

# Delta 并联机器人非线性工作空间下轨迹插补算法\*

陈 梅, 石文博

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 为了提高 Delta 并联机器人运动控制精度, 对其工作空间内非线性分布和轨迹插补算法进行了研究。基于仅考虑算法误差前提下, 提出了通过选择 Delta 并联机器人单步插补位置误差最小的精度最优算法。基于机器人运动性能指标下的快速性和精确性, 分析对比机器人传统插补算法和精度最优算法各自性能指标, 最后通过 Matlab 平台仿真测试了算法的可行性, 结果表明精度最优控制算法在整个机器人可达工作空间内都能有效提高机器人运动控制精度, 控制效果要优于传统 PVT 控制方法。

**关键词:** 并联机器人; 工作空间; 轨迹规划; 空间插补; 误差控制

**中图分类号:** TH165; TG659 **文献标识码:** A

## Trajectory Interpolation Algorithm for Delta Parallel Robot in Nonlinear Working Space

CHEN Mei, SHI Wen-bo

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of motion control of Delta parallel robot, the non-linear distribution and path interpolation algorithm in its work space are studied. In only considering error of the algorithm premise, the precision optimal algorithm by choosing minimum error of single step interpolation position of Delta parallel robot is proposed. Based on the rapidity and accuracy under motion performance index of the robot, the performance index of the traditional interpolation algorithm and precision optimal algorithm is analyzed and compared. Finally, the feasibility of the algorithm is tested through Matlab simulation platform, and the results show that the precision optimal control algorithm can effectively improve the precision of the robot motion control in the whole work space where the robot can arrive and its control effect is better than traditional method of PVT control.

**Key words:** parallel robot; working space; trajectory planning; spatial interpolation; error control

## 0 引言

自从柔性自动化生产线得到大规模应用, 并联机器人以其快速性、稳定性和准确性被广泛应用于分拣、包装、抓取、装配等领域。并联机器人由动平台、静平台、主动臂、从动臂构成, 其运动特点是每个手臂由独立驱动器输入, 最终又因共同约束而得到唯一输出, 具有刚度大、承载能力强、精度高、自重负荷比小及动力性能稳定等一系列优点。由于传统 Delta 并联机器人空间插补算法, 在快速性和精度上都没有达到系统可实现的最高性能指标, 在针对 Delta 这种非线性强耦合机构时, 传统插补算法很难实现高精度和快速性要求。分析 Delta 并联机器人单步插补运动状态, 通过不同的插补策略, 在精度控制和快速性控制上都可有相应改善。

## 1 Delta 并联机器人介绍

### 1.1 并联机器人运动学

Delta 并联机器人结构如图 1 所示, 通过三根摆杆(主动臂)的上下摆动, 实现动平台末端位置的控制。

Delta 并联机器人运动学求解分为正解和反解两个部分, 一般采用解析法<sup>[1-2]</sup>或几何法<sup>[3]</sup>。



图 1 并联机器人结构

### 1.2 Delta 并联机器人非线性分析

根据表 1 机器人参数, 对并联机器人进行建模仿真, 由公式 (1) 可以得出三个电机输入角度 ( $\theta_1$   $\theta_2$   $\theta_3$ ) 与动平台末端位置 ( $x$   $y$   $z$ ) 之间的关系是非线性的。通过 Matlab 仿真得到其动平台工作空间如图 2 所示, 实际工作中因为可达空间边缘的非

收稿日期: 2016 - 03 - 07; 修回日期: 2016 - 05 - 15

\* 基金项目: 合肥工业大学产学研校企合作资助项目 (12 - 069k; 13 - 040k)

作者简介: 陈梅 (1963—), 女, 合肥人, 合肥工业大学副教授, 研究方向为运动控制, (E-mail) zdhchen@126.com; 通讯作者: 石文博 (1991—), 男, 安徽宿松人, 合肥工业大学硕士研究生, 研究方向为运动控制, (E-mail) hfut\_swb@mail.hfut.edu.cn。

线性分布<sup>[4]</sup>,如图3所示,由于传统控制算法下,Z轴方向上随着下降深度变大,单步脉冲下动平台运动距离变大,为便于时间插补控制的精度,选取变化较为平缓的中央区域为工作空间,从而导致并联机器人工作空间为可达空间内部变化平缓的圆柱形区域。

表1 Delta 并联机器人参数

参数	动平台半径 $r(\text{mm})$	静平台半径 $R(\text{mm})$	主动臂长度 $L1(\text{mm})$	从动臂长度 $L2(\text{mm})$
尺寸	60	230	420	800

$$\begin{cases} [x - (R + l_1 \cos \theta_1 - r)]^2 + y^2 + [z - l_1 \sin \theta_1]^2 = l_2^2 \\ \left[ x + \frac{1}{2}(R + l_1 \cos \theta_2 - r) \right]^2 + \left[ y - \frac{\sqrt{3}}{2}(R + l_1 \cos \theta_2 - r) \right]^2 + [z - l_1 \sin \theta_2]^2 = l_2^2 \\ \left[ x + \frac{1}{2}(R + l_1 \cos \theta_3 - r) \right]^2 + \left[ y + \frac{\sqrt{3}}{2}(R + l_1 \cos \theta_3 - r) \right]^2 + [z - l_1 \sin \theta_3]^2 = l_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

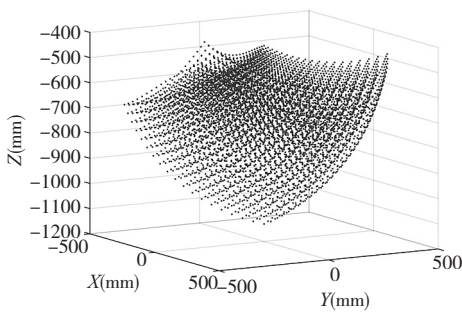


图2 并联机器人工作空间

## 2 传统算法

### 2.1 传统空间插补

传统空间插补方法一般适用于线性非耦合系统,如直角坐标系机械手,其xyz三轴为独立控制,其插补过程如下:①直线插补:以点现在所处位置建立空间坐标系,  $|x| = |y| = |z|$  将空间划分为6个正四棱锥形区域,分别为x正向、x负向、y正向、y负向、z正向、z负向。判断目标点位于这6个区域中的哪个区域而决定下一步的前进方向。②圆弧插补:一般将空间圆弧投影到xoy和xoz平面,进行平面圆弧插补,通过判断该点在圆外、圆上还是圆内来控制下一步走向。针对Delta 并联机器人因为三个驱动电机是协同控制的,且其运动也不是单一xyz轴向运动,因此传统插补算法不适用耦合非线性系统。

### 2.2 Delta 并联机器人传统路径规划

现阶段,并联机器人路径规划一般采用PVT(位置速度时间)控制方式<sup>[5-6]</sup>,以空间直线插补为例,从空间中 $A_s$ 点运动到 $A_e$ 点,根据控制所需精度将直线 $l_{A_s-A_e}$ 按速度控制分为若干小段,如图3中实线上圆点所示,通过并联机器人反解分别求出 $A_s, A_1, A_2, \dots, A_i, A_{i+1}, \dots, A_e$ 位置时三个电机的控制角度,计算每次角度变化。通过对驱动电机输入相应变化角度,控制动平台从 $A_s$ 点运动到 $A_1 \dots A_i$ 点,最后运动到 $A_e$ 点。而实际反解得到的电机角度受制于电机的控制精度,实际控制效果如图3中虚线所示,电机角度变化如图4所示。由于Delta 并联机器人工作空间内可达到的点的非线性分

布,越处于空间边缘处其可控精度越低,如图3所示,A、B、C三个区域最高控制精度是不同的,因此现有的PVT插补精度理应是实时变化的,否则无法达到整套系统的最高可控精度。

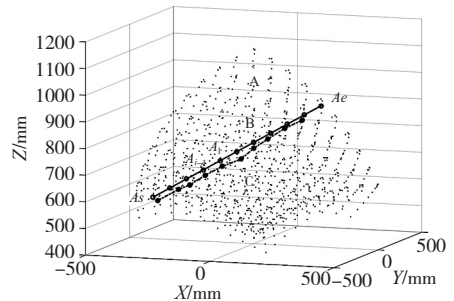


图3 并联机器人控制精度非线性分布

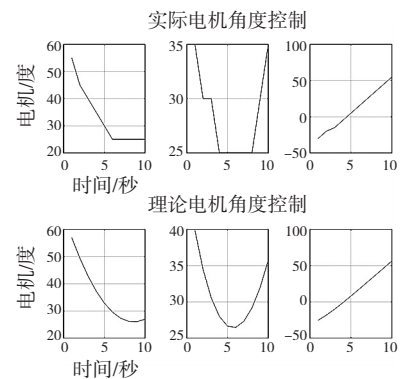


图4 并联机器人传统算法电机角度控制

## 3 单步精度最优控制算法

并联机器人由三个电机控制,每一时刻单个电机可有三种状态(正转、停止、反转),对整个机器人而言每一时刻都有27种状态,单步运行下有27种运动方向,分别运动到空间中的不同位置,当三个电机都是停止状态时,机器人末端位置则不会变化,该状态称为机器人停止态。如图5所示为并联机器人单步控制下从同一位置出发,下一时刻可到达位置,经分析对比,并联机器人单步27态图在空间不同位置会发生不同程度畸变,即27态图是不固定的。

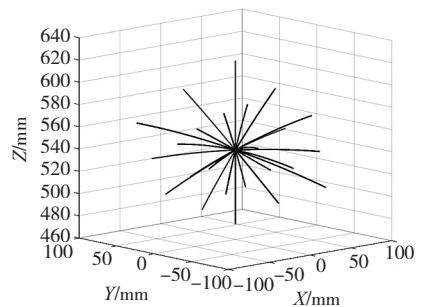


图5 并联机器人单步27态图

### 3.1 单步最优控制

单步最优控制为预测机器人下一步可达的27种位置,在27种结果中选取最合适的的作为最优策略,有时间最优策略<sup>[7]</sup>,能量最优策略<sup>[8]</sup>,本文主要采取位置最优控制,其中判断27种策略的优劣性在该算法中至关重要。

单步最优控制流程图如图6所示,首先更新机器

人末端位置,以该位置为中心,预测出下一步 27 种可能到达的位置,通过计算每一种可能性下的位置误差,选取位置误差最小的一组作为机器人下一步的执行策略,然后重新更新机器人位置,直到到达终点。

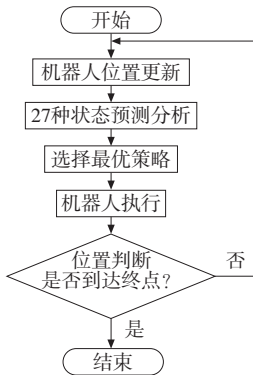


图 6 单步预测控制算法流程图

为衡量不同位置状态下误差的大小,需对衡量标准作出如下两条定义:

定义一:点到直线的距离为过该点作垂直于直线的垂线,点到垂足的距离记为点到直线的距离,如图 7 中  $d_{line}$  所示。

定义二:点到圆弧的距离为该点到连接该点与圆心的直线在圆面上的投影与圆弧的交点的距离,如图 7 中  $d_{circle}$  所示。

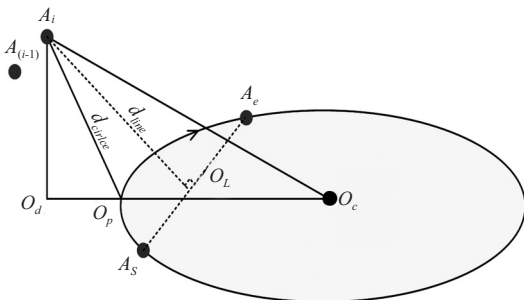


图 7 空间点到直线、圆弧距离

位置精度最优控制策略:分别计算下一时刻可能到达的 27 个  $A_i$  点(不包含静止不动点)的  $d_{line}$  和运动方向  $d_{direction}$ ,选取  $d_{direction} > 0$  且  $d_{line}^2$  最小的点为最优控制点,控制三个驱动电机单步运动到该点处再进行新一轮单步预测控制。 $d_{A_i-O_c}^2$  选取最小值保证了运动曲线最大程度逼近所期望的曲线,  $d_{direction} > 0$  保证每次都向终点靠近。

### 3.2 速度控制

无论是单步最优控制策略还是混合控制策略,它们都是位置速度独立控制策略,优先进行位置精度控制,在位置精度达到期望的前提下进行速度控制,一般应用于脉冲与频率协同控制方式的电机。脉冲个数决定电机运动量,脉冲频率决定电机运动速度。由单步预测位置控制模式可以得到各电机的脉冲序列,通过控制脉冲频率实现电机输出转速的控制。以空间直线运动为例,从空间起点运动到终点,若要求机构按照 S 型曲线<sup>[9]</sup>先加速后减速运动到终点,此时需要按期望设定频率时间变化曲线。由于位置与速度分离控制,

在位置控制完成的基础上速度控制便更为简单,只需要设计合理的速度控制曲线即可使得系统运动更加平稳。如文献[9]中提出的 S 型加减速七段设计方法,在现阶段机器人速度控制<sup>[10]</sup>中广泛应用。

## 4 控制效果分析对比

$$\text{以整条路径中的平均位置误差 } \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d(i)|$$

作为精度控制指标,机器人机械参数如表 1 所示。其中主动臂单步最小摆动角度为  $0.1^\circ$ ,仿真求得系统最大位置误差为  $0.97\text{mm}$ 。不同区域各插补算法运动指标结果对比如表 2 所示,空间直线插补轨迹效果如图 8 所示,虚线为传统控制,点划线为 PVT 控制,实线为精度最优控制。空间圆弧运动轨迹效果如图 9 所示,散点线为 PVT 控制效果,折线为精度最优控制效果,蓝实线为理想期望轨迹,其中精度最优控制电机角度变化如图 10 所示。

表 2 运动指标结果对比

轨迹	控制方式	平均位置误差(mm)
A 区直线插补 起点:(0,0,700) 终点:(100,100,750)	PVT 控制	0.73
	精度最优控制	0.42
B 区直线插补 起点:(0,0,700) 终点:(100,100,750)	PVT 控制	0.54
	精度最优控制	0.36
C 区直线插补 起点:(300,300,700) 终点:(300,300,750)	PVT 控制	0.83
	精度最优控制	0.59
圆弧插补 起点:(0,0,700) 终点:(0,100,800) 圆心:(100,0,800) 方向:顺时针圆弧	PVT 控制	0.57
	精度最优控制	0.39

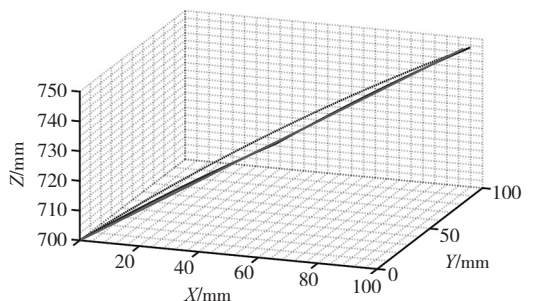


图 8 空间直线插补

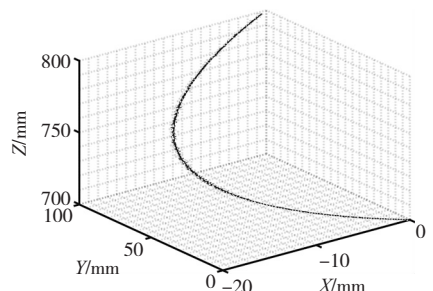


图 9 空间圆弧插补



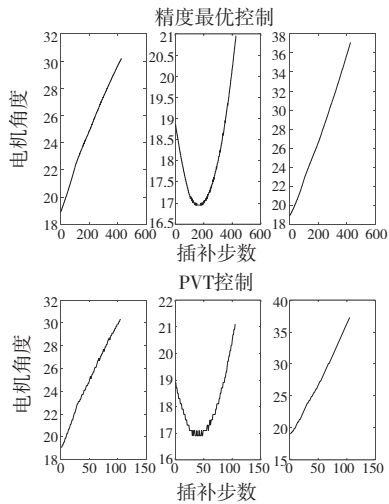


图10 空间圆弧插补电机角度变化

## 5 结论

针对并联机器人耦合非线性特点,虽然传统 PVT 控制可以满足系统精度要求,但因为机器人工作空间的非线性分布,PVT 控制精度存在大幅度波动,在非线性波动较为平缓的 B 区 PVT 控制可以取得较高的控制精度,但在 A 区和 C 区 PVT 控制精度时刻变化且精度不高。相比之下,单步位置精度最优控制可有效控制轨迹运动误差,在整个工作空间下都能完成高精度控制。

### [参考文献]

[1] 郭超. 高速并联机器人及其控制系统研究[D]. 淄博: 山

东理工大学,2014.

- [2] Mustafa M, Misuari R, Daniyal H. Forward kinematics of 3 degree of freedom Delta robot[C]// Research and Development, 2007. SCOREd 2007. 5th Student Conference on. IEEE, 2008:1-4.
- [3] 蔡汉明, 马恒印, 段萌. Delta 并联机器人运动空间的几何作图求解[J]. 装备制造技术,2013(5):31-32.
- [4] Nabat V, Company O. Par4: Very high speed parallel robot for pick-and-place[C]// Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2005:553-558.
- [5] 雷奶华, 赵新华, 杨玉维. 3-RRRT 并联机器人插补算法及其误差分析[J]. 天津理工大学学报,2005,21(1):50-53.
- [6] 刘凉. 3-RRRT 并联机器人运动学控制的研究[D]. 天津: 天津理工大学,2010.
- [7] Gasparetto A, Zanotto V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory,2007,42(4):455-471.
- [8] 殷国亮, 白瑞林, 王永佳, 等. 一种并联机器人的时间最优轨迹规划方法[J]. 计算机工程,2015,41(10):192-198.
- [9] 刘鹏飞, 杨孟兴, 宋科, 等. 'S' 型加减速曲线在机器人轨迹插补算法中的应用研究[J]. 制造业自动化,2012,34(10):4-11.
- [10] 黄海忠. DELTA 并联机器人结构参数优化与运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2013.

(编辑 李秀敏)

(上接第 73 页)

## 5 结论

(1) 基于 hyperMILL 数控编程软件,利用叶轮加工模块对半开式整体叶轮进行数控编程。将整体叶轮的加工分为毛坯面预加工、叶轮粗加工、半精加工和精加工四个加工阶段,每一阶段包含对不同曲面的加工。其中叶轮粗加工分为两次加工完成,既避免了过切或欠切,又提高了粗加工效率。

(2) 生成的刀具路径经过内部机床仿真验证后,利用特定后处理器得到相应的 NC 加工代码。

(3) 在 DMU-70V 五轴加工中心上对 Al7050 铝合金叶轮进行了加工,整个加工过程经过一次装夹完成,避免了多次装夹造成的加工误差。加工过程平稳,加工完成的叶轮没有出现过切、欠切等现象。研究结果对整体叶轮等复杂零件的编程加工具有一定的意义。

### [参考文献]

- [1] 陈亮, 蔡安江, 杨冰. 整体叶轮五轴加工 NC 程序的自动生成及优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(10):141-144.
- [2] 姜海鹏, 孙萌. 利用 Unigraphics 软件实现 MAHO DMU 70V 数控机床模拟仿真[J]. 机械研究与应用, 2008, 21(2):104-105.
- [3] 郑才国, 郑菲, 唐克岩, 等. 整体叶轮数控加工工艺的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11):117-119.
- [4] 秦录芳, 孙鹤, 时四强, 等. 基于 UG 的整体叶轮数控加

工仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11):98-102.

- [5] Huang J C, Liu X L, Jia D K, et al. The Impeller Five-Axis NC Machining Simulation Based on UG NX 7.5[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2011, 188:689-692.
- [6] Young H T, Chuang L C. An Integrated Machining Approach for a Centrifugal Impeller[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(8):556-563.
- [7] Youn J W, Jun Y, Park S. Interference-free tool path generation in five-axis machining of a marine propeller[J]. International journal of production research, 2003, 41(18):4383-4402.
- [8] 任涛. 整体叶轮的五轴数控编程与加工[J]. Cad/cam 与制造业信息化, 2009(1):122-125.
- [9] 张文祥, 韩江. 基于 HyperMILL 的整体叶轮五轴数控加工[J]. 制造技术与机床, 2012(6):125-128.
- [10] 张云玲. 基于 HYPERMILL 叶轮模具母轮加工方法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(5):34-35.
- [11] Chu C H, Huang W N, Li Y W. An integrated framework of tool path planning in 5-axis machining of centrifugal impeller with split blades[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2010, 23(3):1-12.
- [12] 陈章伟, 曲鹏文. 开闭式叶轮加工专业解决方案 hyperMILL[J]. Cad/cam 与制造业信息化, 2010(4):37-40.
- [13] 梁蔓安, 唐清春, 黎家宏. 基于 UG 的五轴联动机床后置处理器研究与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(6):17-19.

(编辑 李秀敏)