{\sin(90^\circ + \beta)} = \frac{l_{A'D'}}{\sin(45^\circ - \beta)} \quad (7)$$

刀具左侧的偏移量 d_{DP} 为

$$d_{DP} = \frac{d}{2} \times k_h - \frac{\sin(45^\circ + \beta)}{\sin(90^\circ - \beta)} \times l_{AB} \quad (8)$$

刀具右侧的偏移量 $d_{D'P'}$ 为

$$d_{D'P'} = \frac{d}{2} \times k_h - \frac{\sin(45^\circ - \beta)}{\sin(90^\circ + \beta)} \times l_{A'B'} \quad (9)$$

在进行齿轮加工前,根据左右轮廓模型的渐开线部分分别向内平移 d_{DP} 、 $d_{D'P'}$,形成刀具加工轨迹,而中间齿根圆曲线为左、右渐开线平移的均值。值得注意的是,刀具加工时的姿态始终与齿廓表面垂直并且距离不变。图 13 所示是齿廓轨迹和刀具加工轨迹的示意图。

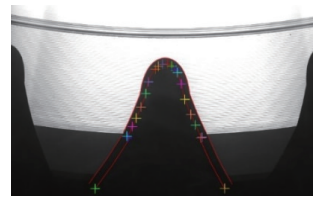


图 13 斜齿轮加工轨迹

5 实验验证及结果分析

5.1 基于 SAC-ICP 的粗精融合配准

本文选择了斜齿轮的几种规格(模数 13.2、18.3、20.6)进行基于 SAC-ICP 的粗、精融合配准,

配准误差如表 2 所示:

表 2 配准误差			单位:mm
参数	齿轮模数		
	13.2	18.3	20.6
x 方向平均距离	0.010 3	0.012 5	0.013 1
y 方向平均距离	0.009 3	0.010 3	0.010 5
整体平均距离	0.013 9	0.016 2	0.016 8
最大距离	0.023 2	0.028 6	0.025 6
最小距离	0.000 5	0.000 6	0.000 8

由表 2 可知,3 种规格齿轮的数学模型与视觉模型的配准误差在 0.05 mm 以内,最大偏差距离也控制在 0.1 mm 以内,能够满足加工要求。为了直观地看到斜齿的拼接准确度,把斜齿部分坐标系转至像素坐标系从而和原图像的斜齿位置进行对比,如图 14 所示,这 3 张图是 3 种型号齿轮在像素坐标系下的斜齿拼接示意图。

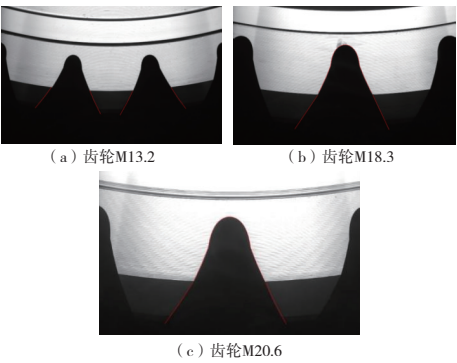


图 14 像素坐标系下斜齿拼接示意图

5.2 齿廓倒角加工精度及误差

齿轮倒角自动加工的最终效果对于本文所提出的齿廓倒角装备视觉辅助机器人系统的研究是否能够实际应用在生产中具有重要意义。加工精度直接反映了自动倒角技术的可行性和实用性。通过与人工加工效果进行对比,可以更好地评估自动倒角加工的效果,加工效果对比如图 15 所示。

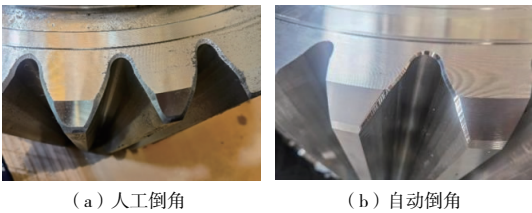


图 15 斜齿轮倒角加工效果对比图

通过对比人工倒角和自动倒角加工效果,可以观察到人工倒角加工出来的倒角表面凹凸不平,而自动倒角加工出来的倒角光滑平整且更加均匀。为了进一步验证实际加工的倒角量和理论倒角量之间的精度误差,同样选择了斜齿轮的几种规格:模数 13.2、齿数 43;模数 18.3、齿数 35;模数 20.6、齿数 35 进行倒角加工精度的统计。通过统计分析实际倒角量和理论倒角量之间的差异,可以评估自动倒角加工的精度,加工效果如表 3 所示,加工效率如表 4 所示。

表 3 斜齿轮倒角加工效果

模数/mm	齿数	理论倒角量/mm	平均平面倒角量/mm	精度误差/mm	平均斜面倒角量/mm	斜齿精度误差/mm
13.2	43	2	1.86	0.14	2.16	0.16
18.3	35	2	1.84	0.16	2.22	0.22
20.6	35	3	2.75	0.25	3.26	0.26

表 4 斜齿轮倒角加工效率

模数/mm	齿廓倒角装备的视觉辅助机器人系统加工时间				人工加工时间
	单个齿廓加工时间/s	齿轮上端面加工时间/min	齿轮下端面加工时间/min	一个完整齿轮的加工时间/min	一个完整齿轮的加工时间/min
13.2	2.0	5.0	5.5	11	30
18.3	2.8	6.5	7.0	14	35
20.6	3.0	7.0	7.5	15	40

倒角加工误差包括刀具的刚性形变和磨损、点云配准算法的精度以及平面与斜齿拼接点的误差。尽管存在这些误差因素,自动倒角加工的精度仍然可以控制在 0.3 mm 以内。另外,从表 4 中可以看出加工效率相比于人工加工而言提高了 60% 以上,这满足了实际生产的要求。

6 结语

针对多型号小批量齿轮轮廓的自动倒角加工的行业难题,本文研制了视觉辅助下的机器人齿廓自动倒角系统,基于活动式托盘与气动锥销相结合的自适应齿轮快速机械定位系统,实现了齿廓倒角的初定位;基于理论齿廓模型与视觉测量齿廓的配准融合,完成了轮廓的三维位姿动态测量和缺少轮廓的补偿,同时实现了相机坐标系下齿廓的精定位;针对倒角面的角度和宽度的加工指标要求,推导了锥形铣刀的刀补模型,实现了加工轨迹的精确定位。实验证明,对于直径为 600~700 mm 的齿轮,系统最大加工误差小于 0.2 mm;对于直径为 700~800 mm 的齿轮,系统最大加工误差小于 0.3 mm。这可以满足齿廓的自动化倒角加工的精度要求。

参考文献:

- [1] 周宝华,姬惠勇,盛显涛,等. 浅谈现代机械制造技术的新发展[J]. 煤矿机械,2006,27(3):366-368.
- [2] 于少龙. 机器人磨削用于高硬度弧齿锥齿轮倒角[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):175-177.

- [3] HU J, KABIR A M, HARTFORD S M, et al. Robotic deburring and chamfering of complex geometries in high-mix/low-volume production applications [C]//2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Hong Kong, China: IEEE, 2020.
- [4] 杨丹. 基于机器视觉的齿轮测量技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [5] 张景辉. 基于机器视觉的直齿圆柱齿轮测量系统的设计与实现[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [6] 郝孝其. 基于机器视觉的大型外齿轮倒角关键技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- [7] LIU H, WANG S L, ZHAO D H. Initial alignment for point cloud registration by improved differential evolution algorithm[J]. Optik, 2021, 243:166856.
- [8] 楚慧娟, 李薇. 利用邻域特征点相关性的点云配准算法[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(12):189-191.
- [9] 谭国威, 伍吉仓. 基于 FPFH 特征的三维点云配准方法研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(4):52-56.
- [10] 陈学伟, 朱耀麟, 武桐, 等. 基于 SAC-IA 和改进 ICP 算法的点云配准技术[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(3):395-401.
- [11] SHI X Y, PENG J J, LI J P, et al. The iterative closest point registration algorithm based on the normal distribution transformation [J]. Procedia Computer Science, 2019, 147:181-190.

收稿日期:2023-10-24

(上接第 95 页)

- [9] 吴萍, 田亮. 基于均值学习策略果蝇算法的工业机器人轨迹规划[J]. 机械设计, 2023, 40(2):126-133.
- [10] 张晓茹, 王丹, 周锦程. 求解高维函数的果蝇免疫协同优化算法[J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(1):105-110.
- [11] 吴迎晨, 肖彪, 赵正彩, 等. 柔性作业车间调度多策略果蝇优化算法研究[J]. 现代制造工程, 2023(5):22-30, 44.
- [12] 李光, 谭薪兴, 肖帆, 等. 基于改进适应度函数组合法的机器人逆运动学求解[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10):436-445.
- [13] 刘承婷, 陈甜, 于振国, 等. 基于小扰动理论的低频脉冲压力波在井筒内传播规律分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(4):1424-1431.
- [14] 梁旭, 张朝阳, 吉卫喜, 等. 基于 KPCA-ISSA-SVM 的控制图模式识别[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(7):128-134, 140.

- [15] 阚学达, 桂琼, 张攀峰. 基于决策边界的倾斜森林分类算法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(2):391-398.
- [16] 周玉, 刘虹瑜, 李京京, 等. 局部密度最小不确定性的 SVM 样本选择算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(8):45-56.
- [17] 裴向东, 王庆林, 廖林玉, 等. 多核数字信号处理器并行矩阵转置算法优化[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(1):57-66.
- [18] 孙子文, 袁广林, 李从利, 等. 基于 DIoU 损失与平滑约束的结构化 SVM 目标跟踪方法[J]. 计算机科学, 2024, 51(增刊 1):401-408.
- [19] 赵小强, 绿文霞. 基于改进乌燕鸥算法同步优化 SVM 的特征选择[J]. 兰州理工大学学报, 2025, 51(3):195-204.

收稿日期:2023-11-27