

基于高精度控制的六轴机器人坐标转换算法

何雅芹

(廊坊市心血站,河北 廊坊 065000)

摘要:为研究六轴机器人控制坐标从球面叠加坐标系向三维直角做标记进行机器学习坐标转换的核心控制算法,将机器学习算法引入六轴机器人控制为核心思路,通过有外部变量干预的多列神经网络控制系统革新六轴机器人自带控制系统,实现系统内球面坐标控制模式向三维直角坐标控制模式的革新。当达到 100 000 次训练后,基于神经网络的革新控制算法可以实现自主控制机器人操作部件控制中心点几乎沿空间最短直线运动,其控制效率远大于机器人自带控制系统。证明该革新控制系统对六轴机器人的自主控制有积极意义。

关键词:六轴机器人;球面叠加坐标系;三维直角坐标控制模式;坐标转换算法

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)03-0213-03

Coordinate Transformation Algorithm of Six Axis Robot Based on High Precision Control

HE Yaqin

(Langfang Central Blood Station, Langfang 065000, China)

Abstract:To study the core control algorithm of six axis robot control coordinate transformation from spherical superposition coordinate system to three-dimensional right angle marking, the machine learning algorithm was introduced into the six axis robot control as the core idea, and the six axis robot's own control system was innovated through the multi column neural network control system with the intervention of external variables in order to achieve the innovation from the spherical coordinate control mode in the system to the three-dimensional rectangular coordinate control mode. After 100 000 times of training, the autonomous control of the robot operating parts was realized by the innovative control algorithm based on neural network, with the control center point moving almost along the shortest straight line in space. The results show that the new control system is much more efficient than that of the robots of its own and has positive significance for the autonomous control of six axis robot.

Keywords: six axis robot; spherical superposition coordinate system; three-dimensional rectangular coordinate system; coordinate transformation algorithm

0 引言

六轴机器人一般包括 6 个回转自由度,可实现其顶端操作装置的全操作空间自由移动。而在其软件编写过程中,如果单纯针对 6 个回转自由度进行操作,则会形成 6 个球面坐标系的叠加计算,在编程过程中稍有疏忽,即可造成机器人的误动作^[1]。历史上出现过因为六轴机器人编程错误造成其误动作从而导致其周边行走人员被挤伤致死的案例。且因为对 6 个回转自由度形成的 6 个球面坐标系控制叠加算法无法实现更高计算精度,导致六轴机器人在焊接、安装、3D 打印等操作过程中精度不足或编程量增加的问题^[2]。所以,有必要通过坐标转换算法实现高精度控制理念下的六轴机器人坐标转换算法,以提升六轴机器人的工作效能。

当前共有 4 个六轴机器人核心品牌,包括瑞士 ABB (1988)、日本安川(1915)、日本发那科(1976)、德国库卡(1989)。国外相关研究中,重点针对六轴机器人的控制

精度、遥控模式、遥控与自主控制的结合点等方向,且其研究方向重点为控制阀和液压杆、液压马达的机械控制模式,涉及到腔体结构、流体力学、材料力学等研究领域。与之相比,国内更倾向于固定硬件条件下的软件控制算法研究^[3]。

六轴机器人之前的工作体位不同,导致其在三维直角坐标系下的运动过程需要调动的回转关节有巨大差异。所以,如果单纯使用三角函数驱动的球面坐标系三维转化算法,很容易在多次动作叠加后导致六轴机器人的卡死故障。所以有必要从机器学习理念出发,研究六轴机器人自主选择动作关节且在运行过程中保持其合适体位的机器学习算法^[4]。

1 回转自由度控制下的球面坐标系叠加过程

各公司的机器人布局均分为肩部关节、肘部关节、腕部关节 3 个全向活动关节,每个关节设计 2 个回转轴,整

作者简介:何雅芹(1981—),女,河北大城人,高级工程师,本科,研究方向为计算机网络技术、电子射频标签、网络直报系统等方面信息化互联网。

个机器人系统共包含 6 个回转轴,确保腕部关节之前安装的行动部件可以拥有最大的自由度,详见图 1。

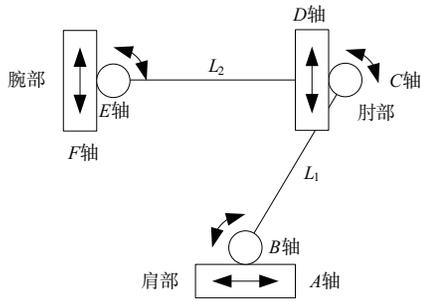


图 1 六轴机器人的一般关节设定

因为绝大部分六轴机器人的上臂(肩部关节至肘部关节之间)长度 L_1 和前臂(肘部关节至腕部关节之间)长度 L_2 长度均为固定,所以在全向自由度条件下,该机器人的肘关节控制点将以肩关节等效回转中心为圆心,在球面移动,腕关节控制点也以肘关节等效回转中心为圆心,在球面移动,所以其最大前探距离为 $L_{\max} = L_1 + L_2$,其最小前探距离则受到各回转关节机械尺寸限制^[5]。

在实际控制中,以肩关节回转控制点为 $(0, 0, 0)$ 坐标点,将 x, y 平面布置为水平面,则其实际控制的三维直角坐标系将在肩关节回转控制点 $(0, 0, 0)$ 坐标点周围形成 4 个控制象限,其中定义肩关节至流水线法向方向的连线为 x 轴,水平方向垂直于 x 方向为 y 轴,垂直于 x, y 平面为 z 轴。此时,控制肩关节回转控制点坐标为 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$,肘关节回转控制点坐标为 (x_1, y_1, z_1) , L_1 即 (x_0, y_0, z_0) 至 (x_1, y_1, z_1) 的直线距离,则

$$L_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 、 (x_1, y_1, z_1) 分别为肩关节回转控制点坐标和肘关节回转控制点坐标,且 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ 。

设腕关节回转控制点坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 那么 L_2 即 (x_1, y_1, z_1) 至 (x_2, y_2, z_2) 的直线距离,则

$$L_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2)$$

式(1)与式(2)约束了 2 个球面,其中球面 1 的球心固定在 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ 位置,球面半径为 L_1 , 而球面 2 的球心在球面 1 表面自由移动,其球面半径为 L_2 。

如果将腕关节之前到行动部件控制中心点的距离定义为 L_3 , 则会形成一个球面 3。球面 3 的叠加模式为其球面球心在球面 2 表面自由移动,其行动部件中心点位于球面 3 的表面^[6]。

传统程控模式下,即是通过上述球面坐标分别进行三维直角坐标转化的方式获得最终的三维直角坐标。

2 神经网络的构成及其互搏训练方式

2.1 神经网络的输入与输出

输入端包括 6 个三维坐标系控制变量,即当前行动部件控制中心点的三维直角坐标 (x_0, y_0, z_0) 和行动部件移动目标控制中心点的三维直角坐标 (x_1, y_1, z_1) 以及 6 个关节回转机构当前位置变量 $(\angle A, \angle B, \angle C, \angle D, \angle E,$

$\angle F)$ 。上述 12 个输入变量均为双精度浮点变量(Double 格式)以提升控制精度。

输出变量为 6 个关节回转机构目标位置变量 $(\angle A, \angle B, \angle C, \angle D, \angle E, \angle F)$, 该 6 个输出变量均为双精度浮点变量(Double 格式),以提升控制精度。

位置读取控制方面,采用光栅摄影识别模块得到 6 个关节的回转位置。

2.2 神经网络的互搏验证方式

图 1 中 A 轴位置变量 $\angle A$ 、D 轴位置变量 $\angle D$ 、F 轴位置变量 $\angle F$ 均为无限回转部件,但 B 轴位置变量 $\angle B$ 、C 轴位置变量 $\angle C$ 、E 轴位置变量 $\angle E$ 均为受限回转部件。当受限回转部件在神经网络控制下出现回转限制时,神经网络将收到错误报告,并将标记该方案为不可行方案。经过长期训练,可以标定大部分不可行方案,使神经网络的验证过程得到不断加强。

在输出 6 个关节回转目标位置变量 $(\angle A, \angle B, \angle C, \angle D, \angle E, \angle F)$ 时,还需要输出一个逻辑型标定变量 Check(Logical 格式),该逻辑变量为 1 时认为该方案不可行,该逻辑变量为 0 时,认为该方案可行^[7]。

2.3 神经网络的模块数据流设计

综合上述分析,该神经网络共有 12 个双精度浮点变量(Double 格式)输入,6 个双精度浮点变量(Double 格式)和 1 个逻辑型变量(Logical 格式)输出,其数据流结构见图 2。

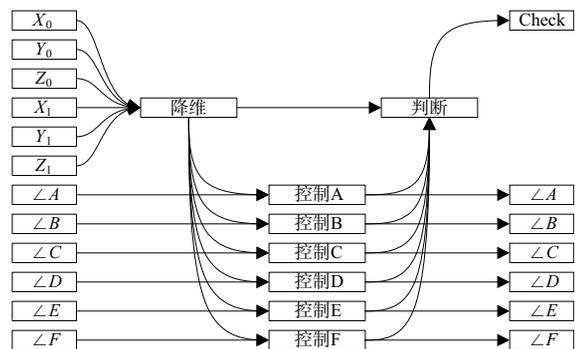


图 2 神经网络模块数据流图

图 2 中,该神经网络计算模块的本质是一个由外围变量控制的 6 列并行多列神经网络系统,外围控制变量为当前机器人行动部件控制中心点坐标及其目标坐标。6 列并行多列神经网络的目标是从 6 个回转部件回转角度计算目标回转角度,而判断模块数据取自干预变量的降维模块输出量和 6 列并行分列神经网络模块的输出量,最终输出一个二值化的 Logical 变量 Check。

2.4 神经网络子模块设计

图 2 中神经网络模块共有 3 个表达形式,其中降维模块的统计学意义是将 6 个三维直角坐标系数据信息充分保留,即其需要有足够丰富的待回归变量用于保存数据信息,在不发生信息损失的前提下实现数据降维,将 6 个 Double 型变量降维为 1 个 Double 型变量且无数据损失。

即其应采用待回归变量较为丰富且回归曲线细节较为丰富的多项式变量进行控制。其基函数如下:

$$Y = \sum_{j=0}^5 A_j X_i^j \quad (3)$$

式中: X_i 为输入变量的第 i 项; Y 为节点输出变量; j 为多项式阶数; A_j 为第 j 项多项式的待回归系数。该公式采用 0-5 阶多项式构成 6 个多项式项叠加的待回归函数。

为增加该模块的信息容纳能力,该模块应设计为 5 层,分别为 6 节点、17 节点、31 节点、13 节点、3 节点,输出层为 1 节点。

控制模块共有 6 个结构相同但数据相互独立的神经网络模块,其统计学意义是确定输入角度信息和输出角度信息的线性关系,且每个模块均有 2 个 Double 型变量输入,1 个 Double 型变量输出,所以其应使用线性函数进行节点设计。其基函数应写作式(4):

$$Y = \sum (A \cdot X_i + B) \quad (4)$$

式中 A 、 B 为待回归系数。

因为该模块的信息处理任务并不重,且数据损失量也不显著,所以为增加系统运行效率,其隐藏层设计为 2 层,每层 3 个节点。

判断模块的统计学意义为判断上述数据处理过程是否合法,即是否有关节运动控制超限的问题,且其输入量为 7 个 Double 型变量,输出量为 1 个 Logical 型变量,所以其节点函数应采用二值化函数进行节点设计,其基函数应写作式(5):

$$Y = \sum \frac{1}{A \cdot e^{X_i} + B} \quad (5)$$

式中 e 为自然常数,此处取近似值 $e = 2.718\ 281\ 828$ 。

因为该过程无需考虑数据损失,仅做出数据合法性判断,所以考虑到系统运行效率,其隐藏层也应尽可能简化,考虑到数据降维需求,将 7 个输入变量降维到 1 个输出变量,所以其隐藏层设计为 2 层,分别为 7 节点和 3 节点^[8]。

3 系统仿真验证

采用 ABB 仿真工具包中提供的仿真环境软件进行仿真测试,采用随机数法生成机器人关节状态和移动坐标,使机器人在 ABB 自带控制系统和本文开发的革新控制系统两种环境下运行,考察二者的控制精度。

首先测试本文革新控制系统的神经网络收敛时间,见图 3。

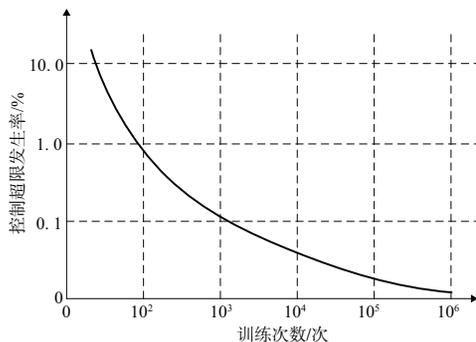


图 3 神经网络收敛时间示意图

图 3 中,当训练次数为 95 次时,控制超限事故的发生率下降到 1.0% 以下,当训练次数达到 1 300 次时,控制超限事故发生率下降到 0.1% 以下,且随着训练次数的增加,该模型对六轴机器人的控制合理度不断提升。因为在该算法驱动下,机器人在使用过程中可以持续进行自我互搏试验,所以其实际控制效率会在使用过程中持续提升。

测试两种控制算法的操作部件控制中心移动线路,与空间内最短无障碍直线相比,比较其路径长度和曲线标准偏差率。测试过程为相同操作任务下完成 1 h 操作任务。在 1 000 次训练条件下得到比较结果见表 1,在 100 000 次训练条件下得到比较结果见表 2。表中数据是使用 SPSS24.0 进行比较分析的,使用 T 校验得到其数据差异性,当 $T < 10.000$ 时认为存在统计学差异;使用 P 校验得到其数据信度,当 $P < 0.05$ 时认为存在统计学意义,当 $P < 0.01$ 时认为存在显著的统计学差异。

表 1 两种控制算法的操作路线特征比较表(1 000 次训练)

比较方案	路径比	标准偏差率	周期操作次数
自带控制系统	1.514±0.233	0.361	217.5±12.4
革新控制系统	1.053±0.012	0.082	293.2±9.6
T 校验	4.812	2.133	3.679
P 校验	0.008	0.006	0.003

表 2 两种控制算法的操作路线特征比较表(100 000 次训练)

比较方案	路径比	标准偏差率	周期操作次数
自带控制系统	1.514±0.233	0.361	217.5±12.4
革新控制系统	1.002±0.012	0.003	338.6±6.5
T 校验	0.000	0.000	0.000
P 校验	0.000	0.000	0.000

表 1 中,革新控制系统的路线特征和工作效率在 1 000 次训练条件下已经显著优于自带控制系统。 $T < 10.000$, $P < 0.01$,具有显著的统计学差异。

表 2 中,革新控制系统几乎可以实现沿最短直线控制六轴机器人系统,且其标准偏差率为 0.003,表明控制移动线路的微调动作几乎为 0,其周期操作次数也显著增加。通过 SPSS 分析其与自带控制系统的差异,发现 $T = 0.000$, $P = 0.000$,具有显著的统计学差异。

4 结语

通过有外部变量干预的多列神经网络控制系统革新六轴机器人自带控制系统,实现系统内球面坐标控制模式向三位直角坐标控制模式的革新,使得六轴机器人的控制精度和控制效率大幅度提升^[9]。在机器学习的互搏式训练模式下,机器人的自主学习可以在日常操作中主动积累控制经验,当达到 100 000 次训练后,基于神经网络的革新控制算法可以实现自主控制机器人操作部件控制中心

(下转第 239 页)

胶设计,重新验证横向振动实验,对比衰减率,以此获取更准确优化的拧紧工艺和螺栓设计,为后续工艺协同发动机设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] 汤春球,张继伟,莫易敏,等. 扭矩转角法工艺与检测方法[J]. 机械设计与研究,2018,34(6):103-108.
- [2] 聂晓东,胡军,李旋旋,等. 拧紧工艺对螺栓预紧力影响的实验研究[J]. 中国工程机械学报,2019,17(1):75-78.
- [3] 孙贵青,赵哲,杨法立,等. 某发动机盘轴扭矩-转角连接法应用试验[J]. 航空制造技术,2019,62(9):76-79,93.
- [4] 解慧,王峰会,张凯,等. 振动状态下螺栓松动行为及原因分

析[J]. 现代机械,2017(3):44-47.

- [5] 刘文光,林炜彦,贺红林. 预紧力对紧螺栓连接板位移载荷响应的影响[J]. 润滑与密封,2018,43(3):75-80,108.
- [6] 惠焯,黄玉美,李艳. 切向载荷下螺栓结合部静特性分析及试验[J]. 中国机械工程,2015,26(7):892-898.
- [7] 王传华,王文莉,林清源,等. 基于精确建模的横向振动工况下螺栓松动机理研究[J]. 宇航总体技术,2018,2(4):43-51,64.

收稿日期:2020-05-29

(上接第 215 页)

点几乎沿空间最短直线运动,其控制效率已经远大于机器人自带控制系统。可以认定,该革新控制系统对六轴机器人的自主控制有积极意义,且在未来高精度遥控操作、星际远程作业的全自主程控作业等应用场景,该控制算法有技术推广的必要性。

参考文献:

- [1] 李伯基. 基于八轴六联动控制复合机器人的技术集成及应用研究[J]. 机电工程技术,2020,49(8):181-183.
- [2] 陈阳,刘振国,金武飞,等. 六轴工业机器人自动回初始位的控制算法研究[J]. 制造业自动化,2020,42(6):57-60.
- [3] 郭跃飞. 基于视觉识别的机器人自动抓取设备研究[J]. 建材技术与应用,2020(1):36-37.

- [4] 郭如峰,梅雪川,叶敏,等. 超声波焊接机器人在汽车外饰件中的设计与应用[J]. 现代制造技术与装备,2019(12):15-18.
- [5] 张翔,韩建海,李向攀,等. 轴孔装配作业机器人力控制系统设计[J]. 机械设计与制造,2019(12):63-66,70.
- [6] 严均,周焯辉. 六轴工业机器人控制系统的设计与实现[J]. 科技资讯,2019,17(33):78-79,82.
- [7] 郭宏岩. 六轴机器人在汽车头枕生产中的应用及展望[D]. 沈阳:沈阳市科学技术协会,2019.
- [8] 尹春丽,刘波,李颖,等. 一种基于六轴惯导的配电网带电作业机器人遥操作控制系统[J]. 自动化博览,2019(6):54-56.
- [9] 吴旦夫. 六轴机器人与变位机协调控制的方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.

收稿日期:2020-12-09

(上接第 234 页)

3 结语

本文研制了基于光纤光栅阵列的输电线路温度监测系统,单系统可实现 320 个测点的同时监测。研制的光纤光栅温度传感器灵敏度为 11.2 pm/°C。试验结果表明,该技术可用于输电线路温度的长距离实时在线监测,其性能能够满足电力系统安全运行监测的需求。

参考文献:

- [1] 陈连凯,来文青,沈扬,等. 可扩展式高压输电线路光纤点式传感网络技术研究[J]. 水电能源科学,2013,31(11):216-219.
- [2] 徐云水,沈龙,梁仕斌,等. 基于光纤传感的输电导线温度监测[J]. 云南电力技术,2018,46(4):79-82.
- [3] LU P, BYERLY K, BURIC M, et al. Distributed fiber-optic sensor for real-time monitoring of energized transformer cores[C]// SPIE Defense + Security, Proc SPIE 10194, Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IX,

Anaheim, California, USA: 2017, 1019: 101941S.

- [4] LIANG Y, LIU Lidong, HUANG Li, et al. Research on noise reduction method of long distance optical fiber sensor for transmission line on-line monitoring [C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [5] 高明,赵振刚,李英娜,等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜监测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(12):51-59.
- [6] 祝视,曾小辉,魏培,等. 分布式光纤传感技术在电力系统中的应用分析[J]. 湖南电力,2019,39(6):1-4.
- [7] 徐涛. 基于分布式光纤振动传感的高压电缆防外破监测预警系统应用[J]. 东北电力技术,2020,41(6):30-33.
- [8] 薛渊泽,王学锋,唐才杰,等. 高温再生光纤光栅温度传感器封装技术[J]. 传感器与微系统,2019,38(5):49-51.
- [9] 任越,张钰民,钟国舜,等. 管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外,2020,50(5):598-601.
- [10] 张佳斌,贺庆,张青超. 光纤光栅传感器阵列在空间温度场测量中的应用[J]. 激光与红外,2020,50(6):724-728.

收稿日期:2020-12-28