



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112025242 A

(43) 申请公布日 2020.12.04

(21) 申请号 202010876074.7

(22) 申请日 2020.08.27

(71) 申请人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 朱秋国 颜超杰 邹鹏 吴俊 熊蓉

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司 33200

代理人 邱启旺

(51) Int. Cl.

B23P 19/00 (2006.01)

B25J 11/00 (2006.01)

B25J 9/16 (2006.01)

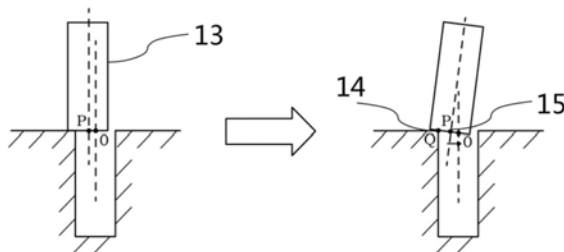
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法,该方法通过结合基于多层感知器的顶层搜孔轨迹规划器模型和底层力位混合控制器实现机械臂搜孔;所述顶层搜孔轨迹规划器模型的输入为工件接触插孔产生的力/力矩信息,输出为下一步动作方向。由于本发明方法基于多层感知器,且采集数据的过程中,相同位置变化情况下,力/力矩特征变化会更加明显,在经过神经网络训练后的搜孔实际应用阶段,具有更好的抗干扰能力和更高的成功率;本发明在常见的工业机器人平台上具有一定的通用性,不需要人工进行干预,有效提升了装配效率,对于轴孔装配任务具有更好的适应能力。



1. 一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,通过结合基于多层感知器的顶层搜孔轨迹规划器模型和底层力位混合控制器等实现。所述顶层搜孔轨迹规划器模型的输入为工件接触插孔产生的力/力矩信息,输出为下一步动作方向。

所述力/力矩信息由以下步骤得到:首先机械臂末端粗定位至插孔位置附近,调整机械臂旋转腕部关节,使装配工件下表面与插孔位置平面呈一定角度 $\alpha$ 。然后机械臂竖直向下移动,末端产生接触力 $F$ ;每次接触后,机械臂转动工件,使腕部关节绕其 $x$ 轴旋转相同的角度 $\alpha$ ,使工件有回到垂直于插孔位置平面的趋势,使工件不仅有平移运动的趋势,更有旋转运动产生的力矩,采集此时的力和力矩数据得到力/力矩信息。

所述下一步动作方向包括向上、向下、向左、向右。

2. 如权利要求1所述基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,所述角度 $\alpha$ 为5~10度。

3. 如权利要求1所述基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,所述接触力 $F$ 为10~15N。

4. 如权利要求1所述基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,所述顶层搜孔轨迹规划器模型由以下步骤训练得到:

(1) 数据采集:首先控制机械臂末端移动到插孔位置的正中心,然后控制机械臂遍历孔中心周围一系列的离散点,获取各点的力/力矩信息 $[F_x, F_y, M_x, M_y]$ ;其中, $F_x, F_y$ 为 $x, y$ 方向的接触力, $M_x, M_y$ 为腕部关节 $x, y$ 轴上的力矩;

(2) 数据标记:为步骤(1)获取的各点标记为了到达插孔位置所需的下一步动作方向的类别标签,具体为:将各点的位置数据减去插孔中心的位置数据,得到各点的相对位置 $d_x, d_y, d_z$ ,按照如下规则给每个离散点采集到的数据打上标签:

如果 $d_y < d_x$ 且 $d_y < -d_x$ ,标签类别为0,代表向上移动;

如果 $d_y > d_x$ 且 $d_y > -d_x$ ,标签类别为1,代表向下移动;

如果 $d_y > -d_x$ 且 $d_y < d_x$ ,标签类别为2,代表向左移动;

如果 $d_y > d_x$ 且 $d_y < -d_x$ ,标签类别为3,代表向右移动。

(3) 根据步骤(1)和(2)获得的数据训练多层感知器得到顶层搜孔轨迹规划器模型。

5. 如权利要求1所述基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,所述底层力位混合控制器在垂直于插孔平面的方向采用阻抗控制,设置期望力为 $F$ 。

6. 如权利要求1所述基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,所述顶层搜孔轨迹规划器模型使用ReLU函数作为激活函数,使用反向传播算法来学习训练网络参数。

7. 如权利要求6所述基于多层感知器的机械臂搜孔方法,其特征在于,所述反向传播算法为Adam算法。

## 一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于轴孔装配领域,尤其涉及一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法。

### 背景技术

[0002] 作为“制造业皇冠顶端的珍珠”,工业机器人已经被广泛应用在汽车、3C制造、船舶制造等现代工业自动化领域。其高精度、长时间工作的特点使工业机器人常用来协助人类完成一些精度高、工作强度大、重复性高的工作。在一些工作环境恶劣,人类自身安全受到威胁的领域,机器人也有广泛的应用。随着我国人口老龄化和劳动力愈发短缺问题的出现,工业机器人的作用也愈发重要。我国对工业机器人在制造业中所扮演的角色也十分重视,已经将其列入《中国制造2025》国家发展规划的重点发展对象。

[0003] 工业机器人在轴孔装配领域的应用一直是工业机器人研究领域的热点之一,在汽车轮胎装配、航空业大零件装配、电子元件3C生产线等领域都有广泛的应用。工业机器人在轴孔装配中搜孔阶段需要考虑的问题主要有轴孔对齐和接触力控制。其中,轴孔对齐主要指调整机械臂末端的位置和姿态,使机械臂末端夹取的工件轴与插孔位置对齐,从而消除轴孔之间相对偏差的过程;机械臂的接触力控制是指控制机械臂末端夹取的工件轴与孔所在表面之间的力。在搜孔过程中,机械臂会与外界环境接触,接触力过小会使机械臂末端夹取工件脱离孔所在表面,接触力过大会导致工件或机械臂的损坏,所以控制机械臂末端力十分重要。

[0004] 综合来看,轴孔装配中基于人工智能的搜孔方法主要有基于多层感知器的搜孔控制方法。该方法基于视觉传感器和多层感知器(MLP)的顶层搜孔控制器设计,首先通过视觉传感器获得插孔位置的粗定位,接近插孔位置。在精确定位调整过程中,运用多层感知器训练得到力传感器获得的信息和搜孔方向的映射关系,来获得机械臂下一个周期的运动控制策略。但是该方法在数据采集过程中,机械臂末端夹取工件与插孔位置表面相对平行的接触采集方法,在步进位置变化小的情况下,采集到的力/力矩信息变化小,特征不明显,加上真实环境中存在噪声和接触力抖动的干扰,其成功率和抗干扰能力受到限制。随着人工智能技术的快速发展和越来越多地被应用在工业机器人环境中,使用神经网络训练的方法,输入的数据对于整体模型的训练效果有很大的影响,更加有效地采集数据有利于提升整体模型的控制效果与成功率。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于针对现有技术的不足,提供一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法。

[0006] 本发明的目的通过以下技术方案实现:一种基于多层感知器的机械臂搜孔方法,通过结合基于多层感知器的顶层搜孔轨迹规划器模型和底层力位混合控制器实现;所述顶层搜孔轨迹规划器模型的输入为工件接触插孔产生的力/力矩信息,输出为下一步动作方向;

[0007] 所述力/力矩信息由以下步骤得到:首先机械臂末端粗定位至插孔位置附近,调整机械臂旋转腕部关节,使装配工件下表面与插孔位置平面呈一定角度 $\alpha$ ;然后机械臂竖直向下移动,末端产生接触力 $F$ ;每次接触后,机械臂转动工件,使腕部关节绕其 $x$ 轴旋转相同的角度 $\alpha$ ,使工件有回到垂直于插孔位置平面的趋势,使工件不仅有平移运动的趋势,更有旋转运动产生的力矩,采集此时的力和力矩数据得到力/力矩信息;

[0008] 所述下一步动作方向包括向上、向下、向左、向右。

[0009] 进一步地,所述角度 $\alpha$ 为5~10度。

[0010] 进一步地,所述接触力 $F$ 为10~15N。

[0011] 进一步地,所述顶层搜孔轨迹规划器模型由以下步骤训练得到:

[0012] (1) 数据采集:首先控制机械臂末端移动到插孔位置的正中心,然后控制机械臂遍历孔中心周围一系列的离散点,获取各点的力/力矩信息 $[F_x, F_y, M_x, M_y]$ ;其中, $F_x, F_y$ 为 $x, y$ 方向的接触力, $M_x, M_y$ 为腕部关节 $x, y$ 轴上的力矩;

[0013] (2) 数据标记:为步骤(1)获取的各点标记为了到达插孔位置所需的下一步动作方向的类别标签,具体为:将各点的位置数据减去插孔中心的位置数据,得到各点的相对位置 $d_x, d_y, d_z$ ,按照如下规则给每个离散点采集到的数据打上标签:

[0014] 如果 $d_y < d_x$ 且 $d_y < -d_x$ ,标签类别为0,代表向上移动;

[0015] 如果 $d_y > d_x$ 且 $d_y > -d_x$ ,标签类别为1,代表向下移动;

[0016] 如果 $d_y > -d_x$ 且 $d_y < d_x$ ,标签类别为2,代表向左移动;

[0017] 如果 $d_y > d_x$ 且 $d_y < -d_x$ ,标签类别为3,代表向右移动。

[0018] (3) 根据步骤(1)和(2)获得的数据训练多层感知器得到顶层搜孔轨迹规划器模型。

[0019] 进一步地,所述底层力位混合控制器在垂直于插孔平面的方向采用阻抗控制,设置期望力为 $F$ 。

[0020] 进一步地,所述顶层搜孔轨迹规划器模型使用ReLU函数作为激活函数,使用反向传播算法来学习训练网络参数。

[0021] 进一步地,所述反向传播算法为Adam算法。

[0022] 本发明的有益效果是:本发明使用改进的数据采集方法,首先使机械臂竖直向下移动,产生15N的接触力。同时,在进行每次接触之后,机械臂以接触点为中心,转动末端工件沿逆时针方向旋转,即绕着腕部 $x$ 轴旋转微小角度,使工件有回到竖直状态的趋势,使工件有不仅有平移运动的趋势,也有旋转运动产生的力矩。采集得到的数据与论文中的方法对比,具有更加明显的力特征,在经过神经网络训练后,在搜孔实际应用阶段,具有更好的抗干扰能力,且成功率也有较大提升。整体的搜孔数据采集过程中,不需要人工进行干预,有效提升了装配效率,在整体应用过程中具有更好的应用性。

## 附图说明

[0023] 图1是工业机器人和轴孔装配工件整体架构图;

[0024] 图2是搜孔流程示意图;

[0025] 图3是搜孔数据采集离散点分布示意图;

[0026] 图4是数据阶段末端位姿示意图;

- [0027] 图5是多层感知器网络配置示意图；
- [0028] 图6是力位混合控制器控制框图；
- [0029] 图1中，工业机器人执行器1、外部力传感器2、装配工件3、插孔位置4、工业摄像机5；
- [0030] 图2中，工业机器人初始位置6、接触状态7、搜孔阶段8、插入阶段9；
- [0031] 图3中，插孔位置10、插孔中心11、离散采样点12；
- [0032] 图4中，原数据采集方法工件位姿13、接触点Q14、末端工件轴中心点15；
- [0033] 图5中，输入层16、隐藏层17、输出层18；
- [0034] 图6中，顶层轨迹规划器19、机器人位置环20、阻抗控制器21、机器人速度环22、坐标变换23、重力补偿24、力传感器25。

### 具体实施方式

[0035] 以下结合附图进一步说明本发明。

[0036] 工业机器人轴孔装配的结构如图1所示，主要由工业机器人执行器1、外部力传感器2、装配工件3、插孔位置4、工业摄像机5组成。其中工业机器人执行器1末端腕部装有外部力传感器2，用来测量末端夹取工件与环境接触所受的力/力矩信息。工业机器人执行器1末端夹取装配工件3，其任务是使装配工件3搜索到插孔位置4并将装配工件3插入到插孔位置4。通过工业摄像机5的引导，机械臂可以获得装配工件3和插孔位置4的粗定位信息，从而将装配工件3移动到插孔位置4附近。下文将对该搜孔方法作出详细说明。

[0037] 本发明提出的在轴孔装配中基于多层感知器 (MLP) 的顶层轨迹规划器控制方法将顶层轨迹规划器和底层力位混合控制器结合起来，通过底层力位混合控制器使工业机器人执行器1末端与环境保持安全稳定的接触，用于搜孔任务。通过多层感知器 (MLP) 训练得到力/力矩信息和下一步动作方向的映射关系模型，作为顶层轨迹规划器，预测下一步过程工件动作方向。这种方法在高精度轴孔装配任务应用中被证明有效可靠。

[0038] 下文将基于MLP的顶层轨迹规划器训练方法和底层力位混合控制器控制方法在实施过程中的步骤作出详细说明，本发明整体搜孔流程图如图2所示，总共包含以下几个过程：到达初始位置6、驱动机械臂使装配工件与插孔位置为接触状态7、搜孔阶段8、插入阶段9。

[0039] 通过多层感知器 (MLP) 训练得到力/力矩信息与下一步的动作方向的过程包括数据采集、数据标注、神经网络搭建与训练、模型保存几个方面。MLP多层感知器也属于人工神经网络中的一种，不过多层感知器 (MLP) 可以应用于非线性可分的场合。一组输入向量经过多层感知器处理后被映射为另一组输出向量，输入向量被传输到隐藏层再到输出层，逐步处理。MLP被用来训练一个四分类器，输入是机械臂末端传感器采集的力/力矩数据，输出为机械臂下一步采取的搜孔方向。

[0040] 数据采集阶段，如图3所示，采样对象包括插孔位置10、插孔中心11、离散采样点12。对插孔位置10采集数据过程如下：首先控制机械臂移动到插孔中心11 (精确定位)，即轴孔无相对位姿偏差，之后控制机械臂遍历孔周围一系列的离散采样点12，并记录下各离散采样点12的状态信息。根据实际应用经验，插孔位置10的粗定位误差一般在10mm之内，故该方法控制机械臂遍历以孔为中心，边长为20mm的正方形区域。其中遍历的步进增量为

0.2mm,因此最终可以采集到101\*101条数据用于基于MLP多层感知器的顶层轨迹规划器的训练任务。

[0041] 特别地,如图4所示,在机械臂遍历离散采样点12的过程中,机械臂腕部关节进行旋转,与插孔位置10平面呈微小角度。首先使机械臂竖直向下移动,使装配工件与插孔位置在接触点Q14产生接触,产生15N的接触力。同时,在进行每次接触之后,机械臂以接触点Q14为中心,转动末端工件沿逆时针方向旋转,即绕着腕部关节x轴旋转微小角度,使工件有回到竖直状态的趋势,使工件不仅有平移运动的趋势,也有旋转运动产生的力矩,采集并记录此时的力/力矩数据。通过这种方法采集的力/力矩数据的特征变化更为明显,与原数据采集方法工件位姿13相比,更有利于多层感知器训练得到表现更为良好的顶层规划器模型。

[0042] 数据标注阶段,根据数据采集阶段采集到的数据,将每个离散采样点12获得的力/力矩信息 $[F_x, F_y, M_x, M_y]$ 作为输入数据,并根据位置数据标记采样点的类别标签。本发明中将采样点分为四个类别:即向上移动、向下移动、向左移动、向右移动。四个类别代表了机械臂在搜孔过程中的四个移动方向。 $F_x, F_y$ 为x、y方向的接触力, $M_x, M_y$ 为腕部关节x、y轴上的力矩。

[0043] 打标签的具体方法如下,首先将采集到的位置数据减去初始位置数据,得到的xyz方向上的相对位置 $d_x, d_y, d_z$ ,接着按照如下规则给每个离散采样点12采集到的数据打上标签:

[0044] 如果 $d_y < d_x$ 且 $d_y < -d_x$ ,标签类别为0,代表向上移动;

[0045] 如果 $d_y > d_x$ 且 $d_y > -d_x$ ,标签类别为1,代表向下移动;

[0046] 如果 $d_y > -d_x$ 且 $d_y < d_x$ ,标签类别为2,代表向左移动;

[0047] 如果 $d_y < -d_x$ 且 $d_y > d_x$ ,标签类别为3,代表向右移动。

[0048] 神经网络搭建与训练阶段,其多层感知器模型示意图如图5所示,包括输入层16、隐藏层17、输出层18。基于多层感知器(MLP),构建网络结构为4-100-50-4的神经网络,即四输入四输出的分类器模型。其中有两个隐藏层16,每层的神经元数目分别为100个和50个。其输入的数据为4维向量 $[F_x, F_y, M_x, M_y]$ ,输出为类别标签0,1,2,3,分别代表机械臂下一步的动作方向。同时,需要对输入数据做归一化处理,便于神经网络训练。多层感知器使用ReLU函数作为激活函数,使用反向传播算法中的Adam算法来学习训练人工神经网络参数。

[0049] 训练完毕后,人工神经网络会返回一个基于MLP的分类器模型,将这个模型保存到磁盘文件中即可为以后的搜孔过程提供指导。

[0050] 在搜孔过程中,其力位混合控制器控制框图如图6所示,包括机器人位置环20、阻抗控制器21、机器人速度环22。顶层轨迹规划器19根据力传感器25输入,输出机械臂下一个时刻的动作方向给机器人位置环20,使机械臂末端夹取的工件产生x、y方向的平移运动。阻抗控制器21用于在机械臂末端Z轴方向施加15N的力,保证装配工件3与插孔位置4稳定接触。力传感器25在机械臂启动时,获得Z轴力数据,对装配工件3进行重力补偿24,消除装配工件自身重量对高精度轴孔装配的影响。

[0051] 通过训练得到的基于多层感知器的顶层规划器模型和底层力位混合控制器模型相结合,即可适应高精度轴孔装配的搜孔工作。

[0052] 本发明在工业机器人搜孔调试过程中,主要关注多层感知器的学习率、力位混合控制器的参数、数据采集时机械臂末端工件的搜索步长等变量的调试,同时还需要获取工

业机器人平台控制周期、可重复精度等参数。

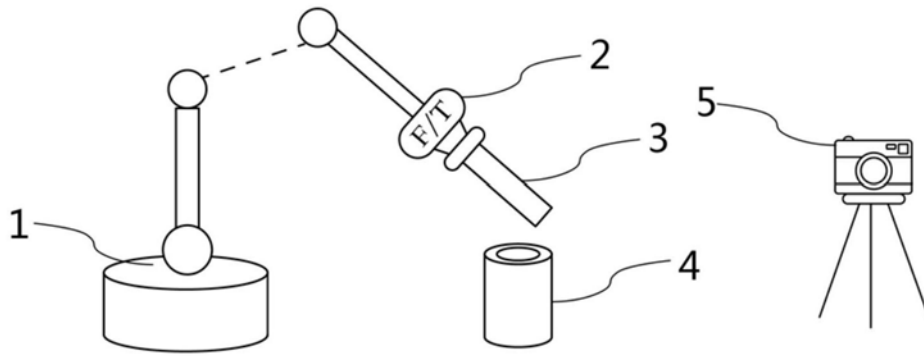


图1

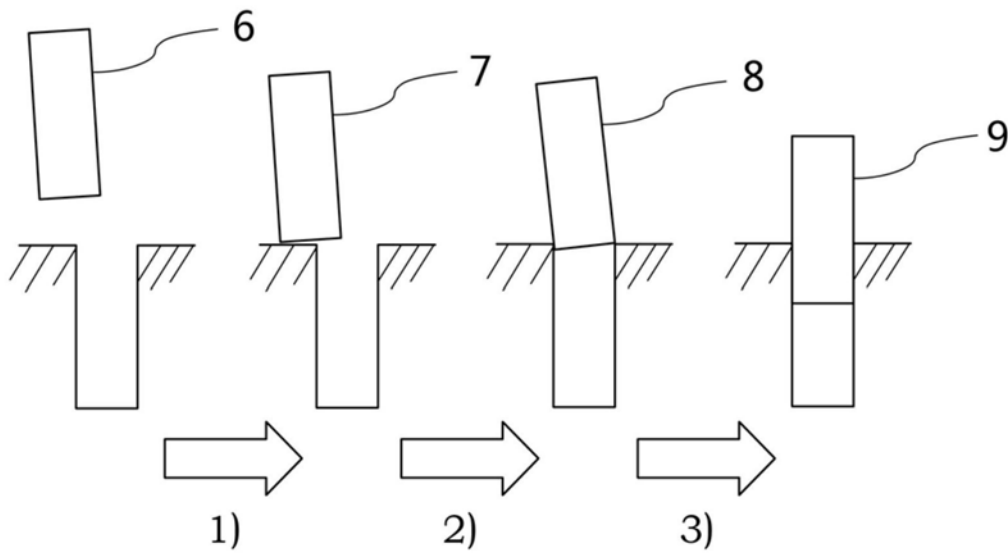


图2



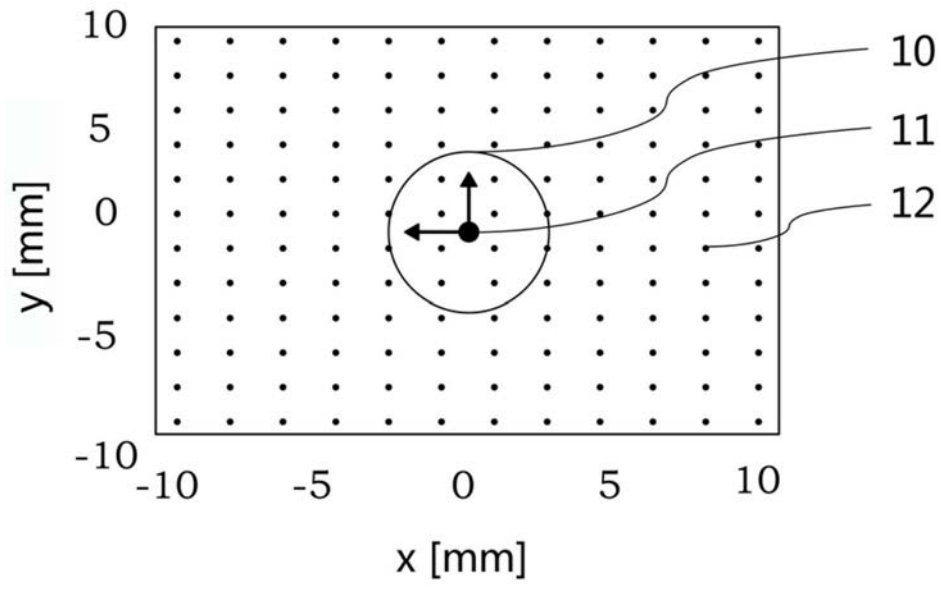


图3

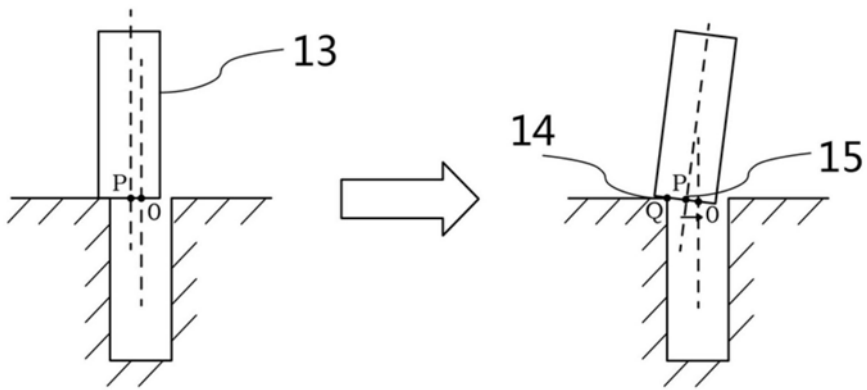


图4

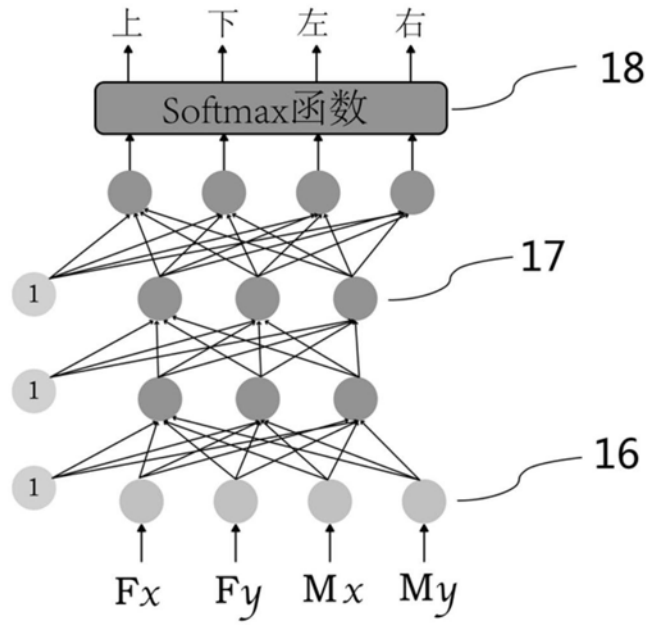


图5

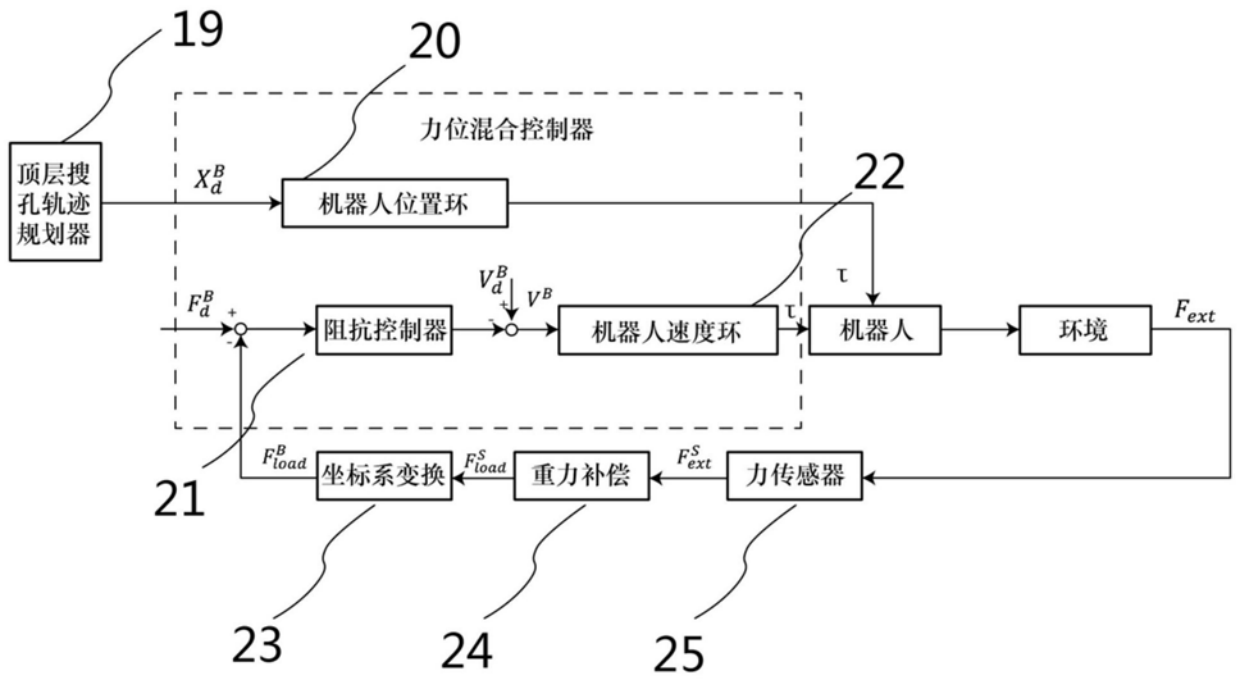


图6