

基于工业机器人的鞋帮打磨系统设计^①

张立彬^{②*} 周邦达^{*} 沈 遥^{*} 司云峰^{**} 鲍官军^{③*}

(* 浙江工业大学机械工程学院 杭州 310014)

(** 起步(中国)有限公司 丽水 323906)

摘要 针对中国制鞋业面临的制造成本上涨、东南亚制鞋产业崛起等实际情况,本文提出了一种用工业机器人代替人工的鞋帮打磨方案。打磨系统的设计围绕着打磨刀位点信息的提取、打磨控制指令的生成 2 个任务展开。对鞋帮底面上的打磨刀位点进行描述,通过机器人运动学分析,获得机器人各关节的运动控制模型。借助 UG 二次开发功能规划、提取打磨轨迹信息,并较好地解决了姿态信息中切矢量的优化问题。然后在 Qt 上开发出打磨控制程序,将打磨信息转化成机器人运动控制序列。完成打磨工作站实验平台的搭建和系统软件的编写,对样品的鞋帮进行自动化打磨测试,取得了较好的打磨效果。

关键词 制鞋业; 打磨; 工业机器人; 二次开发; 自动化

0 引言

全国制鞋工业信息中心的报告表明,中国仍然是世界鞋类最大的生产国和出口国,2017 年共生产 135.23 亿双,世界产量占比 57.5%,世界出口占比 34.9%^[1,2]。但随着制造成本的上涨、国外市场的反倾销以及东南亚制鞋产业的崛起,我国的制鞋产业遭遇了前所未有的危机^[3]。人工成本上升趋势正在削弱我国制鞋行业贸易竞争力^[4],相较于 2014 年巅峰时期 66% 的世界产量占比,2017 年产量下降幅度达到 18.7%^[5]。定位低端、劳动力密集的生产模式已经不利于中国制鞋行业的持续发展,自动化、智能化将成为中国制鞋业的主要方向^[6]。中国制鞋厂商仍在采用的鞋帮手工打磨作业方式,正面临着用工成本攀升、健康问题凸显、良品率低等挑战,需要尽快实现自动化打磨的替代方案。

针对鞋帮自动化打磨的问题,国外已经有智能设备公司进行了长期的研究并设计了先进的设备。

意大利 CERIM 公司设计生产的 K176 鞋底机,可以同时安装多种类型的刀具,能够适应加工不同形状和材质的鞋品,日加工工件数量达到 1000 双以上。但这类专用设备,往往价格昂贵,不适用于大部分企业。就制鞋业劳动密集这一特点而言,应用工业机器人进行生产线改造是个不错的选择^[7]。国外也有公司研究工业机器人在鞋帮打磨中的应用^[8,9]。20 世纪 90 年代初,瑞士史陶比尔机器人公司就与法国自动化集成商丰雅公司合作设计了鞋品自动化成型线,使用史陶比尔的 6 轴工业机器人完成鞋帮底面的打磨、上胶、削边等工作。德国的鞋机制造商 DESMA 也从 1998 年开始设计并不断改进圆盘式机器人鞋底机^[10]。

浙江省“机器换人”的大背景下^[11],考虑到工业机器人的硬件成本较低且具有较高的灵活性,能较好地完成复杂空间曲面的打磨工作,本文尝试用工业机器人开发一套鞋帮打磨系统。整个鞋帮打磨系统的设计围绕着打磨刀位点信息的提取、打磨控制指令的生成 2 个任务展开,前者借助 UG 二次开

① 浙江省重点研发计划(2015C01026)资助项目。

② 男,1955 年生,博士,教授;研究方向:机器人与智能装备;E-mail: robot@zjut.edu.cn

③ 通信作者,E-mail: gibao@zjut.edu.cn

(收稿日期:2019-08-17)

发工具实现,后者在研究机器人指令基础上用C++编程实现。最后搭建出打磨设备,在Qt上开发系统软件,自动生成打磨控制指令去驱动工业机器人,代替人工进行鞋帮自动化打磨作业。

1 打磨刀位点的描述及其转换

鉴于鞋帮打磨设备较为轻巧、打磨姿势需要不断微调等实际情况,同时也为了简化编程、夹具设计等工作,本文选择用工业机器人末端夹持的打磨设备对固定在工作台上的鞋帮底面进行打磨。传统的人工打磨作业由制鞋工人实时手动调整鞋帮与打磨设备之间的距离与角度。而使用工业机器人进行打磨时,必须预先定义好鞋帮底面的打磨点位,将其描述成机器人末端的位姿,并建立机器人关节的运动模型,将末端位姿转换成机器人关节的控制信号^[12],以备后续离线编程之用。

1.1 确定打磨刀位点的位姿

鞋帮底面打磨刀位点的描述就是对打磨工具位置和姿态的描述。如图1所示,规定机器人基坐标系为{B},点P为机器人末端工具刀尖点的位置,则可以使用矢量^BP表示刀尖点P在基坐标系{B}中的位置:

$${}^B\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 p_x 、 p_y 、 p_z 分别表示点P在基坐标系{B}中坐标轴 X_B 、 Y_B 、 Z_B 上的投影分量。

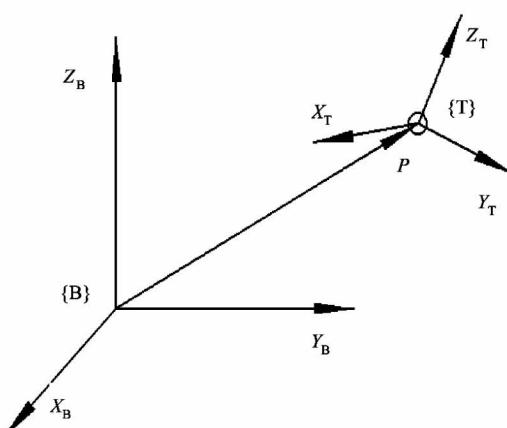


图1 机器人末端刀尖点的位姿描述

将坐标系{T}固连在机器人末端工具的刀尖点P上,则可以使用坐标系{T}的 X_T 、 Y_T 、 Z_T 正方向的单位矢量描述机器人末端工具的姿态。上述3个单位矢量使用基坐标系{B}来表达,分别对应矢量n、o、a,则坐标系{T}的位姿可以使用一个 4×4 的齐次变换矩阵A表示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

n_x 、 n_y 、 n_z 分别表示 X_T 正方向的单位矢量在基坐标系{B}中 X_B 、 Y_B 、 Z_B 方向上的投影分量,矢量o和矢量a同理^[13]。 p_x 、 p_y 、 p_z 分别表示点P位置在基坐标系{B}中 X_B 、 Y_B 、 Z_B 方向上的投影分量。

综上,若要确定机器人末端工具的位置和姿态需要4个矢量。位置矢量就是点P的位置坐标矢量。不妨设机器人在打磨时末端工具的姿态由以下3个矢量决定,法向矢量N、切向矢量T及副法向矢量B。定义机器人末端工具在打磨点 P_i 处垂直于打磨曲面的矢量为法向矢量 N_i ,方向由鞋楦内部指向鞋楦外部。切向矢量T与法向矢量N正交,在打磨点 P_i 处与空间曲面相切。规定T平行于某一特定矢量,与机器人运动方向夹角小于90°。副法向矢量B与法向矢量N、切向矢量T均正交,即满足下式。

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{N}_i \times \mathbf{T}_i \quad (3)$$

1.2 建立机器人关节的运动模型

为了简化工业机器人复杂的几何参数,使用D-H(Denavit-Hartenberg)法建立本文选用的三菱RV-7F工业机器人的运动学模型(此处选择Modified D-H模型),获得Modified D-H参数。

使用Modified D-H法建立的机器人运动学模型中,相邻关节间坐标变换矩阵的通式^[13]如下:

$${}^{i-1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 \\ 0 & a_{i-1} \\ -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, α_{i-1} 是连杆转角, a_{i-1} 是连杆长度, d_i 是连杆偏距, θ_i 是关节轴的旋转角。

根据通式(4)和 Modified D-H 参数,可以分别求得 RV-7F 工业机器人 6 个关节的齐次变换矩阵为 ${}^0\mathbf{T} = {}^1\mathbf{T} {}^1\mathbf{T} {}^2\mathbf{T} {}^2\mathbf{T} {}^3\mathbf{T} {}^3\mathbf{T} {}^4\mathbf{T} {}^4\mathbf{T} {}^5\mathbf{T} {}^5\mathbf{T}$ 。将这 6 个矩阵相乘,可以得到基坐标系 {0} 至机器人末端连杆坐标系 {6} 的齐次变换矩阵:

$${}^0\mathbf{T} = {}^1\mathbf{T} {}^1\mathbf{T} {}^2\mathbf{T} {}^2\mathbf{T} {}^3\mathbf{T} {}^3\mathbf{T} {}^4\mathbf{T} {}^4\mathbf{T} {}^5\mathbf{T} {}^5\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中,前 3 列矢量 n 、 o 、 a ,分别表示末端连杆坐标系 {6} 相对于基坐标系 {0} 的 X_0 轴、 Y_0 轴、 Z_0 轴的单位矢量,3 个矢量组成了一个连杆坐标系 {6} 相对于基坐标系 {0} 的旋转矩阵 R ,用以描述工业机器人运动时末端的姿态。最后 1 列矢量 p 表示末端坐标系 {6} 原点在基坐标系 {0} 中的位置,用以描述工业机器人运动时末端的位置。

借助上述转换矩阵可以根据向机器人伺服电机输入的各关节旋转角 θ_i 计算出机器人末端的姿态 R 和位置 P (即运动学正解)。同样,使用几何、代数等方法也可以求得 RV-7F 工业机器人的运动学逆解。根据机器人作业位姿、关节活动范围等条件确定唯一逆解后,就可以通过机器人末端位姿信息反求机器人各关节的旋转角 θ_i ,从而获得各关节的运动控制模型。

2 打磨轨迹的规划及处理

上文描述了打磨刀位点矢量信息 R 、 P 到机器人关节旋转角 θ_i 的转换方法。接下来采用离线编程的方式进行打磨控制。第一步便是在鞋帮底面生成打磨轨迹,并获取鞋帮底面的打磨信息,进行一定处理后得到机器人打磨控制指令。

2.1 UG 二次开发提取打磨信息

工业界中常使用商用的机器人离线编程软件如 SprutCAM、RobotMaster 等对机器人的运动轨迹进行规划,由软件自身完成轨迹信息提取和运动程序生成的工作。鉴于商用软件价格昂贵、操作复杂、支持

机型有限、利用率低等原因,此处选择使用 UG 及其二次开发工具 UG/Open API 来提取鞋帮底面打磨轨迹信息,整个流程如图 2 所示。

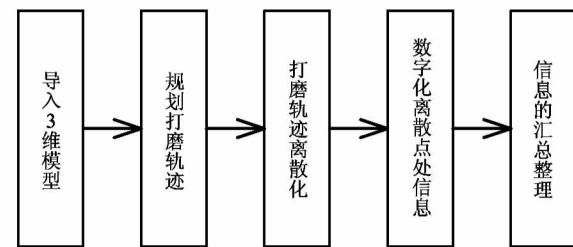


图 2 打磨轨迹的生成与信息提取流程

2.2 获取打磨刀位点的位姿矢量

首先使用 3 维扫描仪对鞋楦进行扫描以获得精确的鞋楦 3 维模型并将其导入 UG 环境中。鞋楦实物与扫描得到的 3 维模型如图 3 所示。然后使用 UG 中的 N 边曲面造面功能对鞋楦模型底面上所有的 NURBS 小面(如图 4 左图所示)按一定的公差进行删除重建,并将所有重建得到的 N 边曲面进行缝合使它们组成一个完整的鞋楦底面(如图 4 右图所示)。



图 3 实验用鞋楦实物与 3 维模型

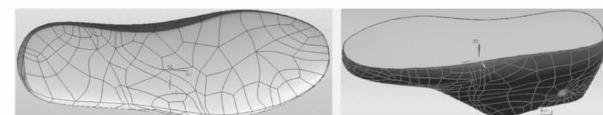


图 4 鞋楦模型底面修改前后对比

接着用 UG 的抽取曲线命令获得图 5 曲线所示的鞋楦底面轮廓线。机器人鞋帮底面打磨轨迹曲线由鞋楦底面轮廓线偏置一定的距离 d_{bias} 得到。偏置的距离 d_{bias} 由鞋帮底面的宽度 d_{bottom} 和打磨工具上磨头的宽度 d_{tool} 决定。设打磨工具的刀尖点位于磨头的中间位置,则设定的偏置距离 d_{bias} 和打磨工具上砂轮的宽度 d_{tool} 需要同时满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq d_{bias} \leq d_{bottom} \\ d_{tool}/2 \geq d_{bottom} - d_{bias} \\ d_{tool} \geq d_{bias} \end{cases} \quad (6)$$

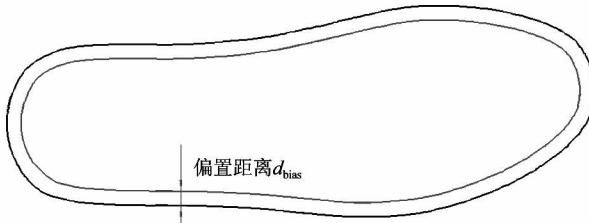


图 5 机器人打磨轨迹曲线的规划

当满足式(6)所列出的条件时,将提取出的鞋楦底面边线偏置合适的距离,得到如图 6 所示的机器人打磨轨迹曲线。

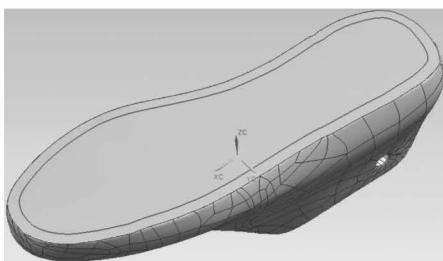


图 6 生成的机器人打磨轨迹曲线

接下来调用 UG/Open API 中的离散化函数 UF_MODL_ask_curve_point 对用选择函数 UF_UI_select_with_single_dialog 选中的打磨轨迹曲线(图 6 所示)进行离散化,获得一定数量离散点的空间位置矢量 P ,流程如图 7 所示。此外还需要确定法向矢量 N 、切向矢量 T 以及副法向矢量 B (即机器人末端的姿态矢量 R)。将图 6 打磨曲面的句柄和上述离散化后获得的离散点坐标 pts 作为输入参数,输入到函数 UF_MODL_ask_face_parm 中,以获得所有打磨刀位点的 U 、 V 参数。最后将这些 U 、 V 参数连同曲面句柄依次输入到函数 UF_MODL_ask_face_props 中,直至提取出所有打磨刀位点的姿态矢量。整个流程如图 8 所示。

2.3 优化刀位点切矢量

用上述库函数 UF_MODL_ask_face_props 直接求取的切矢量 T 方向是固定的(如图 9),不适用于打磨鞋底时打磨方向始终处于变化状态的情

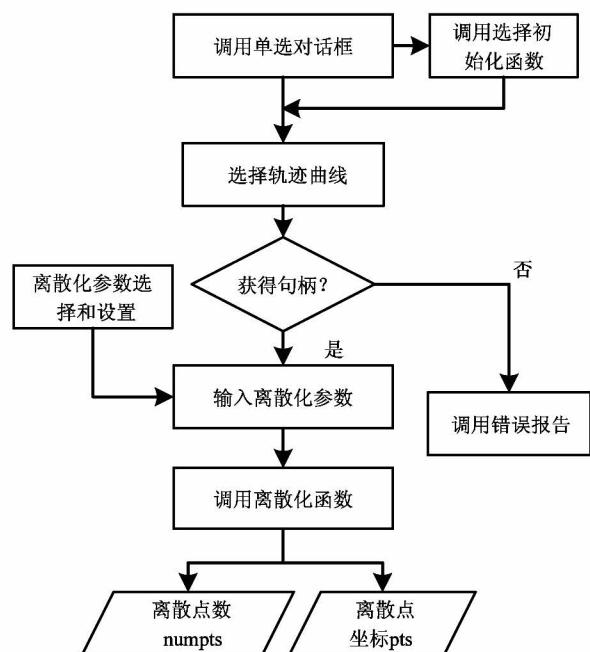


图 7 打磨轨迹曲线离散化程序流程图

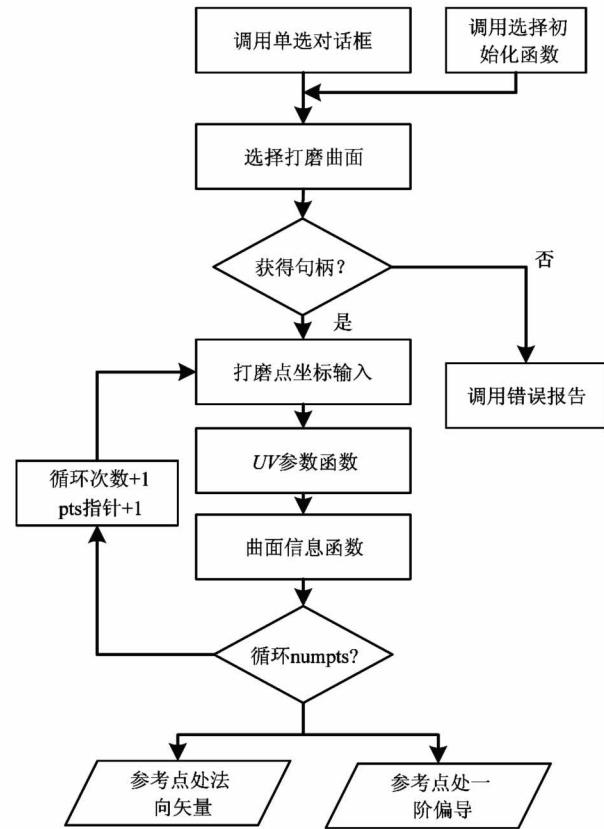


图 8 打磨刀位点矢量信息提取程序流程图

况。为了解决 UG/Open API 函数只能提取固定方向上切矢量产生的问题,需要使鞋帮底面打磨刀位点处的切矢量在 XOY 平面上的投影尽可能满足

图 10 的情况。可以通过曲线拟合的方法获得鞋帮底面在 XOY 平面上投影曲线的函数表达式, 然后根据函数的导数求取对应的切矢量。

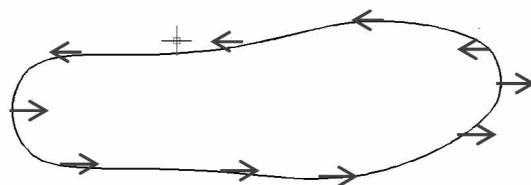


图 9 单方向规划的切矢量

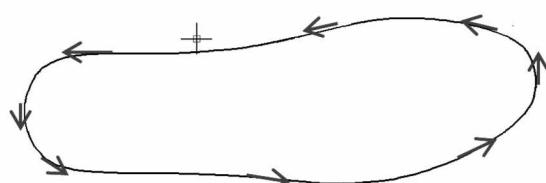


图 10 较理想的切矢量规划

此处使用 Python 工具包 Scikit-Learn 拟合出了离散化后打磨轨迹左右 2 部分的 8 阶多项式曲线, 如图 11、图 12 所示。打磨轨迹右半部分的数学表达式为

$$\begin{aligned} y = & a_8 x^8 + a_7 x^7 + a_6 x^6 + a_5 x^5 + a_4 x^4 \\ & + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(7)容易得到拟合曲线的导数 y' , 从而可知打磨刀位点 P_i 处的规划切矢量:

$$T_i = (1, y'_i, \frac{-(n_{xi} + y'_i \cdot n_{yi})}{n_{zi}}) \quad (8)$$

其中, n_{xi} 、 n_{yi} 、 n_{zi} 为该点法向矢量 N_i 的投影。将 T_i 转换成单位矢量即得到该点的机器人姿态切矢量。

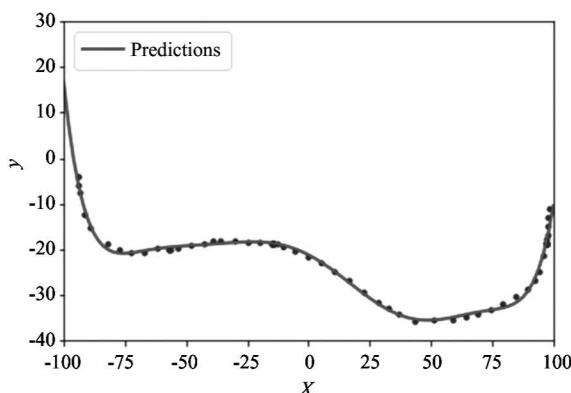


图 11 8 阶拟合曲线(右半部分)

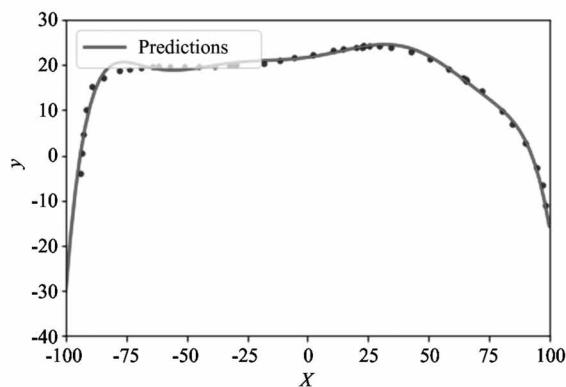


图 12 8 阶拟合曲线(左半部分)

同理,也能求得打磨轨迹左半部分打磨刀位点 P_i 处的规划切矢量:

$$T_i = (-1, y'_i, \frac{n_{xi} - y'_i \cdot n_{yi}}{n_{zi}}) \quad (9)$$

经过这种方法规划后, 机器人夹持的打磨工具的打磨方向不会发生突变, 所以不必设置安全点来防止工具与工件的干涉; 且打磨工具在打磨刀位点处始终与打磨轨迹在 XOY 平面上相切, 因此打磨误差极小。

2.4 生成打磨控制指令

以上获得的打磨轨迹及各打磨刀位点的位姿矢量获取自 UG 环境, 其坐标系与现实工件坐标系并不一致, 需要对获取的打磨轨迹信息进行坐标系变换; 再者仅依靠单纯的数据也无法直接驱动机器人, 需要对轨迹信息字符串进行一定的设置以符合工业机器人控制指令与编程语言的语法要求。

2.4.1 偏置打磨刀位点坐标

如图 13 所示, 假设鞋帮底面原料厚度为 h_{bottom} , 指定的打磨深度为 h_{aim} , 则机器人打磨刀位点应该在提取得到的离散点的基础上向离散点处曲面法矢量方向上偏置为

$$h_{bias} = h_{bottom} - h_{aim} \quad (10)$$

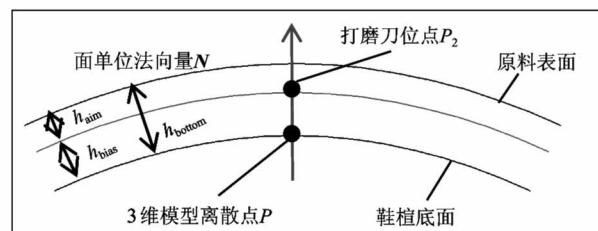


图 13 实际的打磨刀位点与提取的离散点的关系

若提取的离散点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 处的鞋帮底面单位法矢量为 $N_i(n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$, 则实际的打磨刀位点坐标值需要按照下式计算。

$$\begin{cases} x_{ture} = x_i + h_{bias} \cdot n_{xi} \\ y_{ture} = y_i + h_{bias} \cdot n_{yi} \\ z_{ture} = z_i + h_{bias} \cdot n_{zi} \end{cases} \quad (11)$$

2.4.2 转换打磨刀位点坐标系

接着采用 3 点标定法进行坐标转换。先在鞋楦模型上选取不在同一条直线上的 3 个点 A_{UW}, B_{UW}, C_{UW} , 并在鞋楦工件上标记对应的 3 个点 A_0, B_0, C_0 , 得到 6 个点的坐标值。此外, 还能计算出由 A_{UW}, B_{UW}, C_{UW} 3 点确定的空间圆的圆心坐标 O_{UW} , 以及鞋楦工件上对应的圆心坐标 O_0 。

设 UG 环境坐标系 $\{UW\}$ 和机器人基坐标系 $\{0\}$ 的转换矩阵为 ${}^0_{UW}\mathbf{T}$, 则这 4 对点满足如下关系:

$$A_0 = {}^0_{UW}\mathbf{T} \times A_{UW} \quad (12)$$

$$B_0 = {}^0_{UW}\mathbf{T} \times B_{UW} \quad (13)$$

$$C_0 = {}^0_{UW}\mathbf{T} \times C_{UW} \quad (14)$$

$$O_0 = {}^0_{UW}\mathbf{T} \times O_{UW} \quad (15)$$

根据式(12)~式(15)以及 8 个点的坐标值, 可以求出转换矩阵 ${}^0_{UW}\mathbf{T}$, 通过 ${}^0_{UW}\mathbf{T}$ 就能将提取得到的打磨刀位点位姿数据转换至机器人坐标系中。

2.4.3 数据转换成控制指令

选择三菱工业机器人 MELFA-BASIC V 语言的直线插补 Mvs 指令作为机器人的运动控制指令, 并选用直交型变量来输入驱动数据。直交型变量的参数由机器人位置数据 X, Y, Z , 姿态角数据 A, B, C , 附加轴数据 $L1, L2$, 结构标志 $FLG1$ 和多旋转数据 $FLG2$ 组成^[14,15]。位置数据直接使用坐标系转换后的打磨刀位点坐标值, $L1, L2, FLG2$ 均设为 0, 根据打磨姿态 $FLG1$ 设为 7。至于姿态角数据, 需要通过上述获得的打磨刀位点的姿态矢量来计算。不妨设末端旋转矩阵 \mathbf{R} 为:

$${}^0_T\mathbf{R}_{ZYX}(C, B, A) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

旋转矩阵中的 3 列即对应上文提取的矢量信息 $\mathbf{T}, \mathbf{B}, \mathbf{N}$ 。由此可得姿态角数据 A, B, C :

$$A = \text{atan}(-r_{23}/\cos\beta, r_{33}/\cos\beta) \quad (17)$$

$$B = \text{atan}2(r_{13}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{12}^2}) \quad (18)$$

$$C = \text{atan}(-r_{12}/\cos\beta, r_{11}/\cos\beta) \quad (19)$$

3 鞋帮打磨系统的开发

3.1 搭建鞋帮打磨实验平台

设计的工业机器人鞋帮打磨工作站实验平台如图 14 所示, 主要由运动执行部分(工业机器人 RV-7F、运动控制器 CR751-D)、力检测部分(6 维力传感器 4F-FS001-W1000 套件)、打磨末端执行器系统(气动打磨机、打磨头、空气压缩机)、工作台、鞋楦工件以及其他配套设施组成。

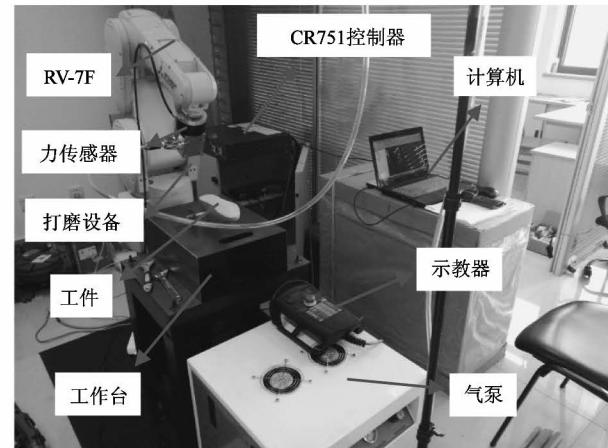


图 14 工业机器人鞋帮打磨工作站

3.2 开发打磨系统软件

为提高编程效率, 工业机器人系统一般用 Qt 来开发^[16]。如表 1 所示, 本文采用 C++ 编程语言, 基于 Qt 图形用户界面应用程序开发框架来编写打磨系统软件^[17], 主要编写 3 个模块即机器人运动程序生成模块、机器人运动参数设置模块和数据库操作模块。系统软件的总体设计框图如图 15 所示。

表 1 鞋帮打磨系统软件开发环境

开发环境选项	选择项目
开发环境	IDE Qt Creator 4.7.1 (Community)
开发语言	C++ 11; Qt 5.8.0
编译器版本	mingw32

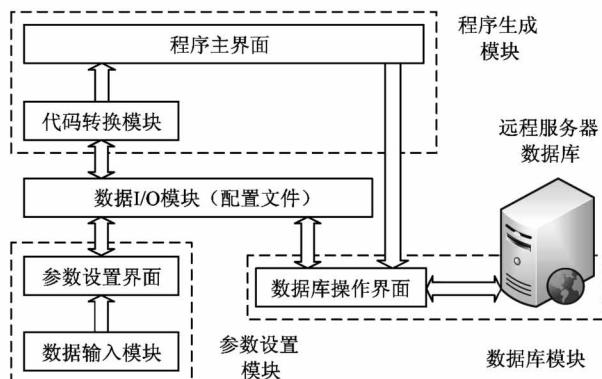


图 15 系统软件的总体设计

机器人运动程序生成模块用于打磨刀位点数据文件的读取，并根据打磨参数自动将打磨刀位点转化为工业机器人运动控制指令；机器人运动参数设置模块用于交互设置坐标标定、刀位点偏置、工具坐标系设定等参数；数据库操作模块用于实现实验数据的存储备份及操作日志功能。

4 鞋帮打磨实验

4.1 鞋帮打磨实验

最后通过实验来验证机器人打磨工作站的可靠性以及系统软件中集成的各程序的正确性。选择图 16 所示的女式板鞋进行打磨实验，具体步骤如表 2 所示。



图 16 实验工件实物图



图 17 工业机器人鞋帮打磨实验

表 2 鞋帮底面打磨实验步骤

步骤	描述
1	在 UG 中导入鞋楦 3 维模型，生成机器人打磨运动轨迹曲线；
2	设置离散化参数，获得打磨轨迹上各离散点的矢量信息；
3	固定待打磨工件，在鞋底选取参考点，用 3 点标定法转换打磨点坐标系；
4	测量待打磨原料的厚度，设置刀位点偏置参数；
5	测量刀尖点在机械接口坐标系上的偏置距离，设置工具坐标系；
6	读取刀位点信息，自动生成机器人打磨控制指令；
7	设置力传感器参数，添加相关指令；
8	模拟运行机器人打磨控制程序，确保打磨工具末端运动轨迹无误；
9	在机器人末端安装打磨工具（图 17），执行打磨程序；
10	记录实验结果，并将实验记录上传至服务器数据库中。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 打磨实验总体效果分析

某次机器人鞋帮打磨实验结束后的工件情况如图 18 所示，其余样品打磨效果相似，且多次打磨实验均能在计划的 30 s 内完成。实验过程中机器人运动稳定流畅，没有碰撞与振荡情况。



图 18 执行打磨程序后鞋帮底面的情况

多次测试后，通过分析力传感器生成的日志数据，获得表 3 所示的打磨作用力实验数据。数据表明打磨过程中打磨工具没有与工件发生碰撞，并且

工具能够较好地贴合于工件曲面进行加工。测量多个打磨成品的打磨深度,获得表 4 所示的打磨深度实验数据。数据表明所有刀位点的打磨深度均在期望打磨深度范围内,机器人打磨工作站基本能够达到期望要求。

表 3 打磨作用力实验数据

实验测量项目	实验数据(N)
最大打磨作用力	10.59
最小打磨作用力	6.67
平均打磨作用力	8.19

表 4 打磨深度实验数据

实验测量项目	实验数据(mm)
期望打磨深度	0.50~0.70
最大打磨深度	0.69
最小打磨深度	0.51
平均打磨深度	0.61

4.2.2 实验问题分析

尽管打磨实验总体效果不错,但实验仍存在 2 个主要问题,即位置反馈与位置指令存在偏差和实际打磨刀位点与理论刀位点存在偏差。

打磨工具打磨效率过低和空间坐标系转换存在偏差都可能造成位置反馈与位置指令的偏差。前者可以通过增加打磨作用力,提高打磨转速,更改打磨刀具材料或调整打磨深度等方法解决。后者同时也造成实际打磨刀位点与理论刀位点的偏差。模型重建时引入的公差、标定时累积的测量误差都会造成坐标转换的偏差,无法避免,只能尽量减小误差的影响。

5 结 论

本文针对鞋帮底面打磨工序,提出了一种使用工业机器人和打磨工艺代替人工进行鞋帮底面打磨的方案。根据该方案搭建实验平台并设计系统软件,最后进行打磨实验。实验结果显示该系统能满足鞋帮打磨中细致、均匀、快速等要求,基本实现了鞋帮打磨工序的自动化,提高了生产效率及产品品质。

量。

在未来的设计中,可以进一步思考如何提高 3 维模型与工件实物的一致性,采取更加可靠的工件标定方法,减小空间坐标系转换带来的打磨偏差。

参考文献

- [1] 于大江. 2017 年世界鞋业概况[J]. 中外鞋业, 2018 (9): 30-32
- [2] 于大江. 2017 年世界鞋业进出口分析[J]. 中外鞋业, 2018 (11): 29-31
- [3] 李艳红. 中国制鞋行业贸易竞争力的实证分析[J]. 商场现代化, 2017 (5): 7-8
- [4] 路华, 王世成. 基于综合显示性比较优势的中国鞋业竞争力分析[J]. 中国皮革, 2018, 47(4): 56-61
- [5] 李明武, 周利. 国际制鞋产业转移:东南亚的崛起与中国的对策[J]. 皮革科学与工程, 2019, 29(4): 73-76
- [6] 于大江. 危机即转机创新求发展——聚焦广东鞋机行业 [J]. 中外鞋业, 2018 (8): 98-103
- [7] 卢振利, 孙凯翔, 葛晨斌, 等. 应用工业机器人的劳动密集型企业典型生产线的设计[J]. 高技术通讯, 2015, 25(8-9): 815-821
- [8] Raoufi A, Surgenor B. Design and evaluation of a pneumatic gantry robot for the grinding of steel blanks[C] // ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Washington, USA, 2003: 97-106
- [9] Inasaki I. Sensor fusion for monitoring and controlling grinding processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15 (10): 730-736
- [10] Spencer J E. Robotics technology and the advent of agile manufacturing systems in the footwear industry [J]. Assembly Automation, 1996, 16(3): 10-15
- [11] 石娜. 工业 4.0 环境下的鞋类企业“机器换人”实施路径及效益分析——以温州地区的鞋企为例[J]. 浙江工贸职业技术学院学报, 2016, 16(3): 28-32
- [12] Kim M, Kim J, Shin D, et al. Robot-based shoe manufacturing system[C] // 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Daegwallyeong, Korea, 2018: 1491-1494
- [13] Craig J. 机器人学导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 14-59

- [14] 三菱电机自动化(中国)有限公司. CR750 CR751 CR760 系列控制器操作说明书(功能和操作的详细说明)[EB/OL]. <http://cn.mitsubishielectric.com/fa/zh>; Mitsubishi Electric Automation (China) Ltd., 2015
- [15] 三菱电机自动化(中国)有限公司. RV-4F-D 7F-D 13F-D 20F-D 系列标准规格书[EB/OL]. <http://cn.mitsubishielectric.com/fa/zh>; Mitsubishi Electric Automation (China) Ltd., 2015
- [16] 徐建明, 甘万正, 张文安, 等. 基于 QT 的工业机器人人机交互系统的设计[J]. 高技术通讯, 2019, 29(6): 576-584
- [17] 徐祥, 甘亚辉, 戴先中, 等. 基于 Qt 的可扩展机器人离线编程系统[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015(s1): 513-516

Design of upper grinding system based on industrial robot

Zhang Libin*, Zhou Bangda*, Shen Yao*, Si Yunfeng**, Bao Guanjun*

(* College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

(** Qibu (China) Co., Ltd, Lishui 323906)

Abstract

Based on the actual situation of China's footwear industry, the rising manufacturing costs, the rise of Southeast Asian counterparts and the same, this work puts forward and designs a scheme of uppers' grinding that replaces human hands with industrial robots. The design of grinding system is centered on two tasks: extracting the information of grinding points and generating the machine instructions of grinding process. Firstly, the positions of the grinding points on the bottom of the upper is described, and the motion control model of each joint of the industrial robot is obtained through robot kinematics analysis. Then the UG secondary development is used to plan and extract the grinding track information, and the tangent vector in the attitude information is well optimized, too. Next, a grinding control program is developed to convert the grinding information into a robot motion control sequence. Finally, the experimental platform for industrial robot grinding upper is built and the system software based on Qt framework is finished. And the automation of upper grinding is realized in the experiment which obtains a good grinding result.

Key words: footwear industry, grinding, industrial robot, secondary development, automation