

工业机器人连续轨迹位置规划算法的研究

杜亮, 张铁

(华南理工大学机械工程学院机器人研究所, 广东 广州 510640)

摘要:提出了一种工业机器人连续轨迹位置规划算法。此方法基于笛卡尔空间定时插补算法, 包含四个方面内容: 特征点提取、曲线拟合、通过位置插补和姿态插补确定插补点及利用逆运动学方程求出各关节转角。此方法可应用于各种工业机器人连续精确的路径规划。

关键词:机器人; 末端执行器; 轨迹规划

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1672-545X(2006) 05-0029-03

引言

对机器人末端执行器从一点到另一点的移动轨迹做出严格控制的称为 CP(Continuous Path Control) 控制。对于工业机器人运动的位置控制, 通常是采用示教再现的方法, 即首先教机器人运动到哪些位置点, 机器人记住每个位置点再重复这些位置点^[1-3]。但是我们不可能为机器人示教每个运动轨迹上的位置点。因此我们只是示教机器人几个特殊的位置点, 然后再在这些位置点之间算出必须到达的位置点的过程成为插补, 插入中间位置点进行 CP 控制。由于现代工业机器人作业的时候需要对工件进行连续的精确的路径, 则必须进行 CP 控制。对于连续轨迹规划很多科学家提出了一系列解决方法, 鄢波等提出了遗传算法进行路径规划; 谭冠政等提出了时间最优轨迹^[4]的规划方法。但是这些方法都很复杂不适应于机器人的实时控制。因此综合他们算法的优缺点, 我们综合的提出了一种有效的实时控制的新的连续轨迹位置插补规划法以控制需要连续轨迹控制的工业机器人。该规划方法既可以用于示教编程也可用于离线编程。

1 运动学建模

1.1 D-H 法则建立正运动学解

根据所研究的工业机器人, 建立基于 D-H 法则的数学模型^[1,3]。其中, $A_i =$

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i c\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i c\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $s_i = \sin \theta_i$; $c_i = \cos \theta_i$; $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$; $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$

而对于喷涂机器人的喷枪与机器人基座之间的总变换为:

$$T_n = A_1 A_2 \cdots A_n \quad \text{其中 } n \text{ 是关节数}$$

对于在空间中的任一刚体, 有六个自由度进行描述, 也就是说它既有沿着 X, Y, Z 三轴的移动, 也有绕这三轴的旋转。因此我们描述机器人的空间坐标系, 必须既有位置坐标也有姿态坐标, 通称为机器人空间的位姿。我们用 nT_0 描述机器人空间的位

置, 用 ${}^n\hat{o}, {}^n\hat{a}, {}^n\hat{p}$ 描述机器人空间的姿态。由 $T_n = [{}^n\hat{o} \quad {}^n\hat{a} \quad {}^n\hat{p}]$ 我们可以得到机器人空间位姿的统一的方程。

$$\text{而 } T_n = A_1 A_2 \cdots A_n = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

因此我们一旦设计好机器人的结构就可以从中得出机器人的位姿方程。

1.2 运动学逆解

当已知 ${}^n\hat{o}, {}^n\hat{a}, {}^n\hat{p}$ 各矢量时, 逆求各位姿的转角的值的方法, 称为逆运动学解。逆运动学问题中, 通常是不存在一般的解析解的, 因此逆运动学通解都是用数值解法进行求解的。其中众所周知的方法是采用 Newton-Raphson 方法求解数值解。那么当 T_n 为已知时, 则满足 $T_n = T_n(\theta)$ 的解 $\theta_j (j=1, 2, \cdots, n)$ 可通过雅各比矩阵 $J^{-1}(\theta)$ 对下式通过迭代求得:

$$\theta_{j+1} = \theta_j + J^{-1}(\theta) \{T_n - T_n(\theta_j)\} \quad (3)$$

当 J 为奇异矩阵或者长方阵时, $J^{-1}(\theta)$ 不能计算, 就用 J 的广义逆矩阵。

因此对于机器人一旦知道机器人的运动学轨迹上的位姿, 便可以通过逆运动学解得出各个执行器的转角。但是此时求出的转角 θ_j 为多解, 因此必须增加约束条件来选择一个最优解。

2 空间轨迹的规划

2.1 笛卡尔空间插补

对于机器人的空间轨迹规划, 既可以在关节变量空间中进行, 也可以在笛卡尔空间中进行, 对于关节变量空间规划来说, 是以关节的角度的函数来描述机器人的轨迹进行插补。对于笛卡尔空间规划中, 是要规划机器人末端位置的时间函数, 而相应的关节位置可根据机器人的逆运动学方程求出。关节空间规划法计算简单, 且与笛卡尔空间并不是连续对应的关系, 因此

作者简介: 杜亮(1979—)男, 湖北黄石人, 华南理工大学机器人研究所硕士研究生。研究方向: 工业机器人技术。

收稿日期: 2006-10-30

不会发生机构的奇异性问题。但是对于工业机器人需要末端执行器按照预定的连续轨迹运动,关节空间轨迹规划法显然是难以实现的,工业机器人的轨迹规划采用的在笛卡儿空间进行。

通常认为只要确定了机器人手的位姿,就能为机器人在其工作范围内的任何位置定位和定姿,但是实际上,随着机器人越来越接近其工作空间的极限,虽然机器人仍可能定位在期望的点上,但却不能定姿在期望的位姿上。所以,设计机器人的时候通常采用先定位再定姿的方法^[1]。

根据上面的分析,在进行机器人笛卡儿空间轨迹规划的时候,采用先插补机器人的位置点,再通过位置点插补机器人的姿态变化的方法。具体如下:

首先通过机器人需要运动的轨迹上得出特征点,然后对特征点进行曲线拟合,再对拟合的曲线进行数据离散,得到一系列插补的点。再根据机器人轨迹插补得到的需要离散点的值进行机器人姿态插补,得到机器人姿态插补的各点坐标。然后根据所得的机器人位置坐标和姿态坐标,最后通过机器人逆运动学方程得到机器人各关节运动的转角值。

2.2 定时插补

对于笛卡儿坐标空间,可以采用定时插补进行轨迹规划。定时插补要求插补点的距离正比于要求的速度,因此只需要控制插补点的速度,定时插补控制过程如下:

对于机器人轨迹离散之后,末端执行器从 P_j 点移动到 P_{j+1} 点,当速度为已确定的时候:

$$P_j \rightarrow P_{j+1} \quad P_j P_{j+1} \rightarrow vt_j \quad (j=0,1,2,\dots,m)$$

由上式可知, v 是机器人运行的速度,如果两插补点距离 $P_j P_{j+1}$, t_j 恒为一个足够小的定值,只需根据速度 v 控制 $P_j P_{j+1}$ 。也就是说,在插补点距离 t_j 保持不变, $P_j P_{j+1}$ 随着不同的工作速度 v 的变化而变化。当确定某段轨迹的速度 v 的时候,可以首先提取出这段上面的特征点进行曲线拟合。

2.2.1 特征点的曲线拟合

对于机器人的运动,当已确定某段运动轨迹之后,先确定一些特殊的轨迹位置点,如 $\check{p}_0, \check{p}_1, \check{p}_2, \dots, \check{p}_m$ 等位置点。对这些位置点进行曲线拟合,得到一条曲线对时间的参数方程:

$$p(t): \begin{cases} p_x = p_x(t) \\ p_y = p_y(t) \\ p_z = p_z(t) \end{cases} \quad (4)$$

求出位置点 $\check{p}_0$ 到 $\check{p}_m$ 的空间弧长:

$$\int_{t_0}^{t_m} \sqrt{\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2} dt \quad (5)$$

可得: $P_j P_{j+1} = \frac{\int_{t_j}^{t_{j+1}} \sqrt{\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2} dt}{m}$, 由此可得: $m = \frac{\int_{t_0}^{t_m} \sqrt{\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2} dt}{P_j P_{j+1}}$ 。

此时算出需要离散的点的数目,再进行位置插补和姿态插补。

2.4 位置插补和姿态插补

对于位置插补:

$$P_x^{(k+1)} = P_x(t + \Delta t)$$

$$P_y^{(k+1)} = P_y(t + \Delta t)$$

$$P_z^{(k+1)} = P_z(t + \Delta t)$$

(Δt 为常量)

$$\text{即可得: } \bar{p}_j = [P_x^j \ P_y^j \ P_z^j]^T \quad (7)$$

将式(2)各项代入上式,即可求出 α, β, γ 等各位姿点的姿态角的值。再通过离散的点得到需要进行插补的各姿态角的值:

$$\begin{aligned} \alpha_{j+1} &= \alpha_j + \Delta \alpha & \Delta \alpha &= (\alpha_m - \alpha_0) / m \\ \beta_{j+1} &= \beta_j + \Delta \beta & \Delta \beta &= (\beta_m - \beta_0) / m \\ \gamma_{j+1} &= \gamma_j + \Delta \gamma & \Delta \gamma &= (\gamma_m - \gamma_0) / m \end{aligned} \quad (8)$$

而由于,

$$T_{npy} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & 0 \\ s\alpha s\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & 0 \\ -s\beta & s\beta s\gamma & c\beta c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可以将得到的 $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ 值代入上式即可得到新的各位姿点的 $\check{n}, \check{o}, \check{a}$:

即:

$$\bar{n}_j = [n_x^j \ n_y^j \ n_z^j]^T \quad (9)$$

$$\bar{o}_j = [o_x^j \ o_y^j \ o_z^j]^T$$

$$\bar{a}_j = [a_x^j \ a_y^j \ a_z^j]^T$$

由此,我们得到了 $T_{ij}^j = [n_j \ o_j \ a_j \ p_j]$;再代入上面的式(2)。即得

$$\text{到: } T_{ij}^j = A_1^j A_2^j \cdots A_n^j = \begin{bmatrix} n_x^j & o_x^j & a_x^j & p_x^j \\ n_y^j & o_y^j & a_y^j & p_y^j \\ n_z^j & o_z^j & a_z^j & p_z^j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

再通过逆运动学方程,可以求出各插补点的转角: θ_i ($i=1,2,\dots,n$; $j=0,1,2,\dots,m$)

3 CP 运动轨迹位置规划算法步骤

(1). 规划出各段轨迹的速度,提取需运动轨迹上的特征点,由式(1)、(2)算出其位置上的坐标 $\check{p}_0, \check{p}_1, \check{p}_2, \dots, \check{p}_m$;

(2). 用式(4)对上述位置点坐标进行曲线拟合,得到一条空间轨迹曲线的对时间的参数方程;

(3). 用式(5)计算参数方程的弧长,利用式(6)计算出需离散点的数目 m ;

(4). 用式(7)进行位置插补,得到 m 个 $\check{p}$ 坐标,用(8)式进行姿态插补,得到 m 个 $\check{n}, \check{o}, \check{a}$ 坐标;

(5). 利用式(3),代入 m 个 $\check{p}, \check{n}, \check{o}, \check{a}$ 向量,计算出 m 个轨迹点的逆运动学解的转角 θ_j ;

(6). 将上步得到 m 个 θ_j 转角值,输入下位机,利用 DSP 控制 n 个电机,每个电机控制一个关节转角;

4 结束语

本文比较了在连续路径规划下,笛卡儿空间轨迹插补和关节空间插补算法的优劣。提出了在给定位姿精度前提下的笛卡儿空间连续路径的定时插补算法。

参考文献:

- [1] 张铁, 谢存禧. 机器人学[M], 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [2] 牧野洋, 谢存禧. 空间机构及机器人机构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [3] 谢存禧, 张铁. 机器人技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] Tan Guangzheng Wang Yuechao "Theoretical and experimental research on time_optimal trajectory planning and control of industrial robots" [J]. Journal of Control Theory&Applications, 2003,20(2).

A Study on Trajectory Planning Algorithm of Industry Robot

DU Liang, ZHANG Tie

(Robot Technical Center, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Precise trajectory planning is needed during modern industry robot works. In this paper, a trajectory planning algorithm was proposed, which bases on the timing interpolation algorithm in Cartesian space and includes four aspects, abstraction of the characteristic point, curve fitting, confirming the interpolation point according to the position interpolation and the orientation interpolation, and getting the joint angle through the inverse kinematics equation. Moreover, this method can be used to precise trajectory control for all kinds of robot.

Keyword: Robot; End-effector; Trajectory planning

(上接第28页)

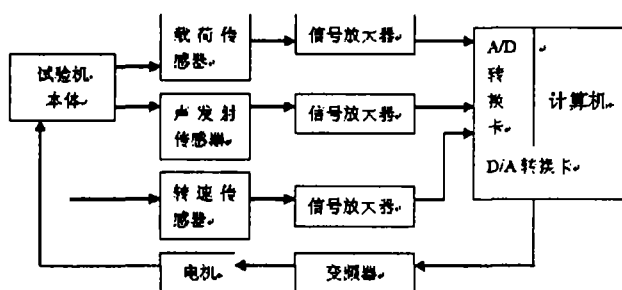


图5 试验机的测控原理图

4 结束语

研制价格较低的新型简易金属材料疲劳试验机, 为在实验室研究材料疲劳时产生的裂纹声发射信号提供了设备, 具有较强的针对性。同时, 可作为金属材料疲劳的学生实验机, 以低

成本进入工科院校学生实验室, 这对于加强高校实验室建设, 提高广西和国内高校学生实验装备的自建水平和提高学生的素质都具有重要意义。因此, 该机在广西和国内开设的工科专业均有应用前景。

参考文献:

- [1] [苏] J.I.M. 什科利尼克. 疲劳试验方法手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [2] [美] S.R. 斯旺森. 疲劳试验[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [3] 黄长艺. 机械工程测量与试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 邱新桥. 基于微机控制的汽车车轮弯曲疲劳试验机[J]. 机电一体化, 2003, 2.
- [5] 王世英, 耿文祺. 附在车床上的疲劳裂纹装置[J]. 新疆大学学报, 1995, 17(3).

Design of a Simple Fatigue Bending Machine for Plate

ZENG De-liang¹, MAO Han-ying², HUANG Zhen-feng¹, ZHOU Jie¹

(1.School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 53004, China;

2.Department of Automobile Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou Guangxi 542506, China)

Abstract: According to the requirements of fatigue test, the working principle and basic structure of a simple fatigue bending machine for plate are put forward. The loading system of the testing machine uses traditional crank-slider mechanism, and the design for mechanical components and measurement and control system are completed.

Keywords: Testing machine, Bending fatigue, Loading mechanism, Computer control