

DOI: 10.3901/JME.2022.19.024

基于模型预测控制的工业机器人曲面跟踪方法研究^{*}

杨真真¹ 李明富^{1,2,3} 张黎明¹ 邓旭康¹

- (1. 湘潭大学机械工程学院 湘潭 411105;
2. 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心 湘潭 411105;
3. 焊接机器人与应用技术湖南省重点实验室 湘潭 411105)

摘要: 工业机器人执行接触性作业任务时, 通常需要稳定控制接触力, 比如在磨抛过程中, 不平稳的法向接触力容易影响表面质量。为解决力跟踪控制时法向控制速度易超调和不确定环境造成法向接触力不平稳的问题, 提出一种基于模型预测控制的工业机器人曲面跟踪方法。首先, 根据工件模型几何信息计算出末端工具的运动轨迹, 再结合机器人当前位姿求解末端工具的笛卡儿速度; 然后, 建立末端工具与工件接触时的状态空间模型, 并依据末端工具的姿态变化对法向阻尼系数进行在线调节; 最后, 根据实时力信号的反馈, 利用模型预测控制算法对法向速度进行修正, 实现曲面恒力跟踪。基于 Staubli TX90 工业机器人, 在末端工具姿态不变和姿态改变的情况下分别进行了曲面跟踪实验, 结果显示法向接触力波动范围分别为 ± 1 N 和 ± 2 N, 方差分别为 0.0381 N^2 和 0.1059 N^2 , 能够达到较好的力跟踪效果。

关键词: 模型预测控制; 曲面跟踪; 速度修正; 恒力控制

中图分类号: TG242

Research on Surface Tracking Method of Industrial Robot Based on Model Predictive Control

YANG Zhenzhen¹ LI Mingfu^{1,2,3} ZHANG Liming¹ DENG Xukang¹

- (1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105;
2. Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan 411105;
3. Key Laboratory of Welding Robot and Application Technology of Hunan Province, Xiangtan 411105)

Abstract: The stable control of contact force is generally required for industrial robot to perform the contact work. For example, in the grinding process, the surface quality can be easily affected by the unstable contact force in the normal direction. To solve the overshoot of normal speed and the unstable contact force in the normal direction, which caused by uncertain environment, a force tracking method for industrial robot based on model predictive control is proposed. Firstly, the trajectory of the end tool is calculated based on the geometric information of the workpiece. And the Cartesian velocity of the end tool is then calculated by combining with the current robot position. Secondly, the state-space model of contact status between the end tool and the workpiece is developed, and the damping coefficient in the normal direction is adjusted online based on the attitude of end tool. Thirdly, the normal velocity is corrected by the model predictive control algorithm based on the feedback of the real-time force signal to achieve constant force tracking of the surface. Finally, two surface tracking experiments are conducted under the situations of constant and changeable end tool attitude respectively, by Staubli TX90 industrial robot. The experimental results show that, the contact force in the normal

^{*} 国家自然科学基金(51775470, 52075465)、湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2019GK4025)和湖南省科技创新计划(2020RC4038)资助项目。20220106 收到初稿, 20220513 收到修改稿

direction fluctuated in the range of 1 N and 2 N with variance of $0.038\ 1\ \text{N}^2$ and $0.105\ 9\ \text{N}^2$, respectively, which can realize favorable force tracking.

Key words: model predictive control; surface tracking; velocity correction; constant force control

0 前言

随着加工精度要求的提高,工业机器人执行接触性作业任务时,需要迅速对复杂的工作环境做出正确响应,这样才能取得好的作业效果,比如在磨抛过程中,实际工件会有装夹误差和轮廓尺寸偏差,随着曲面曲率的突变,机器人会出现位置偏差,造成磨具与工件间的突变力,影响磨抛质量,因此,对力跟踪控制的研究尤为重要^[1-6]。目前,国内外诸多学者对机器人力跟踪控制方法进行了研究,取得了一定成果。甘亚辉等^[7]提出了一种非结构环境下的力跟踪控制策略,根据接触力的变化对阻尼系数进行自适应调节,但依据过去的接触力变化对未知的环境作动态补偿,难以实现复杂曲面的力跟踪控制。RAVANDI 等^[8]将模糊逻辑与传统滑模控制相结合,提出了一种机器人在不确定环境下的力/位置混合控制方法,方法中的控制参数可在线更新,但实验只进行到了仿真阶段,一些学者^[7-11]是在未知环境中进行的研究,另外也有一些学者^[12-17]

以确定环境为基础。SURDILOVIC 等^[12]对 CAM 数据生成的铣削轨迹进行了优化,采用阻抗控制方法实现了力控制,但阻抗模型参数未能根据环境信息实时调节,力波动范围较大。TIAN 等^[13]根据 CAD/CAM 数据规划抛光路径,采用模糊 PID 控制方法。曾令城等^[14]提出了一种基于先验速度修正的控制方法,实现了对曲面的法向力跟踪,但该方法中的 PID 参数和先验速度权重是经验值,实验易出现速度超调现象。为解决力跟踪控制时法向控制速度易超调和不确定环境造成接触力不平稳的问题,本文提出一种基于模型预测控制(MPC)的工业机器人曲面跟踪方法。如图 1 所示,首先,根据采集到的跟踪轨迹样本点进行离线轨迹规划,得到末端工具的中心点位置集合、姿态集合和法矢量倾角集合;其次,通过输入的机器人位姿和规划的轨迹信息计算出当前位置的笛卡儿速度;然后,依据末端工具姿态变化对法向阻尼系数进行实时调节,并通过 MPC 算法对法向速度进行修正;最后,将修正后的笛卡儿速度通过雅可比矩阵转换为机器人的关节角,机器人执行运动指令。

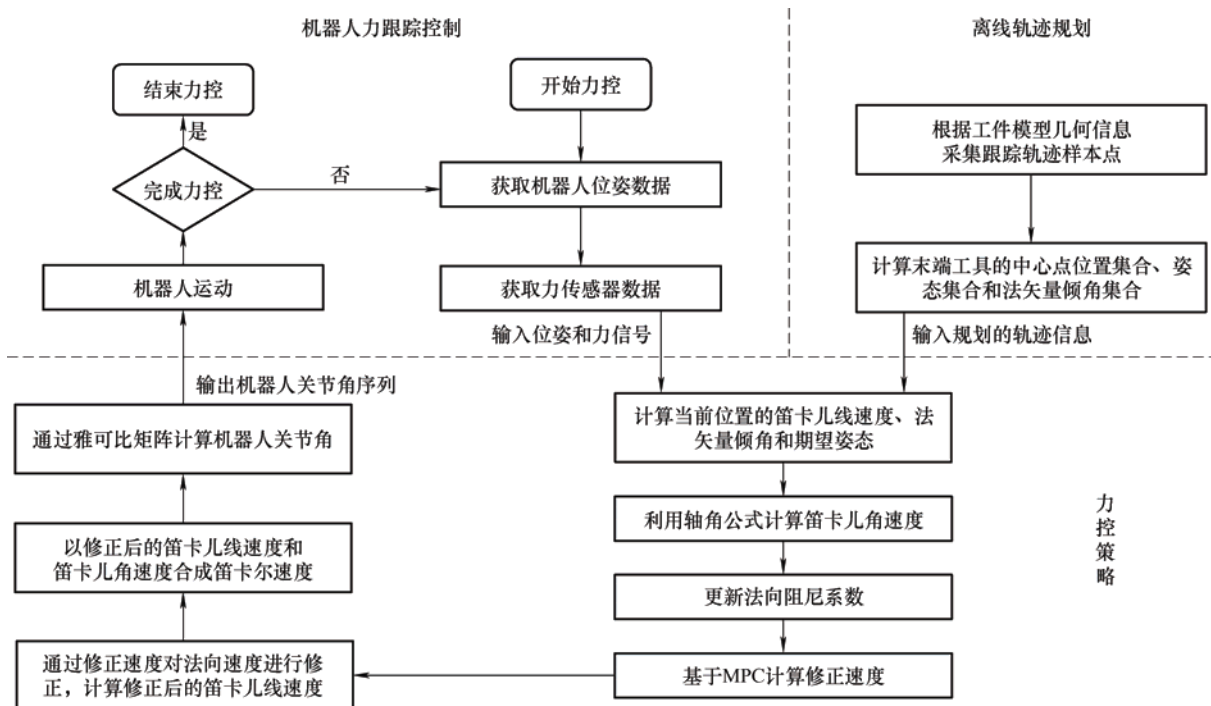


图 1 机器人力跟踪控制方法流程图

1 离线轨迹规划

力控开始前进行离线轨迹规划,可提高环境的确定性和力控过程中的跟踪精度。如图2所示,接触点位于末端工具同一横截面,虽然接触点不固定,但其对应的末端工具中心点是固定的,故令末端工具中心点为工具坐标系 $\{T\}$ 的原点。

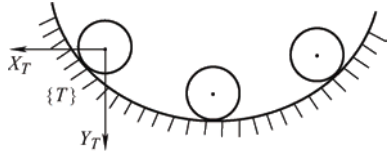


图2 末端工具与工件的接触状态

假设根据工件模型几何信息采集的跟踪轨迹样本点为末端工具与工件的接触点,如图3所示,工具坐标系 $\{T\}$ 的 X_T 轴方向始终与世界坐标系 $\{W\}$ 的 X_W 轴方向相反,工具坐标系 $\{T\}$ 的 Z_T 轴平行于接触点所在平面,矢量 ${}^W\mathbf{x}^+$ 、 ${}^W\mathbf{z}^+$ 分别与 X_T 、 Z_T 轴同向,单位矢量 ${}^W\mathbf{x}^+ = (-1 \ 0 \ 0)$,其中左上标表示符号所参考的坐标系。曲线 l_1 、 l_2 位于工件模型曲面上, l_2 是由接触点组成的跟踪轨迹, l_1 由 l_2 在曲面上偏置很小的距离得到。世界坐标系 $\{W\}$ 下,在 l_1 上采样点集 P_i , ($i=1,2,\dots,m$),在 l_2 上采样点集 P_j , ($j=1,2,\dots,n$), $P_h \in P_i$, $P_k, P_{k+1} \in P_j$ 。当 P_k 、 P_{k+1} 和 P_h 三点间两两距离足够小时,点 P_k 所在平面可由此三点确定,则点 P_k 处法矢量 $\mathbf{n} = \mathbf{P}_k \mathbf{P}_h \times \mathbf{P}_k \mathbf{P}_{k+1}$, ${}^W\mathbf{z}^+ = \mathbf{n} \times {}^W\mathbf{x}^+$,假设 ${}^W\mathbf{z}^+ = (0 \ y \ z)$,则点 P_k 处末端工具的姿态 ${}^W\mathbf{R}_{d,k}$ 为

$${}^W\mathbf{R}_{d,k} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-z}{\sqrt{y^2+z^2}} & \frac{y}{\sqrt{y^2+z^2}} \\ 0 & \frac{y}{\sqrt{y^2+z^2}} & \frac{z}{\sqrt{y^2+z^2}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

令末端工具与工件的接触点 P_k 为接触点坐标系 $\{H\}$ 的原点,接触点坐标系 $\{H\}$ 与工具坐标系 $\{T\}$ 平行(原点不同),如图4所示, ${}^W\mathbf{x}^-$ 是与 X_T 轴反向的单位向量, ${}^W\mathbf{x}^- = (1 \ 0 \ 0)$,则点 P_k 处的法矢量倾角 θ_k 为

$$\theta_k = \arccos \frac{\mathbf{n} \cdot {}^W\mathbf{x}^-}{|\mathbf{n}| \cdot |{}^W\mathbf{x}^-|} \quad (2)$$

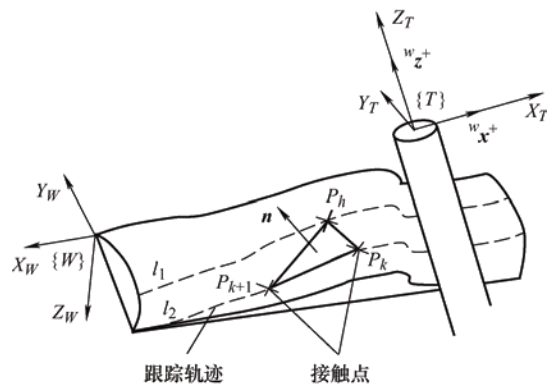


图3 工件模型点位信息图

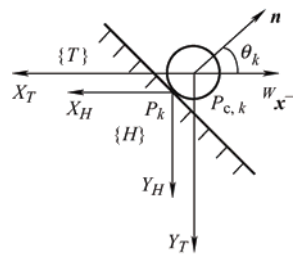


图4 末端工具中心点位置分析图

由点 P_k 坐标确定其位置矩阵 ${}^W\mathbf{P}_k$,则接触点坐标系 $\{H\}$ 与世界坐标系 $\{W\}$ 间的位姿转换矩阵 ${}^W\mathbf{T}_H$ 为

$${}^W\mathbf{T}_H = \begin{pmatrix} {}^W\mathbf{R}_{d,k} & {}^W\mathbf{P}_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

末端工具中心点处的位置矩阵 ${}^H\mathbf{P}_{c,k}$ 为

$${}^H\mathbf{P}_{c,k} = \begin{pmatrix} -r \cos \theta_k \\ -r \sin \theta_k \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, r 为末端工具半径。联立式(1)~(4)有

$$\begin{pmatrix} {}^W\mathbf{P}_{c,k} \\ 1 \end{pmatrix} = {}^W\mathbf{T}_H \begin{pmatrix} {}^H\mathbf{P}_{c,k} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由 ${}^W\mathbf{P}_{c,k}$ 即可确定末端工具中心点 $P_{c,k}$ 在世界坐标系 $\{W\}$ 下的坐标。

因为点集 P_j 中的各点为末端工具与工件的接触点,所以由式(1)、(2)和(5)同理可得末端工具的姿态集合 ${}^W\mathbf{R}_{d,j}$ 、接触点处的法矢量倾角集合 θ_j 和末端工具的中心点位置集合 $P_{c,j}$,继而得到笛卡儿空间中由 $P_{c,j}$ 和 ${}^W\mathbf{R}_{d,j}$ 组成的末端工具的运动轨迹。

2 机器人与环境的接触模型

2.1 法向接触力

将力传感器坐标系 $\{S\}$ 下测得的力信号转化为

3×1 矩阵 ${}^S\mathbf{F}$ ，则末端工具与工件间接触力 ${}^T\mathbf{F} = {}^T\mathbf{R}_S {}^S\mathbf{F}$ ，其中 ${}^T\mathbf{R}_S$ 是旋转矩阵，表示力传感器坐标系 $\{S\}$ 相对于工具坐标系 $\{T\}$ 的姿态描述。

假设 ${}^T\mathbf{F} = (F_x \ F_y \ F_z)^T$ ，如图 5 所示，则末端工具与工件间法向接触力 F_n 的大小为

$$F_n = F_x \cos \theta + F_y \sin \theta \quad (6)$$

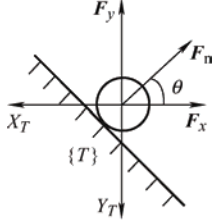


图 5 末端工具受力分析图

2.2 状态空间模型

设想在法矢量方向上，末端工具与工件之间存在一“弹簧-阻尼-质量”系统，系统动态方程为

$$F_d - F_n = M(\ddot{X}_c - \ddot{X}_r) + B(\dot{X}_c - \dot{X}_r) + K(X_c - X_r) \quad (7)$$

式中， M 、 B 和 K 分别表示质量系数、阻尼系数和刚度系数， F_d 表示期望接触力， F_n 表示实际接触力， X_r 表示期望接触位置， X_c 表示实际接触位置。简化动态方程得到^[14]

$$F_d(k) - F_n(k) = B(\dot{X}_c(k) - \dot{X}_r(k)) \quad (8)$$

式(8)为离散化公式， k 表示第 k 个采样时刻。

当末端工具沿着规划的运动轨迹运动时，法矢量方向上 X_r 不变，即 $\dot{X}_r = 0$ ，则式(8)变为

$$F_d(k) - F_n(k) = B\dot{X}_c(k) \quad (9)$$

式(9)可理解为在第 k 个采样周期内，末端工具以速度 $\dot{X}_c(k)$ 运动后，法向接触力由 $F_n(k)$ 变为 $F_d(k)$ 。则由式(9)可得到以下线性离散时间系统的状态空间模型

$$F_n(k+1) = F_n(k) + B\dot{X}_c(k) \quad (10a)$$

$$y(k) = F_n(k) \quad (10b)$$

式中， k 、 $k+1$ 表示第 k 、 $k+1$ 个采样时刻； $F_n(k+1)$ 和 $F_n(k)$ 是状态变量，表示法向接触力； $\dot{X}_c(k)$ 是控制输入变量，表示法向修正速度； B 是法向阻尼系数； $y(k)$ 是被控输出变量。

2.3 法向阻尼系数

假设 X_w 、 Y_w 、 Z_w 方向上的阻尼系数分别为 B_x 、 B_y 、 B_z ，随着接触点处法矢量方向的改变，

法向阻尼系数 B 也会改变。如图 6 所示，假设工具坐标系 $\{T\}$ 下末端工具法向速度 $\dot{X}_c(k)$ 大小为

$$\dot{X}_c(k) = v_x \cos \theta + v_y \sin \theta \quad (11)$$

前后时刻法向变化接触力 ΔF_n 大小为 $\Delta F_n = F_n(k+1) - F_n(k)$ 。

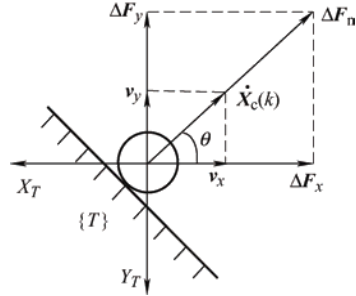


图 6 末端工具力与速度分解示意图

根据式(10a)有

$$B\dot{X}_c(k) = \Delta F_n \quad (12)$$

联立式(11)、(12)得到

$$\Delta F_n = B(v_x \cos \theta + v_y \sin \theta) \quad (13)$$

末端工具前后时刻变化接触力为

$${}^T\Delta\mathbf{F} = (\Delta F_x \ \Delta F_y \ 0)^T = (\Delta F_n \cos \theta \ \Delta F_n \sin \theta \ 0)^T \quad (14a)$$

$${}^w\Delta\mathbf{F} = {}^w\mathbf{R}_T {}^T\Delta\mathbf{F} \quad (14b)$$

末端工具速度为

$${}^w\mathbf{v} = \text{diag}\left(\frac{1}{B_x} \ \frac{1}{B_y} \ \frac{1}{B_z}\right) {}^w\Delta\mathbf{F} \quad (15b)$$

$${}^T\mathbf{v} = {}^T\mathbf{R}_w {}^w\mathbf{v} = (v_x \ v_y \ 0)^T \quad (15b)$$

$$\text{假设 } {}^w\mathbf{R}_T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \text{ 联立式(13)~(15b)}$$

得到法向阻尼系数 B

$$B = B_x B_y B_z \sqrt{B_y B_z (a_{11} \cos \theta + a_{12} \sin \theta)^2 + B_x B_z (a_{21} \cos \theta + a_{22} \sin \theta)^2 + B_x B_y (a_{31} \cos \theta + a_{32} \sin \theta)^2} \quad (16)$$

3 基于 MPC 的力控策略

3.1 笛卡尔速度

如图 7 所示，曲线 l_3 是由 $P_{c,j}$ 和 ${}^w\mathbf{R}_{d,j}$ 组成的运

动轨迹, $P_f, P_{f+1}, P_g, P_{g+1} \in P_{c,j}$ 。假设当前末端工具中心点为 $P_c(x_c, y_c, z_c)$, 点 $P_r(x_r, y_r, z_r)$ 是点 P_c 在曲线 l_3 上对应的参考点, 参考点 P_r 位于点 $P_f(x_f, y_f, z_f)$ 和点 $P_{f+1}(x_{f+1}, y_{f+1}, z_{f+1})$ 之间, 则参考点 P_r 坐标可由式(17)插值计算得到

$$\begin{cases} x_r = x_c \\ y_r = y_f \frac{x_{f+1} - x_r}{x_{f+1} - x_f} + y_{f+1} \frac{x_r - x_f}{x_{f+1} - x_f} \\ z_r = z_f \frac{x_{f+1} - x_r}{x_{f+1} - x_f} + z_{f+1} \frac{x_r - x_f}{x_{f+1} - x_f} \end{cases} \quad (17)$$

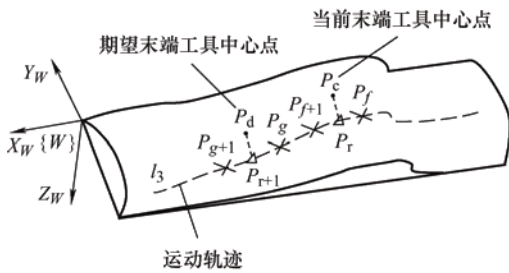


图7 末端工具的运动轨迹示意图

参考点 P_r 沿 X_W 轴方向位置更新 Δx 后, 得到曲线 l_3 上位于点 P_g 和点 P_{g+1} 之间的参考点 P_{r+1} , 点 P_d 是参考点 P_{r+1} 对应的期望末端工具中心点。同上, 参考点 P_{r+1} 坐标、点 P_d 处末端工具的姿态 ${}^W R_d$ 和点 P_c 处的法矢量倾角 θ 可经插值计算得到。

由参考点 P_r 、 P_{r+1} 坐标确定其位置矩阵 ${}^W P_r$ 和 ${}^W P_{r+1}$, 则笛卡儿线速度可由式(18)计算得到

$${}^W v_r = \frac{{}^W P_{r+1} - {}^W P_r}{\Delta t} \quad (18)$$

其中 Δt 是采样周期。

因为末端工具的笛卡儿速度由 3×1 的笛卡儿线速度和 3×1 的笛卡儿角速度组成, 笛卡儿角速度为

$${}^W w = \frac{\alpha \cdot n_r}{\Delta t} \quad (19)$$

式中, n_r 为单位旋转轴矢量, α 为末端工具绕 n_r 旋转时的姿态旋转角, 二者可由轴角公式计算得到。故末端工具的笛卡儿速度为

$${}^W v_{car} = \begin{pmatrix} {}^W v_r \\ {}^W w \end{pmatrix} \quad (20)$$

理想条件下, 当末端工具以笛卡儿速度运动时, 可实现恒力跟踪, 但现实中存在着工件的制造误差、机器人的运动误差、基于采样点得到的跟踪轨迹的位置偏差, 以及工件、工具的安装和定位等误差, 故需要对末端工具的法向速度进行修正。

3.2 基于 MPC 的速度修正

本文采用一种无约束 MPC 算法, 对法向速度进行修正。MPC 算法可通过现在的状态和模型预测出将来的状态, 使法向接触力在设定的采样周期个数中逐步达到设定的期望力, 改善法向控制速度超调现象。

假设当前为第 k 个采样时刻, 根据状态空间模型对第 $k+1$ 到 $k+p$ 个采样时刻的被控输出进行预测, 得到预测方程

$$Y = S_x \Delta F_n(k) + Iy(k) + S_u \Delta U \quad (21)$$

其中 $Y = (y(k+1) \ y(k+2) \ \cdots \ y(k+p))^T$, 表示对系统预测 p 步得到的被控输出矩阵; $\Delta U = (\Delta \dot{X}_c(k) \ \Delta \dot{X}_c(k+1) \ \cdots \ \Delta \dot{X}_c(k+p-1))^T$, 表示对系统预测 p 步得到的控制输入矩阵; 参数矩阵 $S_x = (1 \ 2 \ \cdots \ p)_{1 \times p}^T$ 、 $I = (1 \ 1 \ \cdots \ 1)_{1 \times p}^T$ 、

$$S_u = \begin{pmatrix} B & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 2B & B & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ pB & (p-1)B & \cdots & \cdots & B \end{pmatrix}_{p \times p}, \text{法向阻尼系数}$$

B 根据式(16)更新得到。

基于预测方程式(21)求解当前采样时刻的最优控制序列

$$\Delta U^* = (S_u^T \Gamma_Y^T \Gamma_Y S_u + \Gamma_U^T \Gamma_U)^{-1} \cdot$$

$$S_u^T \Gamma_Y^T \Gamma_Y E \quad (22)$$

其中加权矩阵 $\Gamma_Y = \text{diag}(\Gamma_y, \Gamma_y, \cdots, \Gamma_y)_{p \times p}$ 、 $\Gamma_U = \text{diag}(\Gamma_u, \Gamma_u, \cdots, \Gamma_u)_{p \times p}$; 预测控制误差 $E = R - S_x \Delta F_n(k) - Iy(k)$, R 表示期望的被控输出矩阵, $R = (r(k+1) \ r(k+2) \ \cdots \ r(k+p))^T$ 。

根据 MPC 的基本原理, 选取最优控制序列的第一个元素作为控制输入增量

$$\Delta \dot{X}_c(k) = (1 \ 0 \ \cdots \ 0)_{1 \times p} \cdot$$

$$(S_u^T \Gamma_Y^T \Gamma_Y S_u + \Gamma_U^T \Gamma_U)^{-1} S_u^T \Gamma_Y^T \Gamma_Y E \quad (23)$$

基于 MPC 的速度修正算法如下。

(1) 设定初始值 $\dot{X}_c(0) = 0$ 、 $F_n(0) = 0$, 选取合适的加权因子 Γ_y 、 Γ_u 和预测时域 p 。

(2) 计算参数矩阵 S_x 、 S_u 和 I 。

(3) 由式(6)计算得到测量值 $F_n(k)$, 计算 $\Delta F_n(k) = F_n(k) - F_n(k-1)$, 根据式(10b)计算 $y(k)$ 。

(4) 由式(23)计算控制输入增量 $\Delta \dot{X}_c(k)$, 计算



图10 力控跟踪实验场景图

4.1 跟踪实验 I——末端工具姿态不变

(1) 实验设计。

为了验证所提算法的有效性, 检验曲率突变情况下的系统响应能力, 本文设计如图 10 和图 11a 所示的自由曲面, $\{P\}$ 表示工件坐标系。在自由曲面上选取一条曲线作为跟踪轨迹 I, 该轨迹上有 4 处较大的曲率突变, 如图 11b 中的 4 处标记所示。当末端工具沿着跟踪轨迹 I 运动时, 可以保持姿态不变。

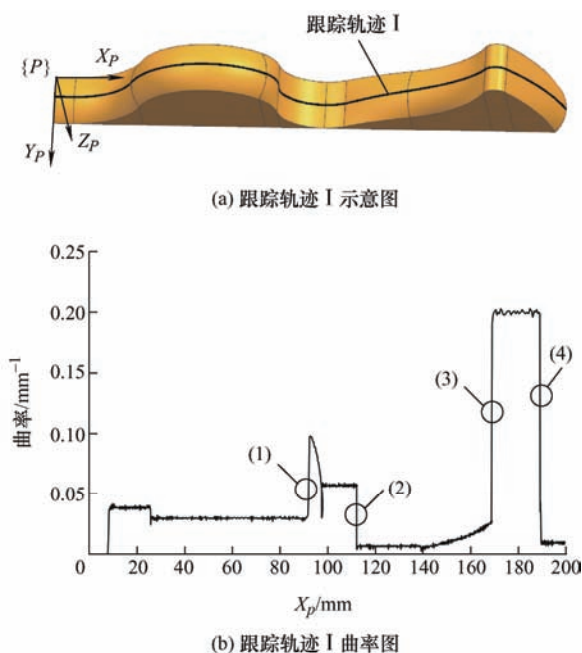


图11 跟踪轨迹 I 及其曲率图

设定法向期望接触力 $F_d = 5 \text{ N}$, 采集跟踪轨迹样本点 1 000 个。 Γ_y 是预测控制输出误差的加权因子, Γ_u 是控制输入增量的加权因子, 二者的比值影响着修正速度, 为了观察它们对力控的影响, 实验选取三组不同的比值进行研究, 分别是 $\Gamma_y = 0.5$, $\Gamma_u = 1.0$; $\Gamma_y = 0.7$, $\Gamma_u = 1.0$; $\Gamma_y = 1.0$, $\Gamma_u = 1.0$ 。

(2) 实验结果。

末端工具沿跟踪轨迹 I 运动时的平均速度约为 0.4 mm/s 。不同加权因子比值下跟踪实验的结果如图 12 所示, 由实验结果可知, 加权因子合适的取值为 $\Gamma_y = 0.7$, $\Gamma_u = 1.0$ 。

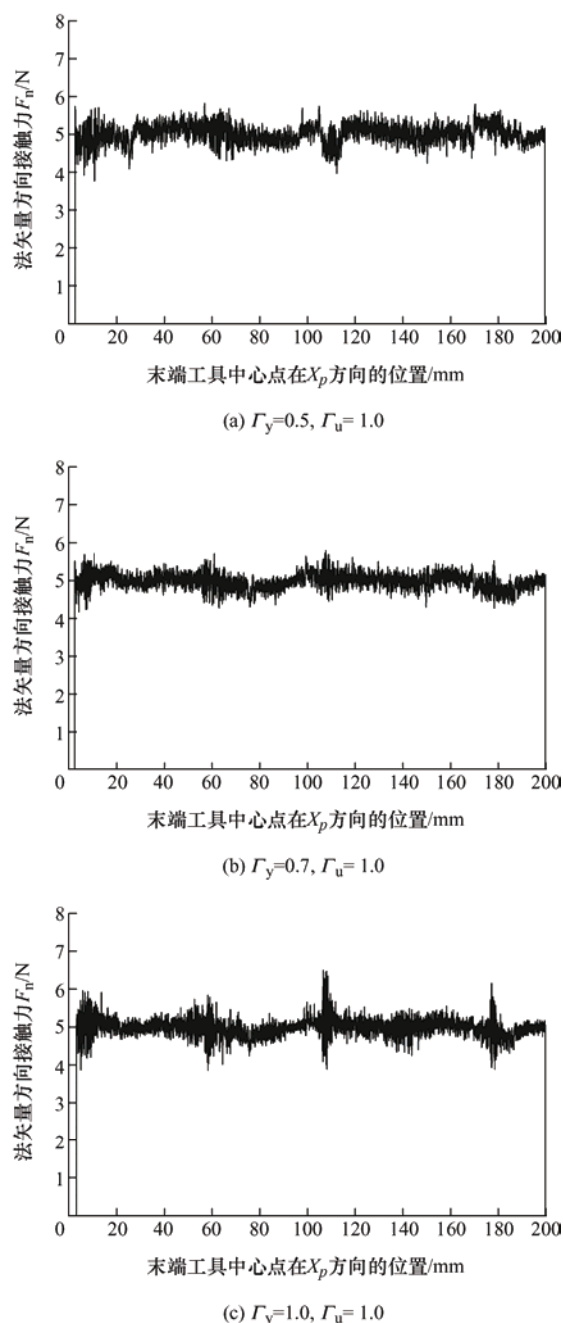


图12 跟踪实验 I 结果图

具体分析如表 1 所示, 当 $\Gamma_y = 0.5$ 时, 力波动范围为 $[3.67 \text{ N}, 5.99 \text{ N}]$, 小于 $\Gamma_y = 1.0$ 时的 $[3.53 \text{ N}, 6.80 \text{ N}]$; 平均值为 5.02 N , 比 $\Gamma_y = 1.0$ 时的 4.99 N 更偏离期望值; 方差为 0.0569 N^2 , 大于 $\Gamma_y = 1.0$ 时的 0.0495 N^2 。由此可知, 当 $\Gamma_y = 0.5$ 时, 法向接触力调控不及时; 当 $\Gamma_y = 1.0$ 时, 在跟踪轨迹 I 曲率变化大的地方, 法向接触力突变大, 力控不稳定。因此, Γ_y 与 Γ_u 比值越大, 系统响应越快, 法向接触力越能更快达到设定的期望值, 但如果比值过大, 在曲率变化大的地方, 法向接触力也易突变得大。

表 1 跟踪实验 I 结果

加权因子 ($\Gamma_u = 1.0$)	力波动 范围/N	平均值 /N	方差 /N ²
$\Gamma_y = 0.5$	[3.67, 5.99]	5.02	0.056 9
$\Gamma_y = 0.7$	[4.06, 5.93]	5.00	0.038 1
$\Gamma_y = 1.0$	[3.53, 6.80]	4.99	0.049 5

实验结果表明,在末端工具姿态不变、加权因子 Γ_y 和 Γ_u 取值合适的情况下,即使曲率存在较大的突变,法向接触力也能被较好地控制在一定波动范围内。

(3) 与其他方法的比较。

本次实验的工件 3D 打印材料及方式、末端工具姿态与文献[14]中的一致,且本实验的跟踪轨迹曲率及曲率变化率多数都比该文献的更大。相比于该文献中的柔顺控制算法,本文所提的力跟踪控制方法能有效改善法向速度超调现象,减小力波动范围与方差,实验结果对比如表 2 所示。

表 2 实验结果对比

控制方法	期望接触力/N	力波动范围/N	波动率 (%)	方差 /N ²
柔顺控制算法 ^[14]	6	± 3	± 50	0.518 4
本文算法	5	± 1	± 20	0.038 1

4.2 跟踪实验 II——末端工具姿态改变

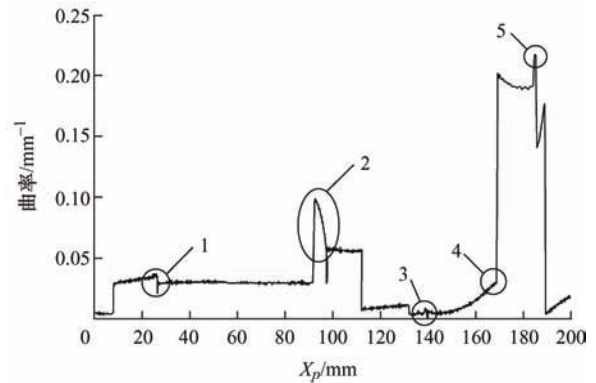
如图 13a 所示,在自由曲面上任意截取一条曲线作为跟踪轨迹 II,该轨迹的曲率变化如图 13b 所示,当末端工具沿着该轨迹运动时,若姿态不变,则会发生干涉,故本实验中末端工具的姿态需要改变。经计算得到的末端工具姿态旋转角的变化如图 13c 所示(各个位置姿态旋转角 α 的值是相对于初始位姿计算的,假设初始姿态旋转角 $\alpha = 0^\circ$),曲线越陡,表明姿态旋转角变化越快,末端工具的姿态改变幅度越大。

设定法向期望接触力 $F_d = 5 \text{ N}$,采集跟踪轨迹样本点 1 000 个。经多次实验发现,相同加权因子取值下,相比于姿态不变,末端工具姿态改变时的法向接触力波动更大,系统响应更慢,因此结合实验 I 的结论,实验得到加权因子合适的取值为 $\Gamma_y = 0.8$, $\Gamma_u = 1.0$,实验结果如图 14 所示。末端工具沿跟踪轨迹 II 运动时的平均速度约为 0.3 mm/s 。

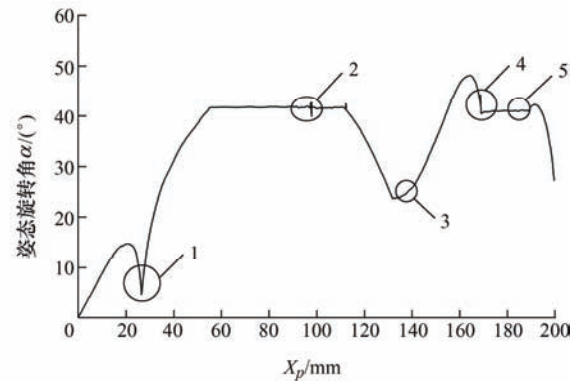
由实验结果可知,在末端工具姿态改变、加权因子 Γ_y 和 Γ_u 取值合适的情况下,本文所提算法可取得较好的力控效果。结果分析后得到,力波动范围为 $[3.17 \text{ N}, 6.60 \text{ N}]$,平均值为 4.92 N ,方差为 $0.105 9 \text{ N}^2$ 。



(a) 跟踪轨迹 II 示意图



(b) 跟踪轨迹 II 曲率图



(c) 末端工具姿态旋转角的变化

图 13 跟踪轨迹 II 及其曲率及末端工具姿态旋转角

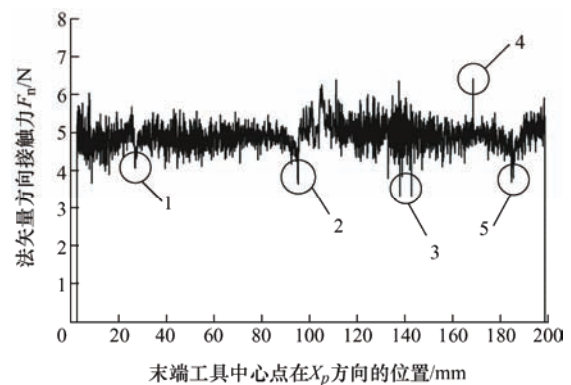


图 14 跟踪实验 II 结果图

法向接触力变化较大的地方有 5 处,如图 14 标记所示,其所对应的曲率和姿态旋转角如图 13b 和图 13c 标记所示,其中,设计第 4 处姿态旋转角的突变,目的是检验所提算法在极端情况下的有效

性,实验结果表明,在姿态旋转角有较大突变的情况下,法向接触力也未脱离控制,本文所提算法依然有效。

由图 13b、图 13c 与图 14 中的标记可知:第 4 处的曲率和姿态旋转角突变都较大;第 1、3 处的曲率突变较小,但姿态旋转角变化较快;第 2、5 处的曲率突变较大,但姿态旋转角变化较慢,由此可知,法向接触力同时受曲率和姿态旋转角的影响。由实验 I 得知,在姿态旋转角恒为零、加权因子取值合适的情况下,曲率对法向接触力的影响较小,但本实验的接触力波动范围却比实验 I 的更大,这表明姿态旋转角对法向接触力有较大的影响,因此,在实际应用中,应对姿态旋转角做平滑处理。

综上,在末端工具姿态旋转角有较大突变的情况下,本文所提算法依然有效,法向接触力突变更容易发生在姿态旋转角变化大的位置。

4.3 实验总结

跟踪轨迹曲率变化大的位置,法向接触力易产生突变,当加权因子 Γ_y 和 Γ_u 取值合适时,本文所提算法可有效减小曲率对法向接触力的影响。实验 II 的效果不如实验 I 的好,表明末端工具的姿态变化会影响到跟踪精度,这可能是因为末端工具的标定存在误差,造成了末端工具旋转中心的位置偏差。

上述两个实验都达到了较好的力控效果,验证了本文所提算法的可行性和有效性。

5 结论

(1) 本文提出了一种实现机器人曲面恒力跟踪的方法,先进行离线轨迹规划,结合力与位姿的反馈,实现力向速度的转换,再通过雅可比矩阵实现速度向位置的转换。采用此方法,位置型的工业机器人可以实现自由曲面的恒力跟踪控制,且可以达到一个较高的力跟踪精度。

(2) 根据建立的接触模型和法向阻尼系数更新公式,提出了一种基于 MPC 的速度修正算法,对末端工具的笛卡儿速度进行了修正。实验结果表明:在末端工具姿态不变和姿态改变的情况下,所提算法都能有效改善连续路径上的法向控制速度超调现象,减小力波动范围,有较好的力控效果;末端工具姿态的改变会导致力波动范围增大,尤其是在姿态调整不够平滑、变化太大的时候,力控效果会受到影响,所以末端工具应尽量保持姿态一致,若需改变姿态,则应注意姿态变化的平滑性。

(3) 加权因子 Γ_y 与 Γ_u 的比值过大或过小都会

影响实验结果,后续可对其进行优化,并改善实验标定方法,将本文所提的曲面跟踪方法用于实际磨抛中。

参 考 文 献

- [1] TSAI M J, HUANG J F, KAO W L. Robotic polishing of precision molds with uniform material removal control[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(11): 885-895.
- [2] ZHAN J, YU S. Study on error compensation of machining force in aspheric surfaces polishing by profile-adaptive hybrid movement-force control[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9-12): 879-885.
- [3] WANG G, WANG Y, ZHANG L, et al. Development and polishing process of a mobile robot finishing large mold surface[J]. Machining Science and Technology, 2014, 18(4): 603-625.
- [4] 张铁,胡广. 曲面轮廓恒力跟踪的非线性双闭环控制[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(7): 99-106.
ZHANG Tie, HU Guang. Nonlinear dual-loop force controller of contour following[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(7): 99-106.
- [5] 董恣,张立建,易旺民,等. 基于动力学前馈的空间机器人多销孔装配力柔顺控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 207-217.
DONG Que, ZHANG Lijian, YI Wangmin, et al. Force compliance control of multi-peg-in-hole assembling by space robot based on dynamic feedforward[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 207-217.
- [6] 许家忠,郑学海,周洵. 复合材料打磨机器人的主动柔顺控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 151-158.
XU Jiazhong, ZHENG Xuehai, ZHOU Xun. Active and compliant control of the composite polishing robot[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(12): 151-158.
- [7] 甘亚辉,段晋军,戴先中. 非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2134-2142.
GAN Yahui, DUAN Jinjun, DAI Xianzhong. Adaptive variable impedance control for robot force tracking in unstructured environment[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2134-2142.
- [8] RAVANDI A K, KHANMIRZA E, DANESHJOU K. Hybrid force/position control of robotic arms manipulating in uncertain environment based on adaptive fuzzy sliding mode control[J]. Applied Soft Computing,

- 2018, 70(19): 864-874.
- [9] 李二超, 李炜. 在未知环境下面向位控机器人的力/位混合控制[J]. 煤炭学报, 2007(6): 657-660.
- LI Erchao, LI Wei. Hybrid force/position control for positional-controlled robotic manipulators in unknown environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007(6): 657-660.
- [10] KOMATI B, CLEVY C, LUTZ P. Force tracking impedance control with unknown environment at the microscale[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Hong Kong: IEEE, 2014: 5203-5208.
- [11] 李正义, 曹汇敏. 适应环境刚度、阻尼参数未知或变化的机器人阻抗控制方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(12): 1581-1585.
- LI Zhengyi, CAO Huimin. Robot impedance control method adapting to unknown or changing environment stiffness and damping parameters[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(12): 1581-1585.
- [12] SURDILOVIC D, ZHAO H, SCHRECK G, et al. Advanced methods for small batch robotic machining of hard materials[C]// 7th German Conference on Robotics. Munich: VDE, 2012: 1-6.
- [13] TIAN F, LI Z, LÜ C, et al. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1-4): 639-646.
- [14] 曾令城, 李明富, 杨真真, 等. 基于先验速度修正的工业机器人曲面跟踪柔顺控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 41-51.
- ZENG Lingcheng, LI Mingfu, YANG Zhenzhen, et al. Compliant control of industrial robot surface tracking based on priori velocity correction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 41-51.
- [15] 肖文磊, 邹极. 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.
- XIAO Wenlei, HUAN Ji. Integration of a cutting robot with CAD/CAM system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 52-60.
- [16] HUANG H, GONG Z M, CHEN X Q, et al. Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(2): 140-145.
- [17] NAGATA F, HASE T, HAGA Z, et al. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot[J]. Mechatronics, 2007, 17(4-5): 207-216.
-
- 作者简介: 杨真真, 女, 1996 年出生。主要研究方向为机器人控制。
E-mail: yzzibobo_dk@163.com
- 李明富(通信作者), 男, 1979 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能机器人、智能制造。
E-mail: mingfuli@xtu.edu.cn; limingfu2001@foxmail.com