

基于5R并联堆垛机构的运动学分析与示教再现

李伟, 曹晓彦, 逯江

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:研究了一种基于5R并联堆垛机构的运动轨迹智能控制的设计方法.该方法通过对5R机构控制系统和逆运动学的分析,给定5R机构2个步进电动机的位置,从而确定连杆末端执行件的位姿,通过使每个电动机角度变化之差平方和最小的方法来解决求运动学逆解时唯一的连杆执行件轨迹点并不能确定唯一的2个步进电动机位姿的问题.示教再现方法很好地解决了5R机构的智能控制,可以减少编程工作,提高堆垛工作效率.

关键词:5R并联堆垛机构;智能控制;示教再现;运动学分析

中图分类号:TH11 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.01.015

Kinematics analysis and teaching and playback based on 5R parallel stacking mechanism

LI Wei, CAO Xiao-yan, LU Jiang

(College of Mechanical Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A design method that intelligent control of motion trajectory based on 5R parallel stacking mechanism was investigated. By analysis the control system and the inverse kinematics of the 5R mechanism, it can be concluded when the 5R is given two original moving parts, it can uniquely identify the pose of the rod end of the implementation of parts, in seeking the position and orientation inverse solution with the minimum principle that the square of the residuals between the prime mover rotation angle of adjacent track points, the only connecting rod track can't determine the only two original moving parts. It is a good method to solve the intelligent control of the 5R institutions by teaching and playback method. It can also reduce the programming effort and improve the efficiency of stacking work.

Key words: 5R parallel stacking mechanism; intelligent control; teaching and playback; kinematics analysis

0 引言

作为一种先进的生产工具,机器人已经被广泛应用于多个领域.为了弥补串联机器人的不足,人

们提出了一种新型的具有多运动链结构的机器人——并联机器人.多自由度并联机构自身也存在着一些比较明显的缺点,如工作空间小、灵活度较差等,这限制了它主要适用于高刚度或着高速度而

收稿日期:2012-08-18

基金项目:河南省高校科技创新团队支持计划(2012IRTSTHN013)

作者简介:李伟(1957—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业学院教授,硕士,主要研究方向为轻工机械设备及自动化、机电一体化技术与产品开发.

不需要很大工作空间的领域^[1]. 本文提出一种二自由度并联堆垛机构5R 实验平台, 与其他的并联机械臂相比, 它具有结构简单、运动速度快、工作空间大、电机机壳固定不动、负载驱动能力强、质量轻等优点, 为工件的搬运和堆放提供很大的方便, 具有很好的实用价值^[2].

并联机构运动轨迹的位移、速度与驱动电机的控制量之间存在非线性映射的关系, 这给其智能控制的实现带来困难. 目前, 并联机构的控制方法主要有插补算法和示教再现. 插补算法主要用于精度要求较高的场合(如数控机床), 但该算法运算较繁琐, 编程比较麻烦. 示教还原就是把人为的轨迹记录下来, 去研究它的运动规律, 并且把记录下来的人为的轨迹实现再现, 完成一个多自由度机构学习的方法. 该方法控制运算简单, 且精度能满足多数控制机构的要求. 本文拟对5R 机构的运动学进行分析, 然后通过示教再现的方法来解决5R 机构的智能控制问题.

1 搭建实验平台

控制系统由中央控制系统、检测系统、机械部分、伺服驱动系统等组成. 光电编码器作为检测系统, 伺服驱动系统由步进电动机和步进电机驱动器组成, 机械部分五连杆机构由无缝方管组成. 原动件由安装在操作平台的2根驱动轴驱动, 步进电机、原动件和光电编码器装在一条直线上, 三者同步运行, 转速相等. 5R 实验台整体结构如图1所示.

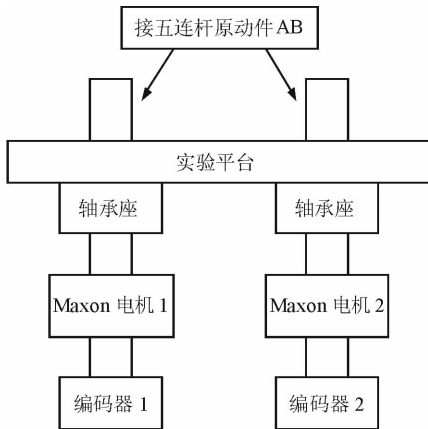


图1 5R 实验台整体结构示意图

2 5R 机构的逆运动学分析

平面五连杆机构的结构示意图如图2所示, AE 为机架杆, 坐标原点建在机架杆的一端A, x 轴的方向

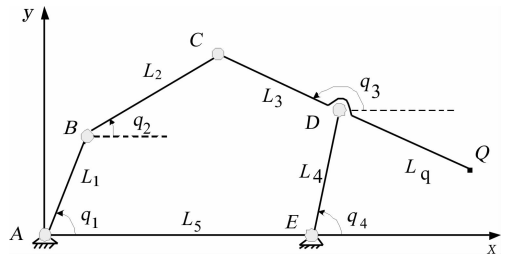


图2 5R 机械部分结构示意图

向沿AE 的方向, y 轴的方向垂直于x 轴. Q 点为堆垛手抓, 实现堆垛机构对物体的抓取与放下, 其坐标设为(x_q, y_q). 由图2所示的各量的方向, 根据复数矢量法可得

$$L_1 e^{iq_1} + L_2 e^{iq_2} = L + L_4 e^{iq_4} + L_3 e^{iq_3}$$

在两坐标轴上分解得

$$\begin{cases} x_c = L_1 \cos q_1 + L_2 \cos q_2 = L + L_4 \cos q_4 + L_3 \cos q_3 \\ y_c = L_1 \sin q_1 + L_2 \sin q_2 = L_4 \sin q_4 + L_3 \sin q_3 \end{cases} \quad (1)$$

整理得

$$\begin{cases} L_2 \cos q_2 - L_3 \cos q_3 = L + L_4 \cos q_4 - L_1 \cos q_1 = F \\ L_2 \sin q_2 - L_3 \sin q_3 = L_4 \sin q_4 - L_1 \sin q_1 = G \end{cases} \quad (2)$$

由②式可得

$$\begin{cases} L_2 \cos(q_2 - q_3) = L_3 + F \cos q_3 + G \sin q_3 \\ L_2^2 + L_3^2 - 2L_2 L_3 \cos(q_2 - q_3) = F^2 + G^2 \\ F \cos q_3 + G \sin q_3 + \frac{F^2 + G^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_3} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

令 $H = \frac{F^2 + G^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_3}$, 由上式得

$$F \cos q_3 + G \sin q_3 + H = 0$$

将三角函数变换公式

$$\cos q_3 = \frac{1 - \tan^2(q_3/2)}{1 + \tan^2(q_3/2)} \quad \sin q_3 = \frac{2 \tan(q_3/2)}{1 + \tan^2(q_3/2)}$$

带入③式, 解得

$$q_3 = 2 \arctan \frac{G + N \sqrt{F^2 + G^2 - H^2}}{F - N}$$

式中, N 是符号系数, 当三角形 BDC 三点为逆时针方向时, N = 1, 否则 N = -1, 如图2所示 N = 1, 所以

$$q_3 = 2 \arctan \frac{G + \sqrt{F^2 + G^2 - H^2}}{F - 1} \quad (4)$$

把④式带入②式解得

$$q_2 = \arctan \frac{G + L_3 \sin q_3}{F + L_3 \cos q_3}$$

Q 点的坐标为

$$\begin{cases} x_q = L + L_4 \cos q_4 - L_q \cos q_3 \\ y_q = L_4 \sin q_4 - L_q \sin q_3 \end{cases} \quad (5)$$

由上式可得

$$\begin{cases} (x_q - L)^2 + y_q^2 = L_4^2 + L_q^2 - 2L_4L_q \cos(q_3 - q_4) \\ (x_q - L) \cos q_4 + y_q \sin q_4 = L_4 - L_q \cos(q_3 - q_4) \end{cases} \quad (6)$$

由⑥式得

$$(x_q - L) \cos q_4 + L_q \sin q_4 + \frac{L_q^2 - (x_q - L)^2 - y_q^2 - L_4^2}{2L_4} = 0$$

$$K = \frac{L_q^2 - (x_q - L)^2 - y_q^2 - L_4^2}{2L_4}$$

得

$$(x_q - L) \cos q_4 + L_q \sin q_4 + K = 0$$

可以解得

$$q_4 = 2 \arctan \frac{-L_q \pm \sqrt{L_q^2 + (x_q - L)^2 - K^2}}{K + L - L_q} \quad (7)$$

把⑦代入⑤可以解得

$$q_3 = \arctan \frac{L_4 \sin q_4 - y_q}{L + L_4 \cos q_4 - x_q}$$

由①式可得 C 点的坐标,令

$$M = \frac{y_c^2 + x_c^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1}$$

从而求得

$$q_1 = 2 \arctan \frac{y_c \pm \sqrt{y_c^2 + x_c^2 - M^2}}{x_c + M} \quad (8)$$

由上述逆运动学分析可知,5R 机构灵活多变的同时,也带来了控制上的困难.每给定 5R 机构 2 个原动件,即伺服电动机的位置,我们就可以确定连杆末端执行件的位姿.在求运动学逆解时,唯一的连杆执行件轨迹点却不能得出唯一的 2 个原动件的位姿.理论分析上伺服电动机的位置可能有 4 个^[3].采用示教方法可以很好地解决五连杆实现复杂轨迹运动的逆解与控制问题^[4].

3 示教还原与智能控制

因为 5R 机构采用的步进电机要受到步距角的影响,其转角被离散成为一个个点的轨迹,当 5R 机构各杆长一定时,连杆末端执行件的运动轨迹在平面内也是离散的,它只能运行到 5R 机构工作平面的有限的点.因此,在对 5R 机构进行示教还原与智能控制时,连杆末端执行件不能完全与理想轨迹吻合,只能尽量地向理想轨迹逼近^[5].五连杆机构轨迹任意曲线如图 3 所示.

图 3 中的实心与空心圆点都表示 5R 机构可以到达的位置,这些离散点的位置在平面内不是均匀分布的,其中途中黑点表示对给定轨迹的近似点.

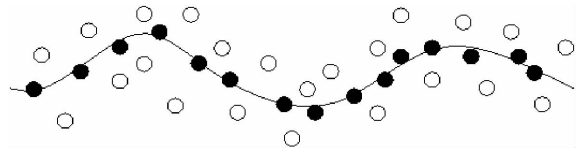


图 3 五连杆机构轨迹任意曲线

由上述分析可知,要使 5R 机构末端执行件实现一定的轨迹运动,首先要把给定的轨迹离散化成一个一个的点,然后找出与离散点最接近的执行件点位置所对应的步进电动机位置.这种方法有点繁琐,寻找与给定轨迹点最接近的末端执行件点位置是一项很复杂的工作,但是可以从原动件的角度来考虑.原动件由步进电机驱动,这样可以通过运动学逆解对给定轨迹上的点求出原动件的位置,然后取与电动机综合变化角度最小的解.相比较 2 种方法,后者减少了很多计算工作^[6].

5R 机构中步进电动机的变化角度与末端执行件的位置变化没有一一对应的关系,但总的来说有这样的规律:步进电动机角度越小,末端执行件位置变化就越小,反之亦然^[7].可以通过 Matlab 模拟实验来证明这一结论.首先把给定的轨迹离散化成一个一个的点,标上序号(1, 2, 3, ...),选择第一个点作为智能控制的初始角,后面的点通过逆解得到的几组角度,其选择的标准应使步进电动机变化的综合角度最小.由于本系统中步进电动机有 2 个,可以通过这样的标准来衡量 2 个步进电动机变化角度的大小,即让

$$\sqrt{(q_{1n} - q_{1(n-1)})^2 + (q_{4n} - q_{4(n-1)})^2} \quad (9)$$

最小.其中 q_{1n}, q_{4n} 为原动件的即将到达的位置所对应的角, n 为离散后各点的标号.

4 示教再现程序框图

本程序的主要工作过程分为示教、回原点、再现、复位,如图 4 所示.首先进行示教工作,通过手动让 5R 机构执行件走过一定轨迹,同时按下数据记录按钮,记录下一个个示教点.示教结束时,执行件由终点回到起始点,然后开始再现手动轨迹,调用上述运动学公式,得出比较理想的轨迹.

5 仿真分析

通过上述方法,让 $L_1, L_2, L_3, L_4, L, L_q$ 的值分别为 4, 6, 6, 8, 5, 7, 起点为(2, 4), 终点为(8.5, 5.5), 设步进电机步距角为 3° , 运用 Matlab 对其进行直线

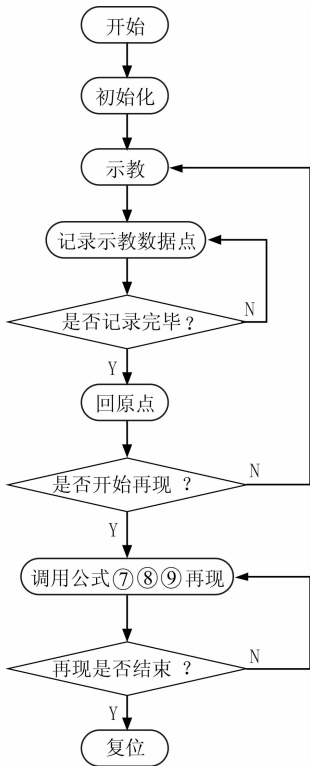


图4 示教再现程序图

仿真,仿真结果如图5所示.实际轨迹与理想轨迹有一定的偏差,其原因一是选取的步矩角过大,二是示教时记录的数据点过少,可以通过减小电机步矩角,增加示教数据点的方法减小偏差,从而解决这一问题.

6 结语

本文研究了一种基于5R并联堆垛机构的运动轨迹智能控制的设计方法.该方法通过对5R机构控制系统和逆运动学的分析,给定5R机构2个步进电动机的位置,从而确定连杆末端执行件的位姿.通过以上分析,由于5R并联机构位姿逆解不唯一,通过示教再现的方法可以很好地解决5R并联机构的智能控制问题,尤其对于实现5R并联机构平面任意轨迹堆垛,可以减少编程工作,提高堆垛工作效率,是一个很好很实用的方法.

参考文献:

- [1] 李伟,王玉涛.一种新型二自由度并联机械臂的轨迹控制[J].煤矿机械,2012,33(1):207.
- [2] 李伟,杨晨.基于双轴极坐标的直线插补算法的研究[J].煤矿机械,2009,30(10):97.
- [3] 路敦民.被动式五连杆人际合作机器人研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.
- [4] 付连芳.五自由度教学机器人的示教再现控制系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2001.
- [5] 沈锦华.五连杆式人机合作机器人控制及实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2004.
- [6] 张春林,余跃庆.高等机构学[M].北京:北京理工大学出版社,2005:11-94.
- [7] 曹惟庆.连杆机构的分析与综合[M].北京:科学出版社,2002:5.

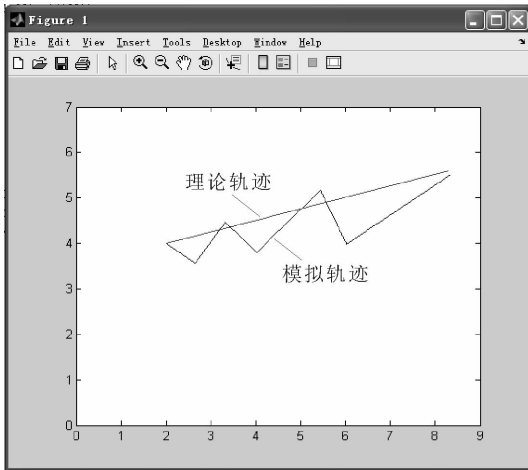


图5 示教还原仿真图