



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112518753 A

(43) 申请公布日 2021.03.19

(21) 申请号 202011411571.6

(22) 申请日 2020.12.04

(71) 申请人 浙江理工大学

地址 310018 浙江省杭州市江干经济开发  
区2号大街928号

(72) 发明人 张恩政 陈本永 王涛

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公  
司 33200

代理人 林超

(51) Int. Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

B25J 11/00 (2006.01)

B23K 37/02 (2006.01)

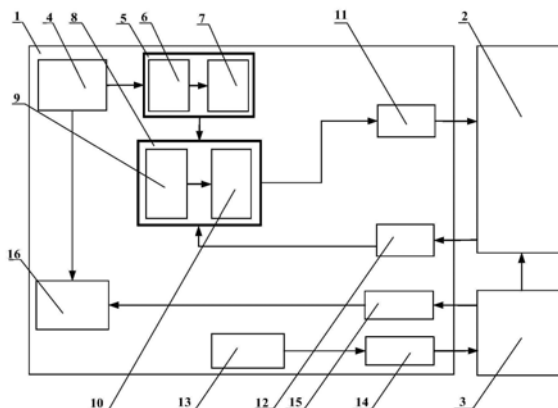
权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统和方法

(57) 摘要

本发明公开了一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统和方法。轨迹跟踪系统分别和工业机器人、测量设备连接,工业机器人末端法兰上安装有与测量设备配套的随动靶球;轨迹规划模块依次经逆解补偿模块、神经网络PID模块、机器人输入接口和工业机器人的输入端连接,工业机器人的输出端经机器人输出接口和PID控制模块连接;轨迹规划模块和误差分析模块连接,误差分析模块经测量输出接口和测量设备的输出端连接,测量控制模块经测量输入接口和测量设备的输入端连接。本发明提高机器人的逆解精度,降低关节误差对运动轨迹精度的影响,通过机器人输入接口控制机器人按照预期轨迹运动,适用于焊接、喷涂、打磨等运动轨迹精度要求较高的场合。



1. 一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统,其特征在于:

包括工业机器人(2)、测量设备(3)和轨迹跟踪系统(1),轨迹跟踪系统(1)分别和工业机器人(2)、测量设备(3)连接,工业机器人(2)和测量设备(3)连接,工业机器人(2)、测量设备(3)和轨迹跟踪系统(1)共同构建闭环的工业机器人运动轨迹跟踪系统;工业机器人(2)末端法兰上安装有与测量设备配套的随动靶球。

2. 根据权利要求1所述的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统,其特征在于:所述的轨迹跟踪系统(1)包括轨迹规划模块(4)、逆解补偿模块(5)、神经网络PID模块(8)、机器人输入接口(11)、机器人输出接口(12)、测量控制模块(13)、测量输入接口(14)、测量输出接口(15)和误差分析模块(16);轨迹规划模块(4)依次经逆解补偿模块(5)、神经网络PID模块(8)、机器人输入接口(11)和工业机器人(2)的输入端连接,工业机器人(2)的输出端经机器人输出接口(12)和PID控制模块(10)连接;轨迹规划模块(4)和误差分析模块(16)连接,误差分析模块(16)经测量输出接口(15)和测量设备(3)的输出端连接,测量控制模块(13)经测量输入接口(14)和测量设备(3)的输入端连接。

3. 根据权利要求1所述的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统,其特征在于:在轨迹跟踪系统中,轨迹规划模块(4)分别与逆解补偿模块(5)和误差分析模块(16)互联,逆解补偿模块(5)包括相互连接的BP神经网络逆解模块(6)和神经网络迭代补偿模块(7),轨迹规划模块(4)生成期望运动轨迹并传输给逆解补偿模块(5)中BP神经网络逆解模块(6),BP神经网络逆解模块(6)进行末端位姿和关节角的转换后将结果发送到神经网络迭代补偿模块(7)进行,神经网络迭代补偿模块(7)根据关节角结果补偿反馈到末端位姿进行修正;最终由BP神经网络逆解模块(6)输出最后的关节角结果到神经网络PID模块(8);神经网络PID模块(8)包括改进BP神经网络模块(9)和PID控制模块(10),改进BP神经网络模块(8)连接至PID控制模块(10),通过PID控制模块(10)对BP神经网络逆解模块(6)发送过来的关节角结果和测量设备(3)发送过来的实际关节角数据进行分析反馈控制,通过改进BP神经网络模块(9)对PID控制模块(10)内的控制参数进行改进调整优化。

4. 根据权利要求1所述的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统,其特征在于:所述改进BP神经网络模块(9)为改进Sigmoid激活函数的BP神经网络模块。

5. 根据权利要求1所述的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统,其特征在于:所述测量设备(3)为激光跟踪仪,测量设备(3)测量工业机器人(2)末端位姿采用的组件为随动靶球,随动靶球固定在工业机器人(2)末端的法兰上。

6. 根据权利要求1所述的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统,其特征在于:所述工业机器人(2)为串联型机械臂类机器人。

7. 应用于权利要求1-6任一所述系统的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法,其特征在于:方法具体为:

步骤一,

轨迹跟踪系统(1)中的轨迹规划模块(4)在笛卡尔空间下规划生成工业机器人(2)的期望运动轨迹,期望运动轨迹通过逆解补偿模块(5)中的BP神经网络逆解模块(6)将末端执行器的位置、速度、加速度映射到关节空间并解算出工业机器人(2)各个关节的误差,再通过神经网络迭代补偿模块(7)将各个关节误差迭代补偿至达到工业机器人(2)控制精度的范围内;然后逆解补偿模块(5)向神经网络PID模块(8)输出期望关节数据;

步骤二，

工业机器人(2)通过机器人输出接口(12)向神经网络PID模块(8)输出关节的实际关节数据,神经网络PID模块(8)接收逆解补偿模块(5)输出的期望关节数据和机器人输出接口(12)输出的实际关节数据,神经网络PID模块(8)对期望关节数据和实际关节数据进行分析处理获得偏差,将偏差的比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_i$ 、微分系数 $k_d$ 三个参数通过线性组合的方式对进行控制,使得偏差越来越小,直至趋于零;神经网络PID模块(8)最终输出关节角控制率,通过机器人输入接口(11)控制工业机器人(2)末端沿着期望运动轨迹运动;

步骤三,测量控制模块(13)通过测量输入接口(13)控制测量设备(3)跟踪并测量工业机器人(2)的末端实际轨迹数据,并通过测量输出接口(15)传输至误差分析模块(16);误差分析模块(16)对来自轨迹规划模块(4)的期望运动轨迹和来自测量设备(3)的末端实际轨迹数据进行比较分析处理,获得轨迹跟踪精度。

8.根据权利要求7所述系统的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法,其特征在于:

所述步骤一中,逆解补偿模块(5)由BP神经网络逆解模块(6)和神经网络迭代补偿模块(7)组成;

BP神经网络逆解模块(6)采用6输入多输出的网络,6输入的输入数据是工业机器人(2)六维末端位姿数据,6输出的输出数据是工业机器人(2)的六维关节角数据;6输入数据用矩阵表示为 $[x, y, z, r, p, \gamma]$ ,其中 $x, y, z$ 表示机器人末端的三维坐标位置, $r, p, \gamma$ 表示机器人末端的第一姿态参数、第二姿态参数、第三姿态参数;多输出数据用矩阵表示为 $[\theta_1, \sim, \theta_n]$ ,其中 $\theta_n$ 分别表示机器人的第 $n$ 个关节角, $n$ 表示关节角的总数, $n=1, 2, \dots, 6$ ;神经网络迭代补偿模块(7)进行关节角到末端实际位姿的正解操作,然后分析判断,进而补偿获得新的末端目标位姿反馈回到BP神经网络逆解模块(6)。

9.根据权利要求7所述系统的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法,其特征在于:

所述的BP神经网络逆解模块(6)与神经网络迭代补偿模块(7)相连,逆解补偿模块(5)通过BP神经网络逆解模块(6)与神经网络迭代补偿模块(7)迭代配合,进行多次BP神经网络逆解和运动学正解分别计算出关节误差和末端位姿误差矩阵,并通过末端位姿误差矩阵进行迭代补偿直至关节误差满足预先设定的误差阈值,具体过程如下:

首先输入工业机器人(2)的末端目标位姿 $T_j$ , $j$ 表示第 $j$ 次输入目标位姿,通过BP神经网络逆解模块(6)进行BP神经网络逆解得到期望关节角 $\theta_j$ ,神经网络迭代补偿模块(7)中根据期望关节角 $\theta_j$ 求出包含误差的工业机器人(2)的末端实际位姿 $T'_j$ ,再将末端实际位姿 $T'_j$ 再通过BP神经网络逆解得到新期望关节角 $\theta_{j+1}$ ,计算出关节误差:

$$\Delta E = \theta_{j+1} - \theta_j$$

其中, $\Delta E$ 表示机器人关节误差, $\theta_{j+1}$ 表示第 $j+1$ 次逆解得到的期望关节角, $\theta_j$ 表示第 $j$ 次逆解得到的期望关节角;

判断关节误差 $\Delta E$ 是否满足预先设置的误差阈值要求,如果满足要求,输出BP神经网络逆解的新期望关节角 $\theta_{j+1}$ ,结束迭代;如果不满足要求,计算出工业机器人(2)的末端位姿误差矩阵:

$$\Delta T = T_j^{-1} T'_j$$

其中,  $\Delta T$ 表示末端位姿误差矩阵,  $T'_j$ 表示机器人末端实际位姿矩阵,  $T_j$ 表示机器人末端目标位姿;

继续迭代补偿直到误差满足要求, 利用末端位姿误差矩阵计算新的末端目标位姿 $T_{j+1}$ 如下:

$$T_{j+1} = T_j \Delta T$$

其中,  $T_{j+1}$ 表示工业机器人(2)的新的末端目标位姿,  $T_j$ 表示机器人末端目标位姿,  $\Delta T$ 表示机器人末端位姿误差矩阵;

然后神经网络迭代补偿模块(7)将新的末端目标位姿 $T_{j+1}$ 返回到BP神经网络逆解模块(6)进行BP神经网络逆解, 如此按照上述流程循环, 使得机器人的关节角不断减小误差, 直至获得满足误差阈值要求的内关节误差 $\Delta E$ 则停止计算, 最后迭代获得的期望关节角 $\theta_{j+1}$ 由BP神经网络逆解模块(6)输出。

10. 根据权利要求7所述系统的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法, 其特征在于: 所述步骤二中, 神经网络PID模块(8)由PID控制模块(10)和改进BP神经网络模块(9);

PID控制模块(10)中采用以下公式进行增量式PID系统控制:

$$u_{zs}(t) = u_{zs}(t-1) - k_p c_p - k_I c_I + k_D c_D$$

其中,  $u_{zs}(t)$ 表示t时刻的增量式PID系统控制率;

同时改进BP神经网络模块(9)利用BP神经网络的来调整优化PID控制器模块(10)中的PID参数, PID参数包含了调节比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 和微分系数 $k_D$ 。

11. 根据权利要求9所述系统的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法, 其特征在于: 所述的改进BP神经网络模块(9)中, 具有BP神经网络, BP神经网络包含输入层、隐含层和输出层, 隐含层神经元个数设置中, 输出层的三个输出神经元分别对应PID控制器的三个可调参数比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 、微分系数 $k_D$ , 隐含层的神经元个数 $m$ 由以下公式计算设置:

$$m = \sqrt{n+o+l}$$

其中,  $n$ 为输入层神经元个数,  $o$ 为输出层神经元个数,  $l$ 为[1, 10]之间常数;

并且设置改进的Sigmoid激活函数 $g_{imp}(x)$ :

$$g_{imp}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

其中,  $\alpha$ 为比例因子, 取值范围为(0, 1);  $\beta$ 为位移因子, 取值范围为(-1, 1)。

采用以上BP神经网络的隐含层神经元个数设置和改进的Sigmoid激活函数来优化系统PID参数, 对增量式PID系统控制率 $u_z(t)$ 分别对输出层的输出求偏导, 分别得到神经网络PID控制的三个可调的PID参数——比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 、微分系数 $k_D$ 的网络偏差:

$$c_p = \frac{\partial u(t)}{\partial O_1^{(3)}(t)} = c(t) - c(t-1)$$

$$c_I = \frac{\partial u(t)}{\partial O_2^{(3)}(t)} = c(t)$$

$$c_D = \frac{\partial u(t)}{\partial O_3^{(3)}(t)} = e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)$$

其中,  $c_p$  表示比例系数  $k_p$  的网络偏差,  $c_i$  为积分系数  $k_i$  的网络偏差,  $c_D$  为微分系数  $k_D$  的网络偏差,  $O_w^{(3)}$  为输出层的三个输出参数,  $w$  表示第一参数, 第二参数, 第三参数,  $w=1, 2, 3$ ;  $e(t)$  表示时刻  $t$  下期望关节角与实际关节角之间的偏差。

## 一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统和方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机器人技术领域中的一种运动轨迹精度提高系统和方法,尤其是涉及了一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统方法。

### 背景技术

[0002] 工业机器人的轨迹跟踪控制是指在给定期望运动轨迹后,向工业机器人施加速度、加速度等驱动,以控制使其末端运动能够精确地跟踪期望运动轨迹。工业机器人轨迹跟踪是确保机器人在工业作业中具有较高精度的重要环节。工业机器人的轨迹跟踪大致依次包括运动轨迹规划、逆运动学分析、机器人控制和误差测量分析四个部分,其中机器人控制是轨迹跟踪的核心部分。

[0003] 目前机器人的轨迹跟踪控制是机器人控制领域的热门研究方向,为了提高工业机器人轨迹跟踪控制精度,国内外学者开展了机器人轨迹跟踪方法的大量研究,大致分为基于精确模型和基于不精确模型的轨迹跟踪控制方法。基于精确模型的轨迹跟踪通过数学模型的方法来设计控制器,需要知道机器人精确地机械结构、物理参数,其动态特性才能由数学模型来描述,但在实际工程中,机器人往往是一个复杂非线性耦合系统,因此难以得到机器人精确的数学模型。基于不精确模型的轨迹跟踪主要是通过PID反馈控制的方法来实现,该方法可有效避免机器人数学模型不精确所带来的控制不稳定问题。

[0004] 虽然PID反馈控制可以避免控制不稳定问题,但要达到较小的运动控制误差,较高精度的机器人逆运动学解算是关键环节。目前的工业机器人内部大都集成了基本的电机PID控制,但这些PID控制在机器人轨迹跟踪时存在给定好参数后无法调整参数的不足。

### 发明内容

[0005] 为了解决背景技术中存在的问题,本发明的目的在于提供一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统和方法。通过神经网络误差迭代补偿来实现较高精度的机器人逆解,使用神经网络进行PID参数的实时调整,进而跟踪并控制机器人实现高精度的轨迹运动。

[0006] 本发明通过神经网络误差迭代补偿来提高逆解精度,通过神经网络进行PID参数实时调整,进而达到跟踪控制并提高机器人运动轨迹精度的目的。该方法可应用于焊接、喷涂、打磨等运动轨迹精度要求较高的场合。

[0007] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:

[0008] 一、一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪系统:

[0009] 系统包括工业机器人、测量设备和轨迹跟踪系统,轨迹跟踪系统分别和工业机器人、测量设备连接,工业机器人和测量设备连接,工业机器人、测量设备和轨迹跟踪系统共同构建闭环的工业机器人运动轨迹跟踪系统;工业机器人末端法兰上安装有与测量设备配套的随动靶球。

[0010] 所述的轨迹跟踪系统包括轨迹规划模块、逆解补偿模块、神经网络PID模块、机器

人输入接口、机器人输出接口、测量控制模块、测量输入接口、测量输出接口和误差分析模块；轨迹规划模块依次经逆解补偿模块、神经网络PID模块、机器人输入接口和工业机器人的输入端连接，工业机器人的输出端经机器人输出接口和PID控制模块连接；轨迹规划模块和误差分析模块连接，误差分析模块经测量输出接口和测量设备的输出端连接，测量控制模块经测量输入接口和测量设备的输入端连接。

[0011] 在轨迹跟踪系统中，轨迹规划模块分别与逆解补偿模块和误差分析模块互联，逆解补偿模块包括相互连接的BP神经网络逆解模块和神经网络迭代补偿模块，轨迹规划模块生成期望运动轨迹并传输给逆解补偿模块中BP神经网络逆解模块，BP神经网络逆解模块进行末端位姿和关节角的转换后将结果发送到神经网络迭代补偿模块进行，神经网络迭代补偿模块根据关节角结果补偿反馈到末端位姿进行修正；最终由BP神经网络逆解模块输出最后的关节角结果到神经网络PID模块；神经网络PID模块包括改进BP神经网络模块和PID控制模块，改进BP神经网络模块连接至PID控制模块，通过PID控制模块对BP神经网络逆解模块发送过来的关节角结果和测量设备发送过来的实际关节角数据进行分析反馈控制，通过改进BP神经网络模块对PID控制模块内的控制参数进行改进调整优化。

[0012] 所述改进BP神经网络模块为改进Sigmoid激活函数的BP神经网络模块。

[0013] 所述测量设备为激光跟踪仪，测量设备测量工业机器人末端位姿采用的组件为随动靶球，随动靶球固定在工业机器人末端的法兰上。

[0014] 所述工业机器人为串联型机械臂类机器人。

[0015] 二、一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法：

[0016] 步骤一，

[0017] 轨迹跟踪系统中的轨迹规划模块在笛卡尔空间下规划生成工业机器人的期望运动轨迹，期望运动轨迹包含了末端执行器的位置、速度、加速度，期望运动轨迹通过逆解补偿模块中的BP神经网络逆解模块将末端执行器的位置、速度、加速度映射到关节空间并解算出工业机器人各个关节的误差，再通过神经网络迭代补偿模块将各个关节误差迭代补偿至达到工业机器人控制精度的范围内；然后逆解补偿模块向神经网络PID模块输出期望关节数据；

[0018] 步骤二，

[0019] 工业机器人通过机器人输出接口向神经网络PID模块输出关节的实际关节数据，神经网络PID模块接收逆解补偿模块输出的期望关节数据和机器人输出接口输出的实际关节数据，神经网络PID模块对期望关节数据和实际关节数据进行分析处理获得偏差，将偏差的比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 、微分系数 $k_D$ 三个参数通过线性组合的方式对进行控制，使得偏差越来越小，直至趋于零；神经网络PID模块最终输出关节角控制率，通过机器人输入接口控制工业机器人末端沿着期望运动轨迹运动；

[0020] 步骤三，测量控制模块通过测量输入接口控制测量设备跟踪并测量工业机器人的末端实际轨迹数据，测量设备通过随动靶球实时跟踪测量工业机器人末端轨迹数据，并通过测量输出接口传输至误差分析模块；误差分析模块对来自轨迹规划模块的期望运动轨迹和来自测量设备的末端实际轨迹数据进行比较分析处理，获得轨迹跟踪精度。

[0021] 所述步骤一中，逆解补偿模块由BP神经网络逆解模块和神经网络迭代补偿模块组成；

[0022] BP神经网络逆解模块采用6输入多输出的网络,事先通过数据集进行训练,6输入的输入数据是工业机器人六维末端位姿数据,6输出的输出数据是工业机器人的六维关节角数据;6输入数据用矩阵表示为 $[x, y, z, r, p, \gamma]$ ,其中 $x, y, z$ 表示机器人末端的三维坐标位置, $r, p, \gamma$ 表示机器人末端的第一姿态参数、第二姿态参数、第三姿态参数;多输出数据用矩阵表示为 $[\theta_1, \sim, \theta_n]$ ,其中 $\theta_n$ 分别表示机器人的第 $n$ 个关节角, $n$ 表示关节角的总数, $n=1, 2, \dots, 6$ 。BP神经网络逆解模块通过训练调节网络内部权值和阈值使得网络误差最小。

[0023] 神经网络迭代补偿模块进行关节角到末端实际位姿的正解操作,然后分析判断,进而补偿获得新的末端目标位姿反馈回到BP神经网络逆解模块。

[0024] 所述的BP神经网络逆解模块与神经网络迭代补偿模块相连,逆解补偿模块通过BP神经网络逆解模块与神经网络迭代补偿模块迭代配合,进行多次BP神经网络逆解和运动学正解分别计算出关节误差和末端位姿误差矩阵,并通过末端位姿误差矩阵进行迭代补偿直至关节误差满足预先设定的误差阈值,具体过程如下:

[0025] 首先输入工业机器人的末端目标位姿 $T_j$ , $j$ 表示第 $j$ 次输入目标位姿,通过BP神经网络逆解模块进行BP神经网络逆解得到期望关节角 $\theta_j$ ,神经网络迭代补偿模块中根据期望关节角 $\theta_j$ 求出包含误差的工业机器人的末端实际位姿 $T'_j$ ,再将末端实际位姿 $T'_j$ 再通过BP神经网络逆解得到新期望关节角 $\theta_{j+1}$ ,计算出关节误差:

$$[0026] \quad \Delta E = \theta_{j+1} - \theta_j$$

[0027] 其中, $\Delta E$ 表示机器人关节误差, $\theta_{j+1}$ 表示第 $j+1$ 次逆解得到的期望关节角, $\theta_j$ 表示第 $j$ 次逆解得到的期望关节角;

[0028] 判断关节误差 $\Delta E$ 是否满足预先设置的误差阈值要求,满足要求具体为小于,如果满足要求,输出BP神经网络逆解的新期望关节角 $\theta_{j+1}$ ,结束迭代;如果不满足要求,计算出工业机器人的末端位姿误差矩阵:

$$[0029] \quad \Delta T = T'_j{}^{-1} T_j$$

[0030] 其中, $\Delta T$ 表示末端位姿误差矩阵, $T'_j$ 表示机器人末端实际位姿矩阵, $T_j$ 表示机器人末端目标位姿;

[0031] 误差补偿采用新的目标位姿作为下一循环的输入,继续迭代补偿直到误差满足要求,利用末端位姿误差矩阵计算新的末端目标位姿 $T_{j+1}$ 如下:

$$[0032] \quad T_{j+1} = T_j \Delta T$$

[0033] 其中, $T_{j+1}$ 表示工业机器人的新的末端目标位姿, $T_j$ 表示机器人末端目标位姿, $\Delta T$ 表示机器人末端位姿误差矩阵;

[0034] 然后神经网络迭代补偿模块将新的末端目标位姿 $T_{j+1}$ 返回到BP神经网络逆解模块进行BP神经网络逆解,如此按照上述流程循环,使得机器人的关节角不断减小误差,直至获得满足误差阈值要求的内关节误差 $\Delta E$ 则停止计算,最后迭代获得的期望关节角 $\theta_{j+1}$ 由BP神经网络逆解模块输出,作为满足要求下的新期望关节角 $\theta_{j+1}$ 。

[0035] 这样本发明采用神经网络误差迭代补偿算法后,机器人逆解的精度得到大幅度的提高,并达到机器人控制精度的要求。

[0036] 所述步骤二中,神经网络PID模块由PID控制模块和改进BP神经网络模块;改进BP神经网络模块利用BP神经网络的自学习能力与网络内部权值和阈值来调整优化PID控制模块中性能的PID参数,PID参数包含了调节比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_i$ 和微分系数 $k_d$ 。PID控制



器模块通过调节比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 和微分系数 $k_D$ ，直接对工业机器人进行系统的闭环控制。PID控制模块采用独立关节位置增量式PID控制，通过输入各个关节期望的位置、速度、加速度，输出补偿力矩，然后发送至电机伺服驱动器生成相应目标电流来控制机器人运动。

[0037] 改进BP神经网络模块中，具有BP神经网络，关键是设置隐含层神经元个数和设置输出层神经元的变换函数，BP神经网络包含输入层、隐含层和输出层，隐含层神经元个数设置中，输出层的三个输出神经元分别对应PID控制器的三个可调参数比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 、微分系数 $k_D$ ，隐含层的神经元个数 $m$ 由以下公式计算设置：

$$[0038] \quad m = \sqrt{n+o+l}$$

[0039] 其中， $n$ 为输入层神经元个数， $o$ 为输出层神经元个数， $l$ 为 $[1, 10]$ 之间常数；

[0040] 标准的Sigmoid激活函数在输入趋向无穷的地方函数值变化很小，且当输入值波动较大时，输出值落在平坦区域，导致计算结果误差较大，容易缺失梯度，不利于神经网络的反馈传输，甚至出现发散现象。

[0041] 本发明通过引入比例参数和位移参数来改进标准激活函数，设置得到改进的Sigmoid激活函数 $g_{\text{imp}}(x)$ ：

$$[0042] \quad g_{\text{imp}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

[0043] 其中， $\alpha$ 为比例因子，取值范围为 $(0, 1)$ ； $\beta$ 为位移因子，取值范围为 $(-1, 1)$ 。

[0044] BP神经网络输出层的变换函数设置中，设置PID的三个可调参数均不能为负值，输出层神经元的变换函数取为非负的。

[0045] 标准的Sigmoid激活函数图像如图2(a)所示，改进的Sigmoid激活函数图像如图2(b)所示。改进的Sigmoid激活函数不容易缺失梯度，神经网络模型更容易学习训练的数据集，有效的提高了神经网络的收敛速度。

[0046] 由此，神经网络PID模块中采用了改进BP神经网络模块来优化PID的控制方法，在实现机器人模型最佳PID控制的同时，引入比例参数和位移参数来改进BP神经网络中的Sigmoid激活函数，来加快神经网络收敛速度。

[0047] 采用以上BP神经网络的隐含层神经元个数设置和改进的Sigmoid激活函数来优化系统PID参数，对增量式PID系统控制率 $u_z(t)$ 分别对输出层的输出求偏导，分别得到神经网络PID控制的三个可调的PID参数——比例系数 $k_p$ 、积分系数 $k_I$ 、微分系数 $k_D$ 的网络偏差：

$$[0048] \quad c_p = \frac{\partial u(t)}{\partial O_1^{(3)}(t)} = e(t) - e(t-1)$$

$$[0049] \quad c_I = \frac{\partial u(t)}{\partial O_2^{(3)}(t)} = e(t)$$

$$[0050] \quad c_D = \frac{\partial u(t)}{\partial O_3^{(3)}(t)} = e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)$$

[0051] 其中， $c_p$ 表示比例系数 $k_p$ 的网络偏差， $c_I$ 为积分系数 $k_I$ 的网络偏差， $c_D$ 为微分系数 $k_D$ 的网络偏差， $O_w^{(3)}$ 为输出层的三个输出参数， $w$ 表示第一参数，第二参数，第三参数， $w=1, 2, 3$ ； $e(t)$ 表示时刻 $t$ 下逆解补偿模块输出的期望关节角与测量设备测量获得的实际关节角之

间的偏差；

[0052] 进而利用三个PID参数得到基于改进Sigmoid激活函数的增量式PID系统控制率 $u_{zs}(t)$ ：

[0053]  $u_{zs}(t) = u_{zs}(t-1) - k_p c_p - k_i c_i + k_d c_d$

[0054] 其中, $u_{zs}(t)$ 表示t时刻的增量式PID系统控制率；

[0055] 由此本发明使用改进Sigmoid激活函数的增量式PID系统控制率来实现机器人运动轨迹跟踪控制,以提高机器人的运动轨迹精度。

[0056] 本发明通过神经网络迭代补偿对机器人的各关节误差进行补偿,提高机器人的逆解精度,降低关节误差对运动轨迹精度的影响。通过改进神经网络PID控制实现机器人运动轨迹的动态跟踪,提高机器人的运动轨迹精度。

[0057] 本发明的神经网络PID模块对来自逆解补偿模块的数据和来自机器人输出接口的数据进行处理后,通过机器人输入接口控制机器人按照预期轨迹运动。本发明适用于焊接、喷涂、打磨等运动轨迹精度要求较高的场合。

[0058] 本发明具有的收益效果是：

[0059] 1) 神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法,能够对机器人的各关节误差进行迭代补偿,直至各个关节误差值降低至要求的阈值范围内,可有效的提高机器人的逆解精度,进而实现机器人的高精度运动控制。

[0060] 2) 改进激活函数的增量式PID系统控制方法,利用改进Sigmoid激活函数算法对BP神经网络进行优化,可解决传统的Sigmoid激活函数在输入趋向无穷的地方函数值变化小,且当输入值波动较大时,输出值落在平坦区域,导致计算结果误差较大,容易缺失梯度,不利于神经网络的反馈传输等问题,改进Sigmoid激活函数的增量式PID系统控制方法,可提高系统的收敛速度,并能对控制参数的实时调整。

[0061] 3) 本发明利用神经网络算法的优点,通过神经网络迭代补偿方法和改进激活函数的PID控制方法来实现对机器人运动轨迹的跟踪控制,能有效的降低机器人各关节误差,提高轨迹跟踪精度,改善系统的控制品质。

[0062] 4) 本发明在机器人的运动控制应用中,可有效降低机器人各关节误差的影响,提高运动轨迹跟踪精度,适用于焊接、喷涂、打磨等运动轨迹精度要求较高的场合。

## 附图说明

[0063] 图1是本发明方法组成框图；

[0064] 图2是改进Sigmoid函数示意图；

[0065] 图3是本发明的实施例实验结果图。

[0066] 图中:1、轨迹跟踪系统,2、工业机器人,3、测量设备,4、轨迹规划模块,5、逆解补偿模块,6、BP神经网络逆解模块,7、神经网络迭代补偿模块,8、神经网络PID模块,9、改进BP神经网络模块,10、PID控制模块,11、机器人输入接口,12、机器人输出接口,13、测量控制模块,14、测量输入接口,15、测量输出接口,16、误差分析模块。

## 具体实施方式

[0067] 下面结合附图和实施例对本发明加以详细说明。

[0068] 本发明的实施例具体如下：

[0069] 具体实施系统如图1所示，包括工业机器人2、测量设备3和轨迹跟踪系统1，轨迹跟踪系统1分别和工业机器人2、测量设备3连接，工业机器人2和测量设备3连接，工业机器人2、测量设备3和轨迹跟踪系统1共同构建闭环的工业机器人运动轨迹跟踪系统；工业机器人2末端法兰上安装有与测量设备配套的随动靶球。

[0070] 轨迹跟踪系统1包括轨迹规划模块4、逆解补偿模块5、神经网络PID模块8、机器人输入接口11、机器人输出接口12、测量控制模块13、测量输入接口14、测量输出接口15和误差分析模块16；轨迹规划模块4依次经逆解补偿模块5、神经网络PID模块8、机器人输入接口11和工业机器人2的输入端连接，工业机器人2的输出端经机器人输出接口12和PID控制模块10连接；轨迹规划模块4和误差分析模块16连接，误差分析模块16经测量输出接口15和测量设备3的输出端连接，测量控制模块13经测量输入接口14和测量设备3的输入端连接。

[0071] 轨迹跟踪系统通过机器人输入接口和机器人输出接口与工业机器人进行互联，获取工业机器人数据和控制机器人运动。轨迹跟踪系统通过测量输入接口和测量输出接口与测量设备进行互联，获取测量设备测得数据和控制测量设备工作。

[0072] 在轨迹跟踪系统中，轨迹规划模块4分别与逆解补偿模块5和误差分析模块16互联，逆解补偿模块5包括相互连接的BP神经网络逆解模块6和神经网络迭代补偿模块7，轨迹规划模块4生成期望运动轨迹并传输给逆解补偿模块5中BP神经网络逆解模块6，BP神经网络逆解模块6进行末端位姿和关节角的转换后将结果发送到神经网络迭代补偿模块7进行，神经网络迭代补偿模块7根据关节角结果补偿反馈到末端位姿进行修正；最终由BP神经网络逆解模块6输出最后的关节角结果到神经网络PID模块8；

[0073] 逆解补偿模块5连接至神经网络PID模块8，神经网络PID模块8包括改进BP神经网络模块9和PID控制模块10，改进BP神经网络模块8连接至PID控制模块10，通过PID控制模块10对BP神经网络逆解模块6发送过来的关节角结果和测量设备3发送过来的实际关节角数据进行分析反馈控制，通过改进BP神经网络模块9对PID控制模块10内的控制参数进行改进调整优化。

[0074] 改进BP神经网络模块9为改进Sigmoid激活函数的BP神经网络模块。神经网络PID模块8不是机器人本体基本电机控制的PID模块，是在控制器中处在基本电机控制的PID模块前的神经网络PID模块。

[0075] 测量设备3为激光跟踪仪，测量设备3测量工业机器人2末端位姿采用的组件为随动靶球，随动靶球固定在工业机器人2末端的法兰上。

[0076] 本发明的实例中，工业机器人2为新松SR4C型六自由度工业机器人，其有效工作范围为672.8mm，有效负载为4kg，重复定位精度为0.03mm。测量设备3为海克斯康公司的Leica AT960绝对激光跟踪仪，该跟踪仪的测量分辨率为0.3 $\mu$ m，测量精度为10 $\mu$ m。轨迹跟踪系统1采用Qt开发环境设计研制的改进神经网络PID控制的轨迹跟踪系统，使用TCP/IP的网络通信协议与工业机器人2进行互联。在轨迹跟踪过程中，激光跟踪仪的靶球固定在工业机器人末端法兰盘上，激光跟踪仪实时跟踪并测量出工业机器人末端位置坐标。

[0077] 如图1所示，本发明实施例的具体实施过程为：

[0078] 步骤一，轨迹跟踪系统1中的轨迹规划模块4在笛卡尔空间下规划出期望运动轨迹，规划出来的期望运动轨迹通过逆解补偿模块5中的BP神经网络逆解模块6将规划的末端

执行器的位置、速度、加速度映射到关节空间并解算出各个关节误差大小,再通过神经网络迭代补偿模块7将各个关节误差迭代补偿,直至达到机器人控制精度的范围内。

[0079] 逆解补偿模块5由BP神经网络逆解模块6和神经网络迭代补偿模块7组成。BP神经网络逆解模块6采用6输入6输出的网络对数据集进行训练,模块的输入数据是机器人末端位姿数据,输出数据是关节角数据。BP神经网络逆解模块6通过训练调节网络内部权值和阈值使得网络误差最小。BP神经网络逆解模块6与神经网络迭代补偿模块7相连,逆解补偿模块5通过两次BP神经网络逆解和运动学正解分别计算出关节误差和末端位姿误差矩阵,并对末端位姿误差进行迭代补偿直至关节误差满足设定阈值。具体操作流程如下:

[0080] 首先输入机器人末端50个点的目标位姿 $T_f$ ,通过BP神经网络逆解得到50组关节角 $\theta_f$ ,根据50组关节角 $\theta_f$ 求出包含误差的机器人末端50个点的实际位姿 $T'_f$ ,再将其通过BP神经网络逆解得到新的50组关节角 $\theta_{f+1}$ ,计算出关节误差 $\Delta E$ ,判断关节误差 $\Delta E$ 是否满足设置的阈值要求,如果满足要求,输出BP神经网络逆解得到新的50组关节角 $\theta_{f+1}$ ,结束迭代;如果不满足要求,计算出机器人末端50个点的位姿误差 $\Delta T$ 。误差补偿采用新的50个点的目标位姿 $T_{f+1}$ 作为下一循环的输入,继续迭代补偿直到误差满足设定的阈值范围内即可停止计算。

[0081] 实施例中神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪实验中,分别进行了50个点的神经网络误差迭代补偿实验(a),和改进神经网络PID控制的机器人直线轨迹准确度实验(b)。实验(a)中进行了神经网络误差迭代补偿前后对比实验,如图3(a)所示实验结果表明,迭代补偿前平均位置误差为12.638mm,迭代一次补偿后平均位置误差为1.83mm,迭代两次补偿后平均位置误差为0.172mm,可以看出经过两次神经网络误差迭代补偿后,极大的降低了位置误差,提高了逆解精度。

[0082] 步骤二,

[0083] 逆解补偿模块5输出的关节数据和机器人输出接口12输出的实际数据均传输至神经网络PID模块8,神经网络PID模块8对数据进行分析处理,将偏差的比例 $k_p$ 、积分 $k_I$ 、微分 $k_D$ 三个参数通过线性组合的方式对其进行控制,使得偏差越来越小,直至趋于零。神经网络PID模块8通过机器人输入接口11控制工业机器人2末端沿着期望运动轨迹运动。

[0084] 神经网络PID模块8包括PID控制模块10和改进BP神经网络模块9。改进BP神经网络模块9,在网络执行过程中,利用BP神经网络的自学习能力与网络内部权值和阈值的调整,来优化系统性能的PID参数。

[0085] PID控制模块10,通过调节比例系数 $k_p$ ,积分系数 $k_I$ ,微分系数 $k_D$ ,直接对受控对象进行系统的闭环控制。PID控制模块10采用独立关节位置增量式PID控制,通过输入各个关节期望的位置、速度、加速度,输出相应的补偿力矩,然后发送至电机伺服驱动器生成相应目标电流来控制机器人运动。

[0086] 神经网络PID模块8中采用了改进BP神经网络模块9来优化PID的控制方法,在实现机器人模型最佳PID控制的同时,引入比例参数和位移参数来改进BP神经网络中的Sigmoid激活函数,来加快神经网络收敛速度。

[0087] BP神经网络隐含层神经元个数设置中,神经网络输出层的三个输出神经元分别对应PID控制器的三个可调参数比例系数 $k_p$ ,积分系数 $k_I$ ,微分系数 $k_D$ ,所以设置输出层神经元个数为3,输入层神经元个数为4,隐含层神经元个数可由Kolmogorov经验公式取其为6。

[0088] BP神经网络输出层的变换函数设置中,由于PID的三个可调参数均不能为负值,所

以输出层神经元的变换函数取为非负的标准Sigmoid函数,但由于标准的Sigmoid激活函数在输入趋向无穷的地方函数值变化很小,且当输入值波动较大时,输出值落在平坦区域,导致计算结果误差较大,容易缺失梯度,不利于神经网络的反馈传输,甚至出现发散现象。为此,通过引入比例参数 $\alpha=0.5$ 和位移参数 $\beta=0$ 来改进标准激活函数,得到改进的Sigmoid激活函数 $g_{\text{imp}}(x)$ :

$$[0089] \quad g_{\text{imp}}(x) = \frac{1}{1+e^{-0.5x}}$$

[0090] 其中,标准的Sigmoid激活函数图像如图2(a)所示,改进的Sigmoid激活函数图像如图2(b)所示。

[0091] 采用以上BP神经网络隐含层神经元个数设置方法和改进的Sigmoid激活函数,来优化系统PID参数,网络的学习率设置为0.5,对增量式PID系统控制率 $u_z(t)$ 分别对输出层的输出求偏导分别得到神经网络PID控制的三个可调参数比例系数 $k_p$ ,积分系数 $k_I$ ,微分系数 $k_D$ 的网络偏差,最终得到基于改进Sigmoid激活函数的增量式PID系统控制率 $u_{zs}(t)$ :

$$[0092] \quad u_{zs}(t) = u_{zs}(t-1) - k_p c_p - k_I c_I + k_D c_D$$

[0093] 其中,三个参数在1.05时间内就自适应地达到了稳定值 $k_p=0.8762$ 、 $k_I=0.0765$ 、 $k_D=0.8752$ ,神经网络调节PID参数的过程是很短的。最后,通过改进的神经网络调节PID控制率来实现机器人运动轨迹跟踪控制,以提高机器人的运动轨迹精度。

[0094] 步骤三,测量控制模块13通过测量输入接口14控制测量设备3跟踪并测量工业机器人2末端轨迹数据,测量设备3通过随动靶球实时跟踪测量工业机器人2末端轨迹数据,并通过测量输出接口15传输至误差分析模块16。误差分析模块16对来自轨迹规划模块4的期望运动轨迹数据和来自测量设备3的实际轨迹数据进行分析处理,给出轨迹跟踪精度。

[0095] 实施例中神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪实验,实验(b)中进行了改进神经网络PID控制的机器人直线轨迹准确度对比实验。如图3所示实验结果表明,利用神经网络迭代补偿的方法实现工业机器人直线轨迹跟踪控制实验,跟踪前后的实验结果如下表所示。

准确度 mm	最大误差	最小误差	平均误差
跟踪前	2.12	1.32	1.673
PID 控制后	1.45	0.93	1.119
改进神经网络PID控制后	0.91	0.24	0.527

[0097] 对比实验结果显示:采用改进神经网络PID控制的工业机器人直线轨迹准确度最大误差比跟踪前降低了57%,平均误差比跟踪前降低了68.5%。实施例中实验验证了本发明给出的一种神经网络迭代补偿的工业机器人轨迹跟踪方法在提高工业机器人运动精度的可行性和有效性。

[0098] 由此,本发明不仅可以有效的提高工业机器人运动轨迹精度,结合对机器人的运动控制还可实现自适应控制,提高跟踪控制精度。

[0099] 上述具体实施方式用来解释说明本发明,而不是对本发明进行限制,在本发明的

精神和权利要求的保护范围内,对本发明做出的任何修改和改变,都落入本发明的保护范围。

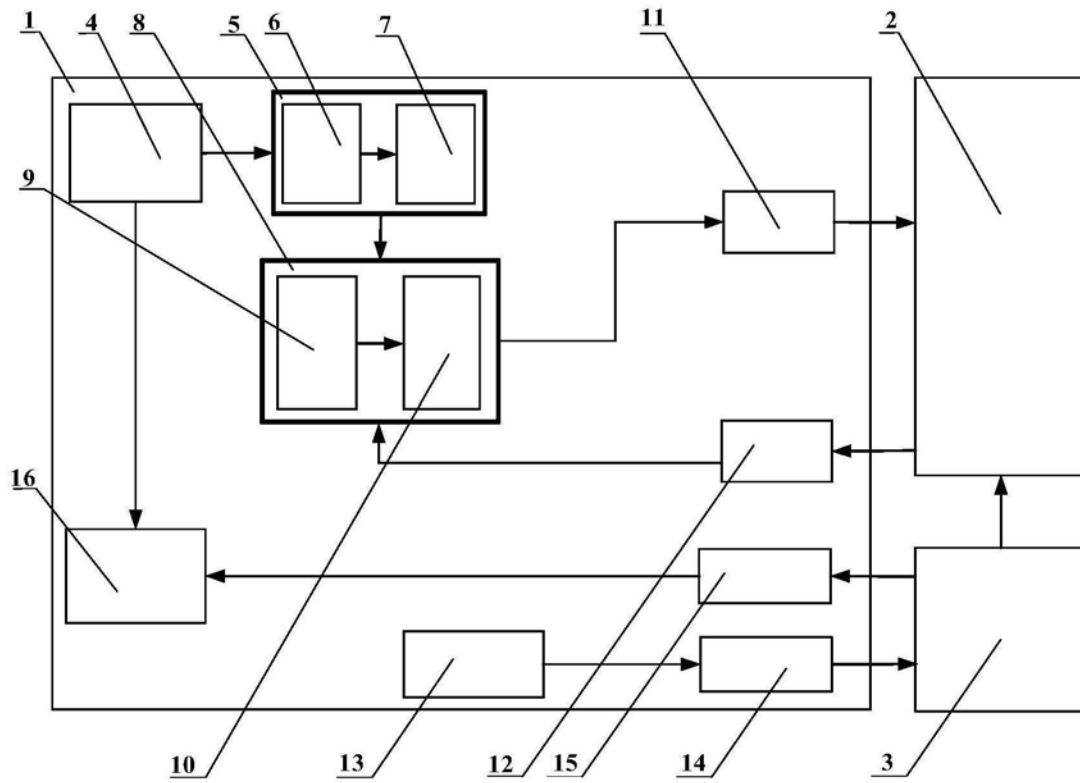
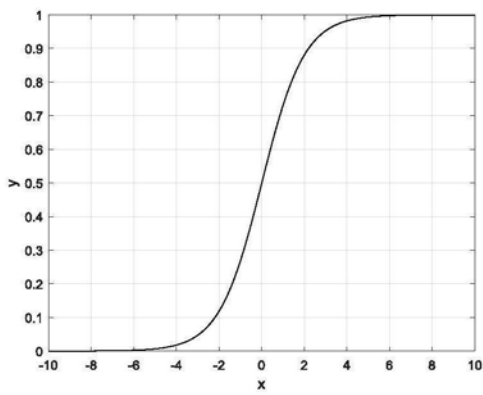
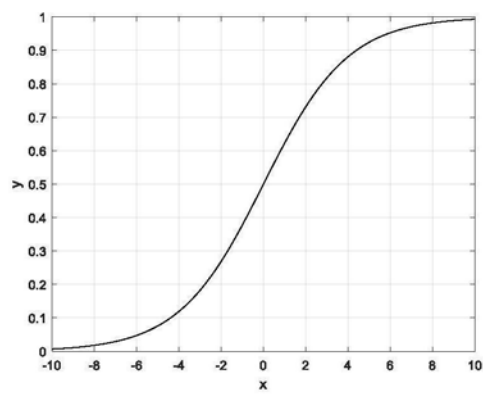


图1

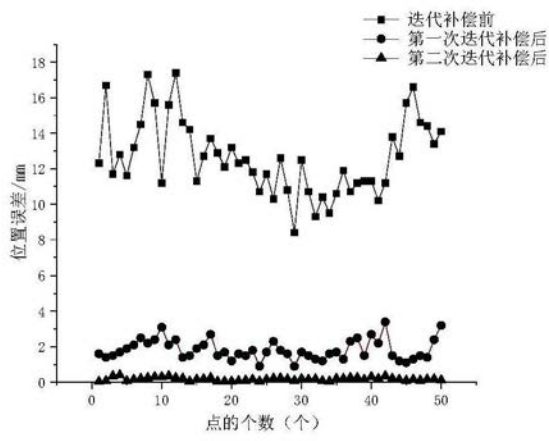


(a)

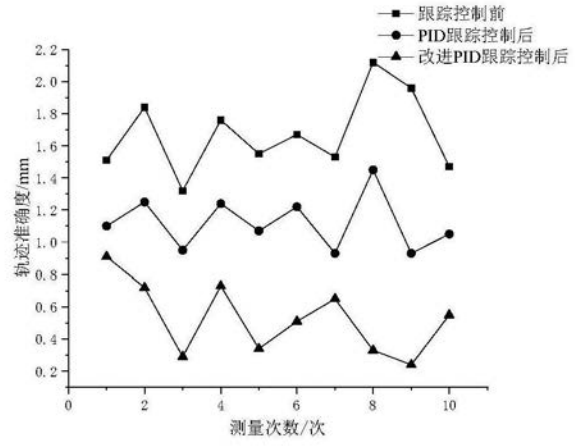


(b)

图2



(a)



(b)

图3