

基于三维点云的机器人加工轨迹规划

张铁, 张美辉*, 邹焱飏

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

摘要 为了使机器人准确高效地完成复杂轮廓工件的切削加工, 结合点云技术与机器人技术, 提出了一种基于三维点云直接生成机器人的切削加工轨迹的算法。搭建了一种以激光位移传感器和机器人作为核心部件的点云测量系统, 通过坐标关系变换实现了一维测量到三维测量的扩展。通过在线测量获取了被加工工件轮廓的三维点云, 采用点云预处理算法和机器人轨迹的生成算法, 直接生成了针对被测工件的机器人加工轨迹。仿真结果表明, 该测量系统及算法能够准确地提取工件轮廓的三维点云并快速生成机器人的加工轨迹。

关键词 激光技术; 工业机器人; 轨迹规划; 点云测量; 激光点云; 法矢估计

中图分类号 TP242.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0502009

Path Planning of Robot Processing Based on Three-Dimensional Point Cloud

Zhang Tie, Zhang Meihui, Zou Yanbiao

*School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510640, China*

Abstract In order to make the industrial robots complete the cutting and machining processes of complicated workpieces accurately and efficiently, one algorithm for the robot cutting and machining processing paths directly generated by the three dimensional (3D) point cloud is proposed, which is combined with the point cloud technology and the robot technology. The point cloud measurement system with laser displacement sensors and industrial robots as its core units is constructed, and the extension from one-dimensional measurement to the 3D measurement is realized by the coordinate transformation. The 3D point cloud of the machined workpiece profiles is obtained by the on-line measurement, and the point cloud preprocessing algorithm and the robot path planning algorithm are adopted to generate directly the robot paths for the machined workpieces. The simulation results show that this measurement system and the algorithms can accurately extract the 3D point cloud of the workpiece profiles and quickly generate the robot processing paths.

Key words laser technique; industrial robot; path planning; point cloud measurement; laser point cloud; normal vector estimation

OCIS codes 140.5960; 120.6650; 150.5758; 150.6910

1 引 言

随着机器人制造技术的发展, 机器人逐渐应用于工件的切削加工中, 相比数控机床, 机器人具有自由度高、灵活性好、工作空间大等特点。利用机器人进行工件加工时, 无论是手持工件还是手持刀具的

加工方式, 机器人的运动轨迹都会直接影响切削参数的选择, 从而影响被加工工件的质量。因此, 生成和优化加工过程中机器人的运动轨迹具有重要的工程应用意义, 许多学者对此进行了深入的研究。

肖文磊等^[1]利用计算机辅助制造(CAM)软件生成 G 代码(刀轨数据), 通过后置处理模块将 G 代

收稿日期: 2017-09-29; **收到修改稿日期:** 2017-11-12

基金项目: 国家 04 科技重大专项(2015ZX04005006)、广东省科技重大专项(2014B090921004)、广州市科技重大项目(201604040009)、中山市科技重大项目(2016F2FC0006)

作者简介: 张铁(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事工业机器人关键技术及其应用方面的研究。

E-mail: merobot@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: mhzhang_21@163.com

码转换为机器人可执行的代码,从而生成机器人的铣削加工轨迹。刘楚辉等^[2]基于CAM系统,完成了机器人切削加工时的刀具路径规划和刀位源文件的生成,实现了刀位源文件到机器人控制程序的自动转换。Park等^[3]基于厚度映射法,重建了物体表面并生成了机器人磨削加工轨迹。Wang等^[4]基于参数化曲面,进行了机器人加工路径的规划。Bian等^[5]开发了一套基于计算机辅助设计(CAD)模型的离线编程系统,进行了机器人打磨路径的规划。Sun等^[6]采用基于CAD模型的零参考路径生成算法,提出了一种新的系统标定方法,并通过力控制来改善切削性能。在上述研究中,机器人轨迹的生成依赖于CAD/CAM系统和工件CAD模型,工件信息需在多个系统中进行多次转换才能生成机器人可执行的代码。理论CAD模型生成的加工轨迹不能补偿理论模型与实际工件之间的误差,此类机器人轨迹的生成方法不具有快速性和柔性。

另外,Zhang等^[7]使用三维激光扫描仪扫描叶片形成密集点云,并通过点云预处理算法和切片算法,生成了机器人的磨抛轨迹。刘立峰等^[8]利用三维激光扫描仪,对复杂物体进行三维重构,提取特征表面或表面缺陷,通过离线编程系统进行了机器人加工或缺陷修复。陈影等^[9]采用三维扫描仪获取了熔覆曲面的点云数据,应用切片法和非均匀有理数

B样条(NURBS)线曲面拟合方法,通过偏置一定距离得到了枪头的运动轨迹点,从而规划了激光熔覆曲面时的机器人轨迹。王鑫龙等^[10]利用由三维扫描仪得到的点云数据进行曲面重构,得到了三维模型,并根据模型提出了一种基于切平面的路径生成方法。Masood等^[11]提出了一种由点云数据直接生成数控加工路径的算法,通过点云扫描实现了自由曲面的数字化,采用刀触点(CL)路径截面线法并通过刀具偏置生成了加工路径。通过三维激光扫描仪测量生成点云的方法^[12-13],其设备成本高,不适宜工程应用,且其点云数据的处理算法复杂。

本文提出了一种低成本的三维点云获取方法,利用获取的点云数据,在不需要重构工件的三维模型情况下直接生成了机器人的加工轨迹。搭建了一种以激光位移传感器和工业机器人为核心部件的激光点云测量系统,提出了点云预处理算法和机器人的轨迹生成算法,有望实现机器人在切削加工中的广泛应用。

2 激光点云测量系统及其测量原理

激光点云测量系统的硬件部分主要由六轴工业机器人及其控制器、激光位移传感器、工业控制计算机(以下简称工控机)和数据采集模块等构成,软件部分由机器人控制程序、实时内核和数据处理程序构成,如图1所示。

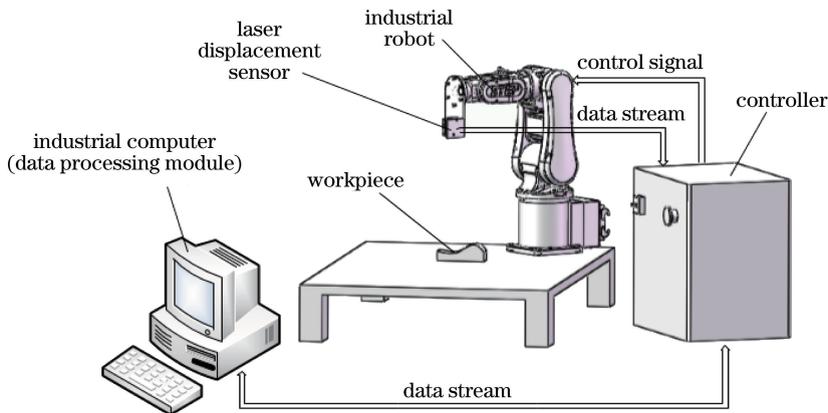


图1 测量系统的结构图

Fig. 1 Structural diagram of measurement system

激光位移传感器安装于机器人末端并基于三角测量法进行测量,以获取目标物体的距离信息。在测量过程中,激光位移传感器跟随机器人按预定轨迹运动,从而完成目标物体的测量。由于机器人和激光位移传感器有着各自不同的数据采集时钟周期,简单的数据组合会造成测量数据的错位。因此,

该系统将激光位移传感器的模拟量信号通过以太网线接入机器人控制器的关节电机驱动器上,与各关节电机串联形成数据回路;运行在工控机上的机器人控制程序和实时内核,基于以太网控制自动化技术(EtherCAT)总线协议,读取过程数据对象(PDO)以传输电机和传感器的实时数据,从而实现

激光器的测量距离和当前机器人位姿的实时匹配。

上述方法在同一时刻实现了对传感器测量距离和机器人位姿信息的采集,如图 2 所示。建立机器人基坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$ 、机器人末端坐标系 $O_E X_E Y_E Z_E$ 、传感器测量坐标系 $O_M X_M Y_M Z_M$,构建各坐标系之间的转换关系,使传感器测量距离与机

器人位姿组合形成新的数据。采集的原始 PDO 包含激光位移传感器的模拟量电压和机器人六个关节电机的脉冲数据,根据电机的设定参数和传感器的模拟量电压与测量距离间的转换关系,分别将其还原为激光器的测量距离 d 和机器人的六个关节转角 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$ 。

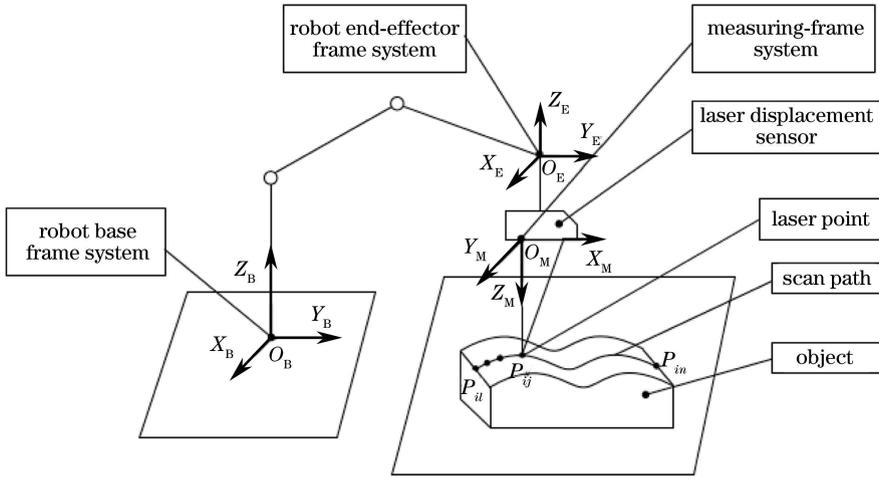


图 2 测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement

机器人末端坐标系 $O_E X_E Y_E Z_E$ 相对于机器人基坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$ 的转换矩阵为 ${}^B_E \mathbf{T}$, 关节转角 Θ 与 ${}^B_E \mathbf{T}$ 的映射关系为

$${}^B_E \mathbf{T} = \mathbf{\Gamma}(\Theta), \quad (1)$$

式中 $\mathbf{\Gamma}$ 表示机器人的正运动学模型,通过建立机器人的 Denavit-Hartenberg(D-H)参数得到。

通过对机器人手眼系统和坐标系的标定(手眼标定),得到传感器测量坐标系 $O_M X_M Y_M Z_M$ 相对于机器人末端坐标系 $O_E X_E Y_E Z_E$ 的转换矩阵 ${}^E_M \mathbf{T}$ 。

通过构造图 2 所示的各坐标系之间的变换关系,可得测量坐标系下的点 ${}^M \mathbf{p} = (0 \ 0 \ d)^T$ 与机器人基坐标系下的点 ${}^B \mathbf{p} = (x_B \ y_B \ z_B)^T$ 的映射关系为

$$\begin{bmatrix} x_B & y_B & z_B & 1 \end{bmatrix}^T = {}^B_E \mathbf{T} \cdot {}^E_M \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & d & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

式中 x_B, y_B, z_B 为测量点在机器人基坐标系下的三维坐标, T 代表转置。通过(2)式,可以将激光位移传感器测量的距离信息映射到机器人基坐标系下,得到测量点的三维坐标。

3 数据处理算法

3.1 点云数据的 NURBS 曲线拟合

滤波处理获取的原始点云数据,去除信号中的

高频成分和干扰信号,经过点云精简处理,滤除部分点云数据的冗余,使点云数据均匀化^[14-16]。

该点云测量系统由机器人和激光位移传感器组成,考虑到机器人的定位精度和运动过程中测量仪器或测量平台的细微抖动现象,测量数据中会存在 X-Y-Z 方向上的微小波动。

基于 NURBS 刀具路径在自由曲面的加工中具有高精度、高效率和良好的加工平顺性等优点,为了减轻因测量系统造成的测量偏差,消除点云数据的波动,对扫描线点云进行分段 NURBS 曲线拟合,以形成一条光滑、平顺的刀具路径。NURBS 曲线拟合公式^[17]为

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,3}(u)W_i D_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,3}(u)W_i} \quad (i=0,1,\dots,n), \quad (3)$$

式中 $B_{i,3}$ 为三次 B 样条基函数, W_i 为权因子, D_i 为控制顶点, u 表示曲线的节点。 $B_{i,3}$ 的计算公式为

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_k \leq u \leq u_{k+1} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ B_{i,3}(u) = \frac{u - u_k}{u_{k+3} - u_k} B_{i,2}(u) + \frac{u_{k+4} - u}{u_{k+4} - u_{k+1}} B_{i+1,2}(u) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $u_k (k=0,1,2,\dots,n+4)$ 为节点。

对离散点进行 NURBS 曲线拟合,需确定控制顶点、节点矢量和权因子三类参数。其中控制顶点对曲线的影响尤为突出,控制顶点的位置和数量的变化可以快速而明显地影响曲线的形状。

为简化运算,设定权因子 $W_i=1$ 。由于 B 样条基函数满足 $\sum_{i=0}^n B_{i,3}(u)=1$,将(3)式转化为

$$P(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,3}(u) \cdot D_i, \quad (5)$$

对每个离散点 p_j ,拟合曲线上均有点 $P(u_j)$ 与其对应:

$$p_j \approx P(u_j) = \sum_{i=0}^n B_{i,3}(u_j) \cdot D_i, \quad (6)$$

式中 u_j 为对应参数值,可利用向心法求出。每个离散点与曲线的偏差为 $|P(u_j)-p_j|$,通过最小二乘拟合法优化得到控制顶点,使拟合曲线到各离散点的偏差总和最小,偏差总和与控制顶点的函数关系为

$$F(D_0, D_1, \dots, D_n) = \sum_{j=0}^m |P(u_j) - p_j|^2 = \sum_{j=0}^m \left| \sum_{i=0}^n B_{i,3}(u_j) \cdot D_j - p_j \right|^2, \quad (7)$$

式中 m 为 NURBS 曲线拟合前的离散点数。

由(5)~(7)式可求出各控制顶点值,从而确定

NURBS 曲线方程。

拟合完成后,根据实际加工中的效率与精度要求确定相邻点的间距,并将 NURBS 曲线离散成线点云,消除原有数据的微小波动以得到平顺的线点云。

3.2 点云法向估计

表面法线是几何表面的重要属性之一,目前已有的点云法向量法的估计方法可以分为三种类型:基于主成分分析 (PCA) 的方法、基于 Delaunay/Voronoi 算法的方法和基于稳健性统计的方法^[18]。

根据不同的方法获取的点云数据主要分为散乱点云、扫描线点云、网格化点云、多边形点云等类型,此处采用激光位移传感器获得的点云数据属于扫描线点云。不同于三维激光扫描仪获得的密集散乱点云,对于扫描线点云,垂直于扫描轨迹方向的点云间距远大于同一条扫描线上的点云间距。因此,如果仍采用 k 近邻搜索算法 (k 为近邻的搜索数量),邻域内的点均位于同一条扫描线上,再采用基于 PCA 的方法估计点云的法向量,计算得到的法向量将不能正确地反映该点的表面特征。

基于扫描线点云的特征,采用近似的三角剖分法构建点云之间的拓扑关系,点云中各点的拓扑关系及三角划分的示意图如图 3 所示,并基于划分的三角网格,计算三角面片的法向量,将三角面片的法向量近似作为点云中对应点的法向量。

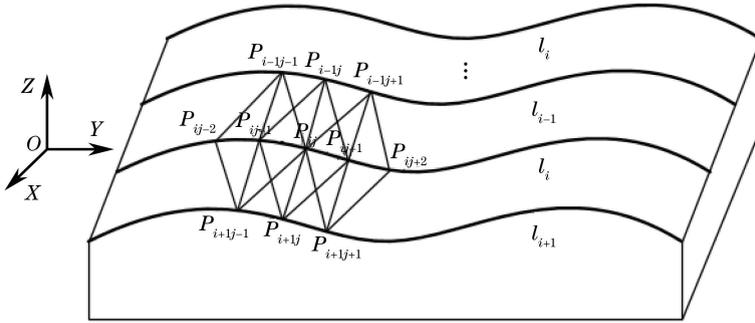


图 3 拓扑关系及三角划分的示意图

Fig. 3 Schematic of topological relation and triangulation

设点云集合 $P = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$,各段线点云为子集 $l_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}$ 。取当前计算点为 p_{ij} ,搜索点云集合 P ,得到与 p_{ij} 位于同一条扫描线上的 p_{ij-1} 和 p_{ij+1} ,以及相邻两条扫描线上距离 p_{ij} 最近的 p_{i-1j} 和 p_{i+1j} ,则得到分别以 $\{p_{ij}, p_{ij+1}, p_{i-1j}\}$ 、 $\{p_{ij}, p_{i-1j}, p_{i-1j+1}\}$ 、 $\{p_{ij}, p_{i-1j+1}, p_{i+1j}\}$ 、 $\{p_{ij}, p_{i+1j}, p_{i+1j+1}\}$ 为顶点的四个三角形,调整顶点的顺序,使其满足右手定则。

依次将各个三角形的各个顶点坐标值赋值给

$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$,其中 $\mathbf{a} = (x_a, y_a, z_a)^T, \mathbf{b} = (x_b, y_b, z_b)^T, \mathbf{c} = (x_c, y_c, z_c)^T$,而三角面片的法向量的计算公式为

$$\begin{cases} n_x = (y_b - y_a) \cdot (z_c - z_b) - (z_b - z_a) \cdot (y_c - y_b) \\ n_y = (z_b - z_a) \cdot (x_c - x_b) - (x_b - x_a) \cdot (z_c - z_b) \\ n_z = (x_b - x_a) \cdot (y_c - y_b) - (y_b - y_a) \cdot (x_c - x_b) \end{cases} \quad (8)$$

$$s = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} n_x = n_x/s \\ n_y = n_y/s \\ n_z = n_z/s \end{cases} \quad (10)$$

利用(8)~(10)式计算得四个三角形的法向量依次为 $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$, 取四个三角形的法向量的加权平均值近似作为共顶点 p_{ij} 的法向量 $\mathbf{n}_{ij} = (n_x, n_y, n_z)^T$, 权系数由各个三角形的面积确定。

按上述算法遍历点云中所有的点, 即 $i = 1, 2, \dots, n$ 且 $j = 1, 2, \dots, n$, 则为所有点计算出法向量。但当 p_{ij} 为点云边界上的点时, 上述算法退化为以共顶点的两个相邻三角形的法向量的加权平均值作为顶点的法向量。

3.3 机器人切削加工轨迹的生成

点云预处理后, 获得基于机器人基坐标系的工件轮廓三维点云, 点云中包含工件在基坐标系中的位置信息和法向信息。机器人轨迹的生成算法包含确定刀触点(刀具在加工过程中与被加工工件曲面的理论接触点)与刀位点数据(准确确定刀具在加工过程中每一位置所需的数据)及确定机器人的姿态两部分。

确定刀触点及刀位点数据的过程如下。取点云集合 P 中一点作为当前的刀触点, 其位置矢量为 \mathbf{p} , 法向量为 \mathbf{v}_n , 以当前点与下一点的连线方向的单位向量作为切向量 \mathbf{v}_t , 另设一向量 \mathbf{v}_e , 有 $\mathbf{v}_e = \mathbf{v}_t \times \mathbf{v}_n$ 。建立一个以刀触点为坐标原点, $\mathbf{v}_n, \mathbf{v}_e, \mathbf{v}_t$ 为坐标轴的局部坐标系。构建该局部坐标系相对于机器人基坐标系的转换矩阵^B \mathbf{p}_t , 即

$${}^B\mathbf{p}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_t & \mathbf{v}_e & \mathbf{v}_n & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中^B \mathbf{p}_t 为该刀触点对应的刀位点数据。

确定机器人姿态的过程如下。根据变换方程, 将刀位点数据转换成机器人位姿。各个坐标系转换关系为

$${}^E\mathbf{T}_p {}^E\mathbf{T}_p^T = {}^B\mathbf{p}_t, \quad (12)$$

式中^B \mathbf{T}_p 为加工刀触点 \mathbf{p} 时机器人位姿矩阵, ^T \mathbf{T} 为刀触点局部坐标系相对于工具坐标系的转换矩阵, ^E \mathbf{T} 为工具坐标系相对于末端坐标系的转换矩阵。在加工过程中, 工具坐标系和加工节点的局部坐标系重合, 即^T $\mathbf{T} = \mathbf{I}$, 其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, ^E \mathbf{T} 由工具坐标系标定已知, 因此机器人的位姿矩阵可表示为

$${}^B\mathbf{T}_p = {}^B\mathbf{p}_t {}^E\mathbf{T}^{-1}, \quad (13)$$

$$\Theta = \Gamma^{-1}({}^B\mathbf{T}_p), \quad (14)$$

式中 Γ^{-1} 为机器人的逆运动学模型。

遍历所有的点, 通过(13)式可计算出各刀触点对应的机器人位姿矩阵, 再通过(14)式求解, 将加工各点时的位姿矩阵转换为机器人各关节转角, 串联各刀触点即可生成完整的机器人切削加工轨迹。

4 实验及分析

为了验证点云在线测量系统与轨迹生成算法的可行性, 搭建了以国产六轴工业机器人和日本基恩士公司的 IL-065 型激光位移传感器为核心的实验平台, 设计了 S 形表面的工件, 机器人的重复定位精度为 ± 0.02 mm, IL-065 传感器的测量范围为 55~105 mm, 采样周期最高为 1 ms, 线性度为 ± 10 μm , 工控机采用嵌入式工控机, 如图 4 所示。

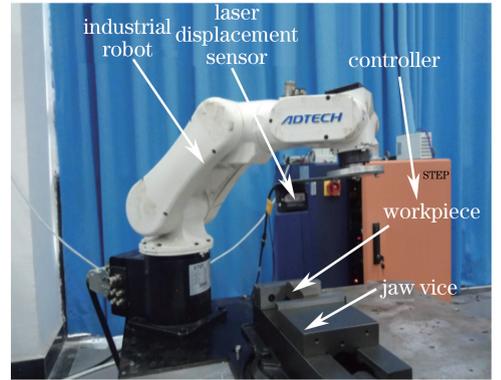


图 4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform

激光位移传感器安装在机器人末端, 随着机器人的运动完成对物体的测量。传感器的模拟量信号由德国倍福 (Beckhoff) 公司生产的 EK1100 和 EL3104 模块采集并通过以太网线接入机器人控制器的关节电机驱动器上, 由运行在工控机上的机器人控制程序和 Intime 软件实时内核, 通过 EtherCAT 总线协议实现对工业机器人的控制和数据采集, 采样周期达到 1 ms, 系统控制原理如图 5 所示。采样周期短, 满足实时性要求, 通过 PDO 同时获得了传感器的模拟量信号和关节电机的脉冲信号, 保证了激光位移传感器的距离测量与当前机器人位姿的匹配。经过测量系统的数据转换, 生成被测量工件的三维点云。

数据处理程序采用 C++ 编程实现, 调用点云库 (PCL) 的相关函数, 利用图像处理软件 VTK 可视化点云处理过程, 最后用 Matlab 软件进行图表分析。由三维点云生成机器人加工轨迹的算法包括在线测量、点云预处理、轨迹生成和运动仿真四部分, 算法流程如图 6 所示。

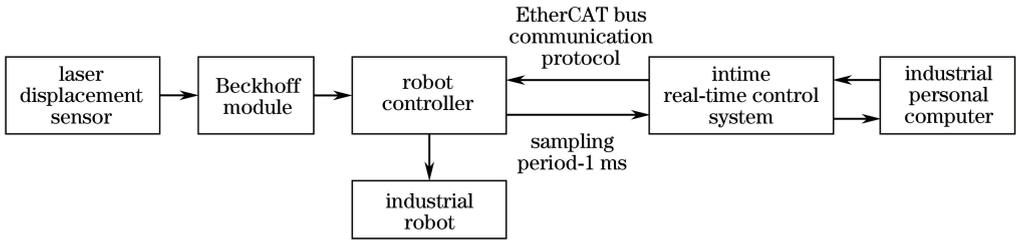


图 5 测量系统的控制原理

Fig. 5 Schematic of control principle of measurement system

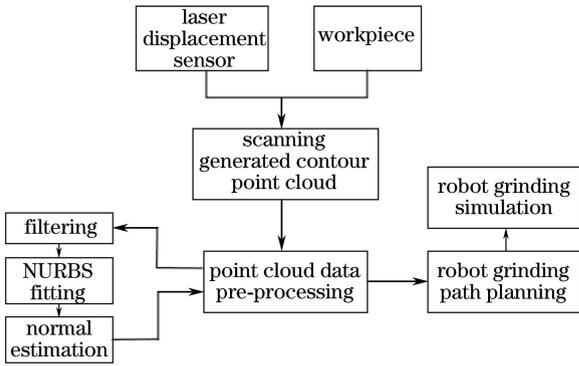


图 6 算法流程

Fig. 6 Flow chart of algorithm

实验过程中由机器人手持激光位移传感器,根据等残留高度法确定点云之间的行距为 4 mm,控制机器人运动以完成对工件的扫描,根据(2)式,将测量距离信息映射为机器人基坐标系下测量点的三维坐标,因此得到被测工件相对于机器人基坐标系下的三维点云,测量分辨率能达到 0.01 mm,原始工件轮廓的三维点云如图 7 所示。

在点云测量过程中,由于设备精度、测量噪声和环境因素等的影响,图 7 中可见干扰数据及数据波动。为去除这些干扰因素的影响,对原始数据进行滤波处理及工件边界的提取,之后点云数据变得平滑且完整地反映了工件的轮廓及边界,如图 8 所示。

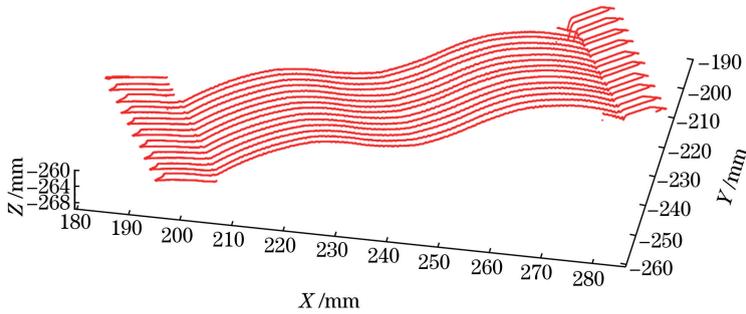


图 7 原始点云

Fig. 7 Original point cloud

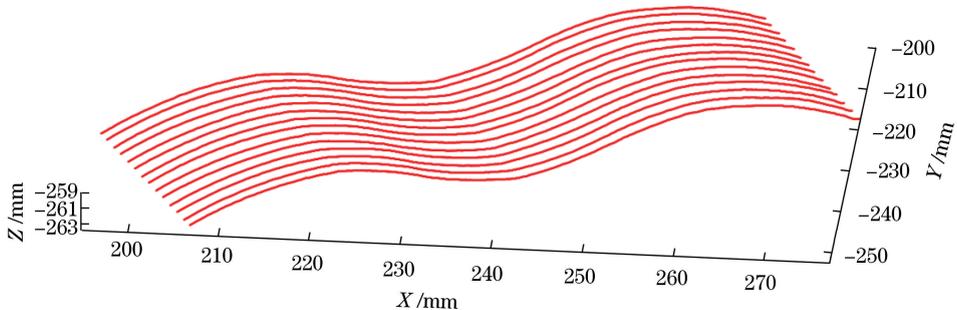


图 8 滤波后的点云

Fig. 8 Point cloud after filtering

为了直观体现 NURBS 曲线拟合的效果,截取完整轮廓中的一部分数据进行显示,在 X 方向微小

的变化范围内,发现拟合前点云数据在 X-Y-Z 方向上存在波动,数据波动所引起的偏差会对后续的刀

具加工轨迹带来误差,从而影响加工表面的质量。使用(3)~(7)式进行拟合,消除了原有的数据波动,得到了平顺的线点云数据,在所选择的坐标范围内

数据显示为直线段,从而直观地证实了 NURBS 曲线拟合的有效性,如图 9 所示。

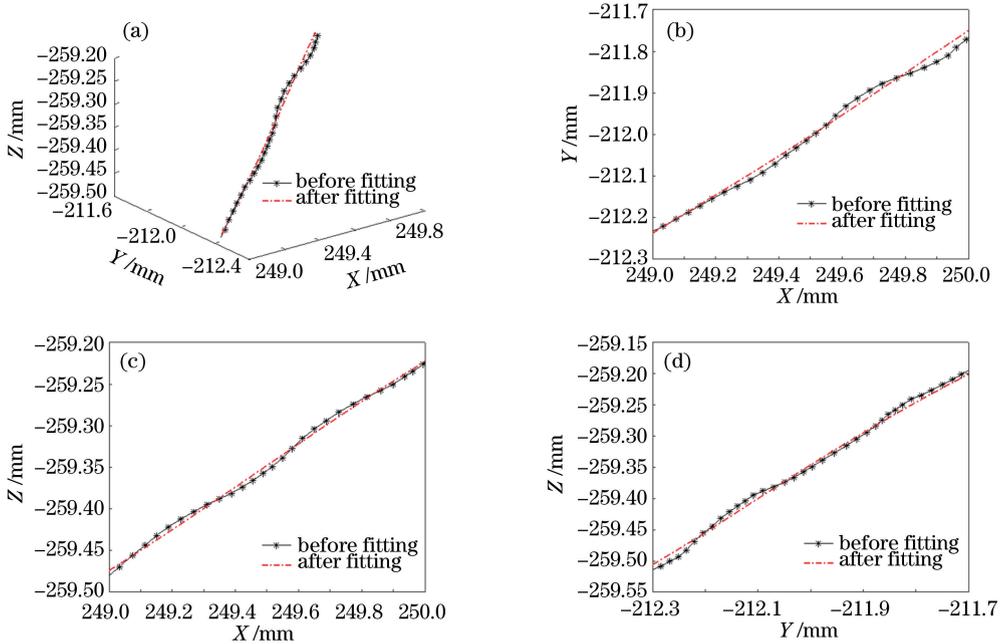


图 9 拟合效果。(a)三维图;(b) XY 视角;(c) XZ 视角;(d) YZ 视角

Fig. 9 Fitting effect (a) 3D view; (b) XY view; (c) XZ view; (d) YZ view

点云经过滤波及 NURBS 拟合处理后,较好地反映了工件轮廓的表面信息。根据(8)~(10)式构建点云中各点的拓扑关系并计算各点的法向量,使点云的法向量反映轮廓的曲率变化。经法向估计后

的点云如图 10 所示,其中箭头表示曲面上该点的法向,体现了曲面的曲率变化,从而验证了法向估计算法的有效性,为后续机器人加工姿态的确定提供了依据。

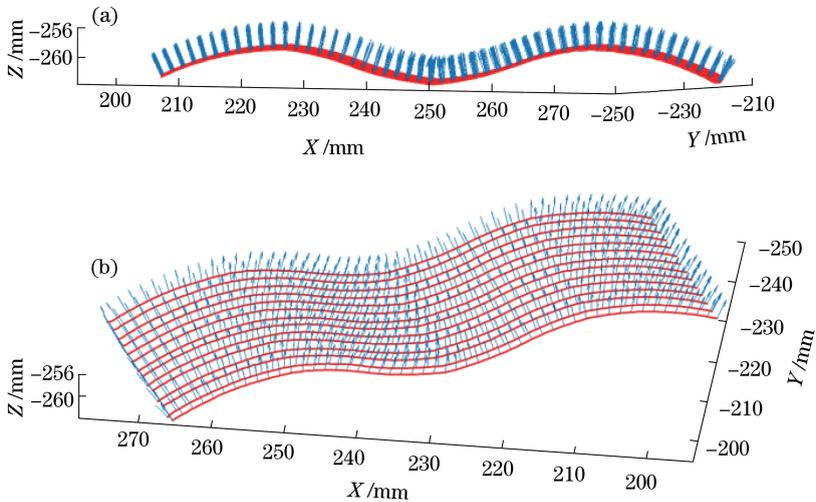


图 10 点云法向量。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 10 Normal vector of point cloud. (a) Side view; (b) top view

为了进一步证明法向估计算法的有效性,将三维点云法向估计的主流算法即基于 PCA 的算法作为实验对比算法。针对图 10 所示的数据,采用

PCA 算法计算得到点云法向量,如图 11 所示。可以看出,图 10 中的法向近似反映了工件表面的曲率变化;而在图 11 中,根据线点云的特征,基于 k 邻域

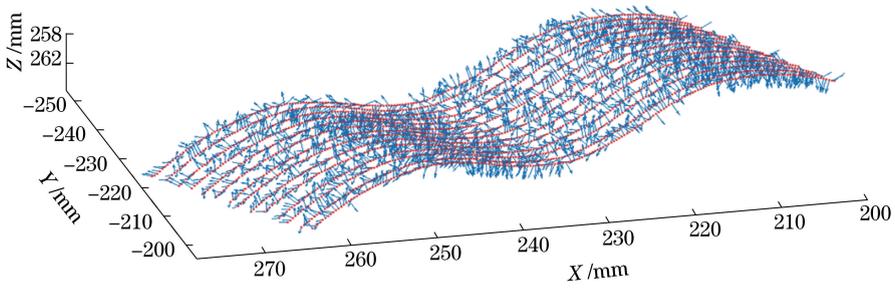


图 11 由 PCA 算法得到的点云法向量图

Fig. 11 Normal vector map obtained from PCA algorithm

的 PCA 算法,其邻域点大都位于一条扫描线上,并没有反映曲面的特征,算法已经失效。

点云完成拟合和法向估计后,点云中包含工件轮廓的位置和法向信息。通过(11)~(14)式,由点云信息直接生成对应刀触点的机器人的加工位姿,逆运动学求解后得到一系列机器人的关节转角,进而转化为关节电机的脉冲数,由机器人控制器读取脉冲参数,并以基于位置的控制方式连续发送对应脉冲值,使机器人依次到达期望的刀触点位置,串联各刀触点形成加工轨迹以完成整个工件的加工。

为了验证实验数据的准确性,利用 Matlab 软件中的 Robotics Toolbox 软件进行运动仿真。由图 10 可知,各条机器人的加工轨迹具有相似性(曲线形状和曲率变化相似),考虑到仿真效率,故只仿真了一条加工轨迹,如图 12 所示。图 12(a)所示为 Matlab 软件中建立的机器人模型,将上述得到的加工轨迹对应的机器人关节转角输入机器人模型,驱动其运动,可见运动过程平滑并得到了末端刀具在空间中的轨迹。图 12(b)所示为实际仿真轨迹与理论轨迹的对比图,可见实际轨迹与理论轨迹重合,有效验证了轨迹生成算法的有效性。

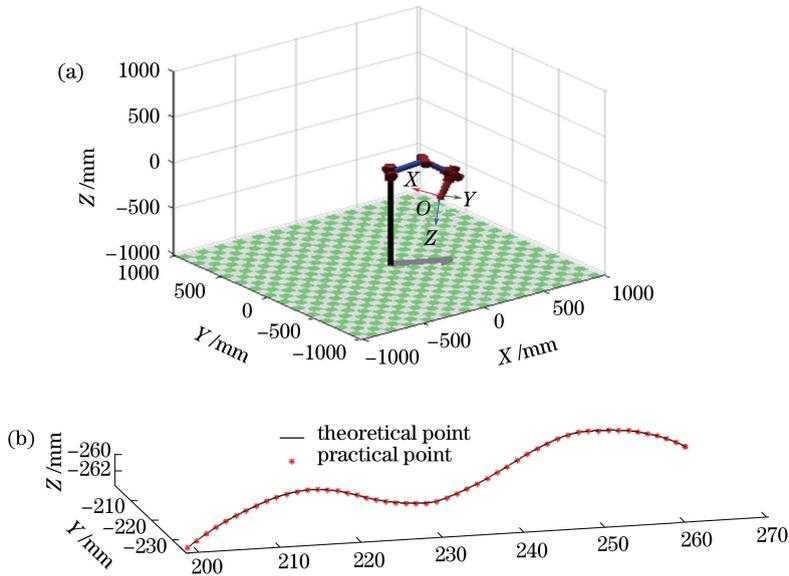


图 12 (a)加工轨迹的仿真界面;(b)实际轨迹与理论轨迹对比

Fig. 12 (a) Simulation interface of processing path; (b) comparison between practical and theoretical paths

5 结 论

搭建了一种以激光位移传感器和工业机器人为核心的三维点云测量系统,解决了两者之间数据实时匹配的问题,并提出了点云数据处理算法和机器

人轨迹生成算法。利用低成本的激光位移传感器,准确地获取了工件轮廓的三维点云,在不需要重构工件的三维模型情况下直接生成了被测工件的机器人加工轨迹,降低了系统的成本,避免了对工件 CAD 模型进行多次转换。实验及仿真结果验证了

该系统及算法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Xiao W L, Huan J. Integration of a cutting robot with CAD/CAM system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(15): 52-60.
肖文磊, 郇极. 切削加工机器人与 CAD/CAM 系统集成化[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(15): 52-60.
- [2] Liu C H, Yao B G, Ke Y L. Study on off-line programming of industrial robot for cutting process[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(3): 426-439.
刘楚辉, 姚宝国, 柯映林. 工业机器人切削加工离线编程研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(3): 426-439.
- [3] Park J W, Cho H U, *et al.* Modeling and grinding large sculptured surface by robotic digitization[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(7): 2087-2091.
- [4] Wang W, Yun C. A path planning method for robotic belt surface grinding[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(4): 520-526.
- [5] Bian Y S, Zhang Y, Gao Z H. A path planning method of robotic belt grinding system for grinding workpieces with complex shape surfaces[C]. *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 2013: 53-58.
- [6] Sun Y Q, Giblin D J, Kazerounian K. Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25(1): 204-210.
- [7] Zhang G F, Wang J W, Cao F, *et al.* 3D curvature grinding path planning based on point cloud data[C]. *IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, 2016: 1-6.
- [8] Liu L F, Yang X C. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0703008.
刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0703008.
- [9] Chen Y, Sun W L, Huang Y, *et al.* Robot path planning of laser cladding and remanufacturing of curved surface parts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0502001.
陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光熔覆曲面零件再制造的机器人路径规划[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0502001.
- [10] Wang X L, Sun W L, Zhang J J, *et al.* Path planning of laser cladding and remanufacturing based on reverse engineering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051401.
王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 基于逆向工程的激光熔覆再制造路径规划[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051401.
- [11] Masood A, Siddiqui R, Pinto M, *et al.* Tool path generation, for complex surface machining, using point cloud data[C]. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 2015, 26: 397-402.
- [12] Bruning J, Denkena B, Dittrich M A, *et al.* Simulation based planning of machining processes with industrial robots[C]. *16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry*, 2016, 6: 17-24.
- [13] Wan C H, Chen X J. Algorithm of rapidly generating contour line based on rapid prototyping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s103001.
万程辉, 程效军. 基于快速成型技术的轮廓线快速生成算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s103001.
- [14] Li R Z, Yang M, Liu Y Y, *et al.* An uniform simplification algorithm for scattered point cloud[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0710002.
李仁忠, 杨曼, 刘阳阳, 等. 一种散乱点云的均匀精简算法[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0710002.
- [15] Zhang Y, Yan L. 3D diffusion filtering method of intensity noise for terrestrial laser scanning point cloud[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 568-573.
张毅, 闰利. 地面激光点云强度噪声的三维扩散滤波方法[J]. *测绘学报*, 2013, 42(4): 568-573.
- [16] Chen Z W, Da F P. 3D point cloud simplification algorithm based on fuzzy entropy iteration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0815001.
陈璋雯, 达飞鹏. 基于模糊熵迭代的三维点云精简算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0815001.
- [17] Zhao P, Lou P H, Liu M D, *et al.* Tool path optimization method based on NURBS curve fitting[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(7): 1454-1459.
赵鹏, 楼佩煌, 刘明灯, 等. 基于 NURBS 曲线拟合的刀具路径优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(7): 1454-1459.
- [18] Jiang S S. Numerical estimation of normal vector at the vertices of polygon and polyhedron[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(8): 763-767.
姜寿山. 多边形和多面体顶点法矢的数值估计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(8): 763-767.