

四自由度机器人 Matlab 仿真实例

冯飞^a,张洛平^b,张波^b

(河南科技大学 a.国防生办公室;b.机电工程学院,河南 洛阳 471003)

摘要:以一个四自由度机器人为例,图示了关节坐标系的设置,建立了机器人的运动学参数和关节的变换矩阵,并通过两个 Matlab 示例程序介绍了仿真程序的编写方法。最后通过实际仿真应用,探讨了利用 Matlab 软件完成绘制四自由度机器人的三维运动轨迹,并且通过动画来进行仿真研究的方法,最终通过机器人在笛卡尔空间做直线轨迹运动的截图展示了仿真运行的效果。研究表明,利用 Matlab 进行软件仿真能够大大地缩短机器人的开发周期,具有非常高的经济效益。

关键词:机器人;笛卡尔空间;轨迹规划;仿真

中图分类号:TP242.2

文献标识码:A

0 前言

Matlab 是一种可视化的具有极为强大矩阵计算能力的编程语言,它包含有上百个预先定义好的命令和函数,这些函数能通过用户自定义函数进一步扩展。Matlab 除具有强大的矩阵运算能力外,同时还拥有着较强的二维、三维绘图能力。它还提供了编程接口,能与其他编程语言结合起来使用。例如,利用 Matlab 计算出的矩阵数据可通过接口传递给 C++ 来提高程序开发的便利性。

因此 Matlab 非常适合在工业研究和产品开发、数学(特别是线性代数)教学、在数值分析和科学计算方面的教学与研究、电子学、控制理论和物理学等工程及科学学科方面的教学与研究等领域里解决各种问题,是一个十分有效的工具。

1 运动学分析

下面通过一个具有四个转动自由度(4R)的机器人仿真设计实例,实现在机器人的设计过程中,借助 Matlab 强大的矩阵计算和三维绘图功能,完成轨迹规划、结构和运动仿真等的计算和动画模拟任务,能够极大地提高设计的实效。

图 1 所示的具有四个自由度的工业机器人,其 D-H 参数^[1]见表 1,根据坐标系 {i} 相对于坐标系 {i-1} 变换的一般表达式^[2]:

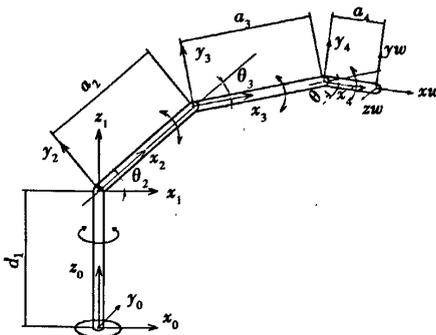


图 1 机器人关节坐标系示意图

表 1 机器人各关节的 D-H 参数

连杆 i	轴转角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	连杆长度 a_{i-1}	连杆偏距 d_i	关节角 $\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	d_1	θ_1
2	90	0	0	θ_2
3	0	a_2	0	θ_3
4	0	a_3	0	θ_4

基金项目:河南科技大学科研基金项目(2003QN04)

作者简介:冯飞(1974-),男,山东济宁人,工程师;张洛平(1955-),男,河南洛阳人,教授,硕士生导师,主要从事数控系统、计算机辅助制造技术、机械结构设计等方向的研究与开发。

收稿日期:2007-11-28

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可得出各关节的变换矩阵

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设各杆长度对应的参数为 $d_1 = 0.2, a_2 = 0.2, a_3 = 0.2, a_4 = 0.1$ (单位:米), 则据公式 $t = t_1 t_2 t_3 t_4 t_5$ 可求出腕部相对于基座的变换矩阵^[3], 根据机器人各关节角度的变化可由 Matlab 实时地计算出任意时刻腕部的笛卡尔坐标, 并利用 Matlab 的三维绘图功能将其运动轨迹以动画的形式仿真出来。

2 Matlab 仿真例程分析^[4]

例程(1): 在三维空间画出腕部的运动轨迹。

```
for i = 1:n % 利用 n 次 for 循环依次读取已知的 n 组 x,y,z 坐标值;
plot3(x(i),y(i),z(i),'o') % 将读取的坐标值用三维绘图函数画出由小圆圈构成的轨迹曲线;
grid on; % 显示三维图形中的网格以增强显示效果;
end;% 循环结束。
```

例程(2): 利用 Robot 工具箱^[5]中的 Plotbot 函数绘制三维运动仿真动画。

% 下面的 link 函数中参数依次为 D-H 的“alpha, A, theta, D, sigma”, mod 指采用 Craig% 标记法

```
L{1} = link([0 0 0 0.2 0], 'mod');
L{2} = link([pi/2 0 0 0 0], 'mod');
L{3} = link([0 0.2 0 0 0], 'mod');
L{4} = link([0 0.2 0 0 0], 'mod');
L{5} = link([0 0.1 0 0 0], 'mod');
```

my4r = robot(L, 'Name', 'Manufacturer', 'Comment'); % 将以上参数赋予 robot 函数

q1 = linspace(0, 3.14, n); % 生成一组关节角 1 变化的数值向量

q2 = linspace(0, 1.57, n); % 生成一组关节角 2 变化的数值向量

q3 = linspace(0, 1.50, n); % 生成一组关节角 2 变化的数值向量

q4 = linspace(0, 1.50, n); % 生成一组关节角 2 变化的数值向量

q = [q1;q2;q3;q4]; % 将四个关节角插值构成的行向量组成关节角取值矩阵, 注意在绘制仿真动画时应将该矩阵转置后输出给 Plotbot 函数。

plotbot(my4r, q); % 根据所定义的结构和给定的关节角矩阵绘制仿真动画。

下图中是分别用 Matlab 根据不同的路径绘制出的三维运动轨迹图 (见图 2) 和机器人仿真动画截图 (见图 3)。

3 在笛卡尔空间路径规划中的仿真应用

轨迹规划, 是指根据作业任务要求, 关于末端执行器在工作流程中位姿变化的路径、取向及其变化

速度和加速度的人为设定,它是运动学反解(位姿反解,速度、加速度反解)的实际应用^[6]。

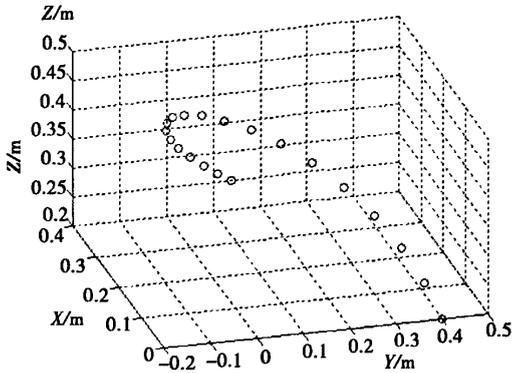


图2 根据规划的路径绘制出的腕部3D轨迹图

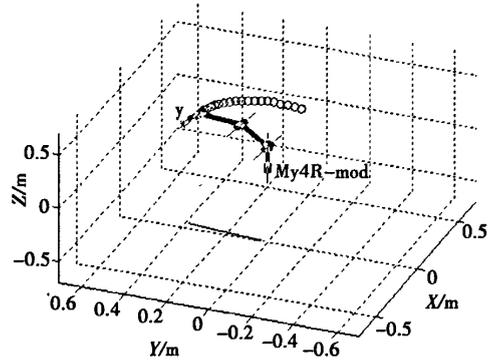


图3 在简单路径规划下机器人运动的仿真动画截图

将通过依照轨迹规划要求^[7]按照一定的轨迹规划方法^[8]编写的计算程序(或称路径生成器)逆向解出的一系列关节空间各个关节的轨迹数据传给 Matlab 的三维绘图程序,就可以绘制出机器人按照规定轨迹运行的动画和轨迹来,如图4所示。

图中绘出了一个四自由度机器人沿着指定的轨迹起点、两个中间点和轨迹终点组成的三段直线段进行笛卡尔空间折线轨迹运动的情况,在仿真动画运行的过程中能够直观地看到机器人的腕关节准确地走过了由许多小圆圈组成的连续轨迹上的各个轨迹点,完全符合了轨迹规划设计的要求。

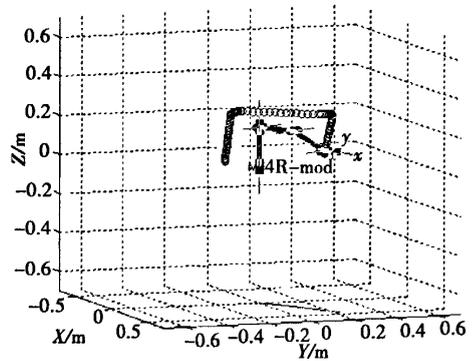


图4 笛卡尔空间直线路径规划下机器人仿真动画截图

4 结论

通过 Matlab 仿真应用的研究,可以看出借助 Matlab 软件进行机器人的运动学仿真,能够在计算机上验证机器人能否准确按照期望轨迹运动,达到求出运动空间,评估是否满足工作需要目的^[9]。而不必制造出实机再采用非常复杂的测量方法来进行验证,这样能够极大地减少产品开发成本,缩短了机器人的开发周期,具有非常高的现实意义。

参考文献:

[1] John J,Craig. 机器人学导论[M]. 负超,译.北京.机械工业出版社,2006.

[2] 罗家佳,胡国清.基于 MATLAB 的机器人运动仿真研究[J].厦门大学学报,2005,44(5):640-644.

[3] 王仲民,蔡霞,崔世钢.一种四自由度机器人的运动学建模[J].天津职业技术师范学院学报,2003,13(4):1-4.

[4] Matlab The Language of Technical Computing, Version 6[Z]. The MathWorks Inc,2002-06-21.

[5] Peter I Corke. Manual of Robotics TOOLBOX for MATLAB(Release 6)[EB]. <http://www.cat.csiro.au/cmst/staff/pic/robot.html>,2001-02-11.

[6] 韩军,郝立.机器人关节空间的轨迹规划及仿真[J].南京理工大学学报,2002,24(6):540-543.

[7] 王仲民,崔世钢,岳宏.机器人关节空间的轨迹规划研究[J].机床与液压,2005(2):63-64.

[8] 陶其铭,柯尊忠.机器人轨迹规划新方法的研究[J].机床与液压,2003(4):224-225.

[9] 任桂华,杨春杰.4R机器人的运动分析及仿真[J].湖北工业大学学报,2005,20(5):28-30.

四自由度机器人Matlab仿真实例

作者: [冯飞](#), [张洛平](#), [张波](#), [FENG Fei](#), [ZHANG Luo-Ping](#), [ZHANG Bo](#)
 作者单位: [冯飞, FENG Fei \(河南科技大学, 国防生办公室, 河南, 洛阳, 471003\)](#), [张洛平, 张波, ZHANG Luo-Ping, ZHANG Bo \(河南科技大学, 机电工程学院, 河南, 洛阳, 471003\)](#)
 刊名: [河南科技大学学报 \(自然科学版\)](#) **ISTIC** **PKU**
 英文刊名: [JOURNAL OF HENAN UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY \(NATURAL SCIENCE\)](#)
 年, 卷(期): 2008, 29(3)
 被引用次数: 0次

参考文献(9条)

1. John J. Craig, [负超](#) [机器人学导论](#) 2006
2. 罗家佳, [胡国清](#) [基于 MATLAB 的机器人运动仿真研究](#)[期刊论文]-[厦门大学学报](#) 2005(05)
3. 王仲民, [蔡霞](#), [崔世钢](#) [一种四自由度机器人的运动学建模](#)[期刊论文]-[天津职业技术师范学院学报](#) 2003(04)
4. Matlab The Language of Technical Computing, Version 6 2002
5. Peter I Corke [Manual of Robotics TOOLBOX for MATLAB \(Release 6\)](#) 2001
6. 韩军, [郝立](#) [机器人关节空间的轨迹规划及仿真](#)[期刊论文]-[南京理工大学学报](#) 2002(06)
7. 王仲民, [崔世钢](#), [岳宏](#) [机器人关节空间的轨迹规划研究](#)[期刊论文]-[机床与液压](#) 2005(02)
8. 陶其铭, [柯尊忠](#) [机器人轨迹规划新方法的研究](#)[期刊论文]-[机床与液压](#) 2003(04)
9. 任桂华, [杨春杰](#) [4R机器人的运动分析及仿真](#)[期刊论文]-[湖北工业大学学报](#) 2005(05)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [潘军](#), [姜力](#), [PAN Jun](#), [JIANG Li](#) [一种基于交叉耦合控制的串联机器人笛卡尔空间轨迹跟踪方法](#) -[机械与电子](#)2010(10)

针对串联机器人在笛卡尔空间轨迹跟踪问题, 将交叉耦合策略和机器人运动学结合起来, 设计了机器人在笛卡尔空间位置控制中耦合误差的一般性构建方法, 进而提出了一种新型脱离动力学模型的控制算法, 该算法不仅能保证单个关节的运动稳定, 同时还可以保证所有的关节运动协调, 使位置误差和耦合误差都收敛到零. 最后, 设计了基于HIT/DLR灵巧手笛卡尔空间位置控制实验, 验证了该方法的有效性.

2. 期刊论文 [于清波](#), [YU Qing-bo](#) [笛卡尔空间-五自由度机器人手臂自由度分析](#) -[煤矿机械](#)2009, 30(9)

以六自由度机器人手臂理论为基础, 分析了一种五自由度机器人手臂在笛卡尔坐标系下臂形与自由度的关系, 通过机器人手臂逆解算法, 结合空间几何理论, 得出了五自由度机器人手臂在笛卡尔坐标系下缺失自由度与关节坐标的关系, 建立Matlab仿真环境, 验证了结论的正确性.

3. 学位论文 [马保离](#) [非完整机器人系统的控制](#) 1997

1、针对非完整链式系统, 利用动态扩展反馈线性化技术设计了轨迹跟踪控制器. 证明了当系统的初始值及期望轨线满足一定的条件时, 通过选择适当的输出变量和适当的动态反馈可将非完整链式系统完全线性化, 从而可设计线性控制器跟踪期望的运动轨迹. 为避免反馈控制器的奇异点, 研究人员还讨论了反馈解耦阵的奇异问题, 给出了为避免反馈解耦阵的奇异点系统的初始跟踪误差和期望轨线所应满足的条件. 2、针对非完整链式系统, 给出了一种几何路径规划新算法. 该方法直接规划几何路径且不存在控制奇异问题. 另外, 利用该方法还可很容易地考虑有障碍物环境下的路径规划问题. 仿真结果证实了该算法的有效性. 3、针对二阶完整机器人系统, 给出了系统的动力学和控制理论框架, 讨论了系统中存在的二阶非完整约束的性质以及系统可达性和可镇定性的条件. 4、研究了含有欠驱动自由运动关节的多杆机器人系统跟踪手端笛卡尔空间运动轨迹时的控制问题. 首先讨论了欠驱动机器人系统的运动学和动力学, 得到了系统的广义雅可比阵及由手端笛卡尔空间轨迹计算主动关节角速度和主动关节控制力矩的算法. 研究了如何规划手端的笛卡尔空间轨迹以避免动态奇异点的方法. 该算法可保证手端的位置跟踪误差为零, 并给出了相应的仿真结果.

4. 期刊论文 [王卫忠](#), [赵杰](#), [高永生](#), [蔡鹤皋](#), [WANG Wei-zhong](#), [ZHAO Jie](#), [GAO Yong-sheng](#), [CAI He-gao](#) [机器人的平面曲线轨迹规划方法](#) -[哈尔滨工业大学学报](#)2008, 40(3)

提出了一种满足笛卡尔空间与关节空间混合约束的机器人平面曲线轨迹规划方法. 在笛卡尔空间讨论了控制节点的选取, 节点间运动时间的分配, 以及规划轨迹与要求轨迹的位置偏差和姿态偏差的估计方法; 在关节空间讨论了三次样条函数插值及满足关节速度、加速度及力矩约束的方法. 根据规划轨迹与要求轨迹偏离情况, 非均匀地插入控制节点. 通过增加有限的控制节点, 有效地控制偏差, 减少计算量. 给出了完整的平面曲线轨迹规划算法. 仿真实例验证了算法的有效性和可行性.

5. 学位论文 [安刚](#) [面向机器人作业的笛卡尔空间路径可实现性在线判定与补偿方法的研究](#) 2000

先进机器人的应用中, 任务空间的路径有时是根据变化着的环境动态产生的, 不允许预先示教和“试错”, 是否有能力跟踪目标路径需要在线自动完成判断; 不仅如此, 有时还需要对不能跟踪的路径做进一步的分析, 并向操作人员或控制系统的其他环节提供如何改进作业方式的建议, 以便及时调整, 进而完成给定的作业. 该文就上述应用中产生的要求进行了分析, 提出了面向作业的路径可实现性的概念, 研究并提出了解决这一问题的方法. 该文将重点放在运动学方面, 研究了机器人作业时笛卡尔路径在运动学意义上的可实现性在线判定和补偿的方法. 在运动学意义上, 机器人的可达性、奇异性和可操作性决定了机器人对于给定路径的跟踪能力. 该文首先根据判定与补偿的需要对这三种工作特性的描述方法进行了研究. 在上面工作的基础上确立了路径可实现性判据. 在给出一般情形下补偿方法的基础上, 进一步讨论了直线运动下位置和姿态不可实现时的补偿方法. 通过PUMA560机器人涂胶作业对提出了判定与补偿方法进行了实现验证.

6. 学位论文 [张红强](#) [工业机器人时间最优轨迹规划](#) 2004

在工业机器人的实际应用中, 工作效率和质量是衡量机器人性能的重要指标, 提高工业机器人的工作效率, 减小实际操作中的误差成为工业机器人应用亟需解决的关键性问题. 机器人的时间最优轨迹规划是指以时间最短作为性能指标并在满足各种约束的条件下优化机器人的运动轨迹, 使机器人手部在两

点之间或沿着规定轨迹运动的时间最短,进行这项研究的实际意义在于提高工业机器人的工作效率。首先,该文对机器人的定义及其发展前景作了介绍,对机器人技术的发展状况、应用及技术要求进行了论述,概述了机器人运动学与动力学以及时间最优轨迹规划,全面地总结了国内外有关机器人时间最优轨迹规划方面的研究成果,综述了混沌优化的研究进展并对其进行了展望。其次,分析了机器人轨迹规划的一般性问题,在关节空间的轨迹规划针对不同的条件分别详述了三次多项式函数插值、高阶多项式插值和抛物线连接的线性函数插值;在笛卡尔空间的轨迹规划则深入讨论了线性函数插值和圆弧插值,然后对笛卡尔空间与关节空间轨迹规划的优缺点进行了比较。深入研究了机器人时间最优轨迹规划的基本原理,讨论了混沌优化原理及B样条曲线的计算方法,采用B样条曲线构造机器人的轨迹,提出了一种基于改进混沌优化算法的机器人时间最优轨迹设计方法,优化时考虑了包括关节角速度、角加速度、角加加速度及力矩4种约束,并在关节空间与笛卡尔空间对PUMA560前三铰轨迹(此时还需加上笛卡尔空间路径约束)进行了优化计算。最后,简单介绍了PUMA560的系统结构,并针对湖南大学智能自动化技术实验室PUMA560控制系统结构封闭的缺陷,提出了一种硬、软件的改造方案;通过优化计算示教操作PUMA560机器人所得到的笛卡尔空间路径得到了最短时间轨迹,从而实现了工业机器人时间最优轨迹的规划。该文在PUMA560的硬件改造方面详细介绍了PMAC位置控制器,给出了反馈信号的隔直、抽取与调整方法、运动控制信号的加入接线图和PUMA560、PMAC控制器结构原理图;软件方面探讨了模块化组成结构,详细讨论了实时控制模块的实现方法。

7. 学位论文 [陈雪华 四自由度写字机器人的基础研究](#) 2005

机器人技术是当今高技术研究的一个重要方向,普遍受到各国政府的关注。随着机器人应用在广度和深度上的发展,迫切需要解决其产业化前期的基础技术研究。本文在学习研究了现有机器人技术基础上,以我们设计的四自由度写字机器人为例,针对工业机器人的运动控制系统关键技术,如运动学方程的正解、运动学方程的逆解、工作空间分析、运动轨迹规划,作了较深入的研究。本文的研究内容包括以下六章:

1. 介绍机器人运动学分析、工作空间分析和轨迹规划的现状和发展趋势,提出了本文的研究内容。
2. 本文总结分析了现有机器人关节的传动机构,对我们提出的新型关节,从结构合理性和零件工艺性上进行了改进,讨论了特殊零件的加工工艺,并用其中的两种关节组成了一台四自由度的垂直多关节型写字机器人。
3. 在机器人学的理论上,建立了机器人模型的D-H坐标系,并对相邻坐标系间的变换矩阵作了改进,使D-H方法更具有通用性。根据变换方程推导出一组简单实用的方程来实现运动学方程的正解,运动学逆解较为复杂,因为它实质上是解一个非线性方程的问题,目前尚没有通用的解法,本文采用代数法来求解运动学方程的逆解,并在数学软件matlab里编程验证了改进后的D-H方法的正确性。
4. 机器人工作空间是从几何方面讨论机器人的工作性能,工作空间的大小、奇异位形和灵活性分别反映了机器人位姿输出空间运动学性能的不同侧面。本文借助图解法作出了实际工作空间的轴截面,提出一种以旋转变换理论和极值理论为基础的新方法求解定向空间,即机器人灵活性分析,并分析了各连杆长度对它们的影响。
5. 机器人轨迹规划在机器人的控制中具有重要的地位。本论文根据机器人轨迹规划的要求和约束,在笛卡尔空间用误差极值法求解中间点,用运动学逆解将这些中间点映射到关节空间,在关节空间用多项式插值,求取控制点,这种规划方法综合了笛卡尔空间轨迹规划和关节空间轨迹规划的优点,满足实时性和精确性的要求。
6. 总结了本文取得的主要研究成果。

8. 期刊论文 [王健强,程汀, WANG Jian-qiang, CHENG Ting SCARA机器人结构设计及轨迹规划算法](#) -[合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2008, 31(7)

文章基于模块化设计方法设计一种SCARA机器人,具有3个旋转自由度和1个移动自由度,可实现水平和垂直运动,其结构简单、体积小、质量轻、动作迅速、刚性好及定位精度高,可应用于生产和教学;基于机器人在关节空间和笛卡尔空间轨迹规划方法的不同,分别讨论了该SCARA机器人在关节空间中的点到点轨迹规划算法,和在笛卡尔空间中的一种连续直线轨迹规划插补算法,即基于运动学逆解的脉冲增量法。

9. 学位论文 [赵伟 模块化机器人运动控制系统的研究与设计](#) 2007

随着科技的发展,机器人技术在各个行业得到了日益广泛的应用,控制器作为机器人的核心组成部分是影响其性能的关键部分之一。本文介绍了机器人的定义、组成及应用,阐述了机器人技术的国内外研究现状,针对目前机器人控制器的特点与存在的问题,提出了建立具有开放式结构的模块化机器人控制系统,并详细分析了实现该控制系统所涉及的关键技术。

1. 建立了基于D-H表示法的模块化机器人正、逆运动学模型,推导了基于代数法的逆运动学方程的求解过程,并针对其无解或多解的情况,分析了其可行解和最优解。
2. 分析了三次均匀B样条曲线的构造原理和特点,设计了基于B样条曲线的模块化机器人关节空间轨迹规划算法,给出了基于笛卡尔空间坐标系的模块化机器人轨迹规划算法,比较了笛卡尔空间与关节空间轨迹规划的优缺点。
3. 介绍了基于动态隶属函数的变论域模糊控制算法,为了满足机器人运动控制精确性、实时性以及自适应性的要求,引入了对机器人运动趋势的分析,提出了运动趋势分析型变论域自调整的模糊控制算法。
4. 设计了三级多CPU结构的模块化机器人控制系统。第一级为上位计算机,实现机器人系统管理、协调控制以及人机交互;第二级为区域控制器,主要由DSP(TMS320LF2812)模块、以太网模块、CAN总线模块以及电源模块组成,实现机器人正逆运动学求解、轨迹规划以及与上位机、下位机的通讯;第三级为智能模块,主要由DSP(TMS320LF2407)模块、驱动模块、CAN总线模块、传感模块以及电源模块组成,实现对机器人的运动控制、驱动以及与区域控制器的通讯。

通过Matlab软件,对模块化机器人运动学正、逆解,轨迹规划算法和运动控制算法进行了仿真实验。仿真结果表明:本文所提出的运动控制算法和所设计的轨迹规划算法,具有控制精度高,自适应能力强的特点。

10. 期刊论文 [任敬轶,孙汉旭 一种新颖的笛卡尔空间轨迹规划方法](#) -[机器人](#) 2002, 24(3)

本文通过对螺旋理论和空间样条曲线生成原理的有机结合,提出了一种“虚拟关节”的概念,在此基础上给出了一种新颖的笛卡尔空间的机器人轨迹规划方法。由于这种方法综合了关节空间轨迹规划和笛卡尔空间轨迹规划各自所具有的优点,因此既简单又直观。而且,利用该方法可以很容易地得到一条经过所有控制点并满足所要求边界条件的空间轨迹。为验证其有效性,本文基于一种9自由度模块化机器人平台给出了具体的实验方法和结果。

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_lygxyxb200803007.aspx

授权使用: 洛阳理工学院(lylg), 授权号: 1cb755b2-53e5-4163-92be-9e9f00a0b9d7

下载时间: 2011年3月7日