



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111645093 A

(43)申请公布日 2020.09.11

(21)申请号 202010438350.1

(22)申请日 2020.05.22

(71)申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园100号

(72)发明人 于建均 李绪晨 左国玉 于乃功

张子豪 贾捷

(74)专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司 11203

代理人 刘萍

(51) Int. Cl.

B25J 13/08(2006.01)

B25J 3/04(2006.01)

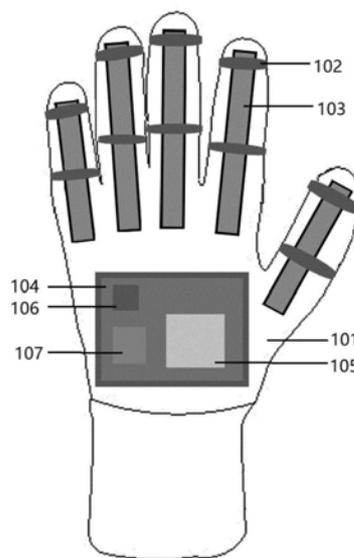
权利要求书3页 说明书7页 附图5页

(54)发明名称

一种用于遥操作的力觉反馈数据手套

(57)摘要

本发明涉及一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,属于人工智能与人机交互领域。本发明将应变片式弯曲传感器与微型气缸相结合,组成应用于虚拟操作以及遥操作的具有力反馈的数据手套。通过固定于手指背部的弯曲传感器测量人手各个手指关节实时运动的弯曲角度,然后将采集信息应用指尖映射算法,经过正逆运动变换实现远端机械手与主端操作手的运动映射。再将将从端机械手的力觉信息转换为输入至于掌心的微型气缸的气压值,经过对微型气缸充气从而实现力觉反馈。本发明大大降低了传统数据手套的成本,同时实现了主端操作手与从端机械手的力觉反馈,大大增加了人机交互系统的实时性与交互性。



1. 一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在於,包括:

所涉及的力反馈数据手套包含两部分,手背处的运动捕捉部份和掌心处的力觉反馈部份;

手背处的运动捕捉部份包括:手套主体部份(101),通过固定绑带(102)固定在手指外侧的五个弯曲传感器(103),固定在手背的pcb集合电路板(104),镶嵌在pcb板子上的微型处理器(105)、姿态检测传感器(106)以及通信器(107),并通过导线与之相连接;与pc机相连接的信号接收器;

掌心处的力觉反馈部份包括:固定于掌心处的两个机械底座(111),用虎克铰(108)将两个机械底座连接;通过三个十字轴(110)将三个微型气缸(109)与机械底座连接;气缸末端用固定绑带与手套指尖末端固定;通过空气压缩机经由过滤器,油雾分离器,电磁阀,比例阀,对微型气缸进行充气;

步骤(1)将弯曲传感器固定在手套手指部份的外侧;在手套手背处安装微型处理器,姿态传感器以及通讯单元,通过导线将各部份连接;在手套掌心处安装三个微型气缸,活塞末端固定在手套的手指末端,气缸底座通过十字轴与机械底座相连接,气缸可随人手运动自由活动;

步骤(2)对手部的实时运动进行运动捕捉,通过固定在手背部的弯曲传感器跟随手指运动发生形变,间接测出手指的弯曲程度;再通过正逆运动学算法转换得到从端机械手的关节角度信息,通过通信环节实现主手到从手的运动映射;

步骤(3)获取从端机械手的反馈力,通过通信环节传递给主手端的力反馈手套,设计出力控制系统;将反馈的力觉信息经过系统转换成输入微型气缸的气压值,通过对气缸充气实现力觉的反馈。

2. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在於:步骤一中对于弯曲传感器的选择,选用应变片式弯曲传感器。

3. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在於:步骤一中为实现手部姿态检测,考虑到人手运动,选用加速度计。

4. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在於:步骤二中通过弯曲传感器采集到的手指弯曲度信息,基于笛卡尔坐标系建立手的运动模型,已知手指的关节转角,通过正向运动学,获得手指关节及指尖的位置.把手看作一个关节链接的铰链结构,按照旋转矩阵转移坐标系建立手指的运动方程;食指、中指、无名指和小指在结构上是一样的,每个手指有4个转动关节和4个自由度,根据转动轴方向的不同,手掌侧摆角度为 θ_1 、掌指关节角度 θ_2 、近端指间关节角度为 θ_3 、远端指间关节角度为 θ_4 ,掌指关节长度为 l_1 、近端指间关节长度为 l_2 、远端指间关节长度为 l_3 ,即相应两个z轴之间的距离;

手指运动类型有侧摆和屈曲,分别在食指的掌指关节、近端指间关节、远端指间关节以及指尖处建立坐标系,模型的基坐标设在食指指骨与掌骨的交叉连接处.通过旋转矩阵,建立关节坐标在直角坐标系之间的转换,坐标系i和坐标系k之间的坐标转换为:

$$A_i^k = A_i^{i-1} A_{i-1}^{i-2} \dots A_{k+1}^k$$

其中坐标系i与坐标系i-1之间的齐次变换矩阵及利用正向运动学计算指尖坐标:

$$A_4^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -c_1 s_{234} & s_1 & (l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2) c_1 \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & -c_1 & (l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2) s_1 \\ s_{234} & c_{234} & 0 & -(l_3 s_{234} + l_2 s_{23} + l_1 s_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:

$$s_i = \sin \theta_i, c_i = \cos \theta_i$$

$$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

$$s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k), c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$$

计算得出指尖坐标 $(x_{tip}, y_{tip}, z_{tip})$ 即为 A_4^0 最后一列, 其中

$$\text{指尖X轴坐标: } x_{tip} = l_3 c_1 c_{234} + l_2 c_1 c_{23} + l_1 c_1 c_2$$

$$\text{指尖Y轴坐标: } y_{tip} = l_3 s_1 c_{234} + l_2 s_1 c_{23} + l_1 s_1 c_2$$

$$\text{指尖Z轴坐标: } z_{tip} = -l_3 s_{234} - l_2 s_{23} - l_1 s_2。$$

5. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套, 其特征在于: 步骤二中主手到从手的运动映射, 由于人手与机器人灵巧手在尺寸上的不一致, 导致了主从手指尖运动空间映射的困难. 主从手的各个手指及关节的结构尺寸是不一致的, 导致主从手映射时存在运动空间不一致的问题, 针对主从手尺寸不一致的问题, 引入主从手指节长度比例关系:

$$l'_{i,j} = k_{i,j} \times l_{i,j}$$

其中 i 是手指编号, j 是指节编号, l 和 l' 分别是主从手指节的长度, 因此 $l'_{i,j}$ 为从手第 i 手指第 j 关节的长度, $l_{i,j}$ 为主手第 i 手指第 j 关节的长度; 其中从手长度 l' 固定, 主手长度 l 因人而异可以通过测量得出, k 为尺寸比例系数即主端人手与从端机械手的长度比例, $k_{i,j}$ 为主从手第 i 手指第 j 关节的长度比值;

手掌的侧摆角度 θ_1 可由计算得出的指尖坐标 $(x_{tip}, y_{tip}, z_{tip})$ 根据三角函数理论得出:

$$\tan \theta_1 = \frac{y_{tip}}{x_{tip}}, \theta_1 = \arctan \frac{y_{tip}}{x_{tip}}$$

根据手指本身的连动结构可知, 远端指间关节角度 θ_4 与近端指间关节角度 θ_3 角度比例为 $\frac{2}{3}$, 即:

$$\theta_4 = \frac{2}{3} \theta_3$$

针对主从手指尖运动映射, 用从手长度 l' 替换掉主手长度 l , 得到指尖映射下从手的相应关节角度信息:

$$\frac{1}{l'_1} \cos\left(\frac{2}{3}\theta_3\right) + \frac{1}{l'_2} \cos\left(\frac{5}{3}\theta_3\right) + \frac{1}{l'_3} \cos \theta_3$$

$$= \frac{\left(\frac{x_{tip}}{\cos \theta_1}\right)^2 + (l'_3 s_{34} + l'_2 s_3) c_2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2) s_2^2 - l_1'^2 - l_2'^2 - l_3'^2}{2l'_1 l'_2 l'_3}$$

上式为关于近端指间关节角度 θ_3 的三角方程,无解析解,采用迭代方法求解其数值解;先通过二分法找到满足上述方程的近端指间关节角度 θ_3 的值,再用牛顿法进行迭代运算求得近端指间关节角度 θ_3 终值,进而可知远端指间关节角度 θ_4 ,根据指尖z轴坐标可得出掌指关节角度 θ_2 :

$$\theta_2 = \arctan \frac{(l'_3 s_{34} + l'_2 s_3) c_2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2) s_2}{\pm \sqrt{(l'_3 s_{34} + l'_2 s_3)^2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2)^2 - (l'_3 s_{34} + l'_2 s_3) c_2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2) s_2^2}} - \arctan \frac{l'_3 s_{34} + l'_2 s_3}{l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2}$$

6. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在于:步骤三中力觉反馈系统的设计,力觉反馈数据手套另一大功能是将虚拟手产生的虚拟力反馈到操作者手上,形成力觉;力觉是否真实需要解决两个问题一是反馈力控制策略的问题,虚拟手只有在抓取到物体时才产生虚拟力,与被抓取的虚拟对象未发生碰撞时并不需要力反馈数据手套的气缸动作,二是因被抓取的虚拟对象不同,产生的虚拟力的大小不一样,这就要求手套的气缸供气压力是可控的;

选择二位三通电磁阀,双线圈控制,一个线圈瞬间通电后关闭电源、阀打开,另一个线圈瞬间通电后关闭电源、阀关闭;初始时,二位三通电磁阀逆向导通,气体不能从气缸进气口进入,只能排气,人手可以与气缸一起自由运动;虚拟手产生虚拟力时,计算气缸所需要的供气压力,调节压力比例阀产生对应压力所需要的输入电压,二位三通阀导通,对应压力的气体就直接作用于气缸活塞上产生与虚拟力同大小的推力,作用到操作者手上,最终实现力觉的反馈。

7. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在于:步骤三中力反馈数据手套能够输出反馈力的大小直接由驱动器决定,气缸的输出力计算公式为:

$$F = \frac{\pi}{4} P D^2 - f$$

式中:

F-气缸输出力,N;

D-活塞直径,mm;

P-供气压力,Mpa;

f-活塞运动时活塞与缸筒之间的滑动摩擦阻力,N。

8. 根据权利要求1所述的一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征在于步骤二、三中力反馈数据手套的主手端与从手端系统通信采用基于Internet网络通信方式;由操作者佩戴手套进行手部运动,手套采集的主手运动信息通过Internet通信环节传递给远端的机械手或者虚拟环境中的虚拟手,从而控制从手的运动;当从端机械手与环境交互时,从手感知的力觉信息又通过Internet通信环节反馈给主端的力反馈手套,最终实现力觉反馈。

一种用于遥操作的力觉反馈数据手套

技术领域

[0001] 本发明属于智能机器人领域,涉及一种用于遥操作的力觉反馈数据手套。

背景技术

[0002] 如今,人类的探索活动已经遍及世界各个角落,这些探索活动的危险性和复杂性日益增加,比如空间机器人维修、深海探索以及排除、拆解核化设施等。这些任务完成的复杂度以及精确度要求也日益提高,预编程执行器已经很难应付复杂多变的任务场景。同时操作员直接进入现场作业会对操作人员带来不可预知的人身伤害,出于对操作者安全的考虑,需要有足够可靠的执行设备进入现场代替操作人员进行这些作业,避免对人的直接的伤害,同时也能节省人力成本,提高效益。遥操作机器人是通过人对场景进行分析并做出决策,进而指导机器人去完成任务,由人和一系列中间环节共同构成一套遥操作机器人系统。而人机交互设备则是遥操作机器人系统的核心支撑设备,它用以传递操作者的控制意图以及向操作者反馈现场的信息。由于结合了人类所独有的应变决策能力以及机器人的执行能力,这些复杂而又危险的任务都能被更好地完成。

[0003] 传统的人机交互设备一般只能实现视觉的交互,而 to 增加虚拟现实系统的沉浸感以及交互性,力觉和触觉的感知是不可或缺的。遥操作系统的操作者需要具有交互作用的远处场景的感觉,即要求对物体轮廓表面及抓握力进行探测和感知。在遥操作中,由于缺乏触觉感知反馈手段,而使许许多多的信息源很难反馈和显示给异地的用户,从而难以实现更加全面的人机交互作用。显而易见,没有基于虚拟现实的接触觉、力觉感知反馈作用,就很难满足各种工程实际应用的要求。

[0004] 目前力觉接触交互接口很多,而具有力觉反馈的数据手套“力觉反馈数据手套”则是实现人机接触交互的理想接口装置之一。在现实世界中,人类对外部世界的作用大多是通过自己的手与物体的接触交互进行的。在此过程中,人手对物体产生作用力,并从物体得到触觉和力觉反馈。因此,力反馈数据手套作为人机交互接口设备的一种重要形式,对其进行研究和探索具有重要的理论意义和极高的应用价值。

发明内容

[0005] 本发明提出一种用于遥操作的力反馈数据手套的,首先基于弯曲传感器和微型气缸设计出力反馈手套的硬件系统,通过将设计好的手套佩戴于人手,利用手指背部的弯曲传感器捕捉人手手指的弯曲度,采用指尖映射算法将采集到的手指弯曲信息经过正逆运动学的变化转化成从端机械手的关节角度信息,实现主从手的运动映射。再将从端的反馈的虚拟力换算成冲入微型气缸所需要的气压来实现力的反馈。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0007] 一种用于遥操作的力觉反馈数据手套,其特征包括:

[0008] 所涉及的力反馈数据手套包含两部分,手背处的运动捕捉部份和掌心处的力觉反馈部份。

[0009] 手背处的运动捕捉部份包括;手套主体部份,通过固定绑带固定在手指外侧的五个弯曲传感器,固定在手背的pcb集合电路板,镶嵌在pcb板子上的微型处理器、姿态检测传感器以及通信器,并通过导线与之相连接。与pc机相连接的信号接收器。

[0010] 掌心处的力觉反馈部份包括:固定于掌心处的两个机械结构,两两个机械结构用虎克铰连接。通过三个十字轴将三个微型气缸与机械底座连接。气缸末端用固定绑带与手套指尖末端固定。通过空气压缩机经由过滤器,油雾分离器,电磁阀,比例阀,对微型气缸进行充气。

[0011] 步骤(1)将弯曲传感器固定在手套手指部份的外侧。在手套手背处安装微型处理器,姿态传感器以及通讯单元,通过导线将各部份连接;在手套掌心处安装三个微型气缸,活塞末端固定在手套的手指末端,气缸底座通过十字轴与机械底座相连接,气缸可随人手运动自由活动。

[0012] 步骤(2)对手部的实时运动进行运动捕捉,通过固定在手指背部的弯曲传感器跟随手指运动发生形变,间接测出手指的弯曲程度;再通过正逆运动学算法转换得到从端机械手的关节角度信息,实现主手到从手的运动映射。

[0013] 步骤(3)获取从端机械手的反馈力,设计输出力控制系统。将反馈的力觉信息经过系统转换成输入微型气缸的气压值,通过对气缸冲气实现里觉得反馈。

[0014] 作为优选,步骤1中弯曲传感器选择精度高,测量范围广,频率响应特性好的金属应变片式传感器,当应变片发生形变引起阻值变化,通过转换电路转变成电量输出,电量变化的大小反应手指弯曲角度,实现手指变化角度的测量。

[0015] 作为优选,步骤1中微型气缸的选择,考虑到整个力反馈数据手套的结构为内骨架式,为了尽可能地满足人手的运动范围,选择缸径小,行程大的cjd2d10-30-b双耳环型微型气缸。

[0016] 作为优选,步骤2中应用精确度更高的指尖映射算法完成主手到从手的运动映射,基于笛卡尔坐标系建立手部运动模型,通过正向运动学获取手指关节及指尖位置,再经过逆向运动学处理对应到从端机械手的具体关节角度,实现运动映射。

[0017] 作为优选,步骤3中建立完整的气动控制系统,通过空气压缩机经由过滤器,油雾分离器,电磁阀,比例阀,对微型气缸进行充气,实现反馈力。

附图说明

[0018] 图1为力反馈数据手套的运动捕捉模块的硬件结构图;

[0019] 图2为力反馈数据手套的力觉反馈模块的硬件结构图;

[0020] 图3为力反馈数据手套的运动捕捉模块的控制系统组成框图;

[0021] 图4为力反馈数据手套的力觉反馈模块控制系统组成框图;

[0022] 图5为本发明所涉及系统工作总流程图;

[0023] 图6为人手的运动模型图;

[0024] 图7为笛卡尔坐标系下人手的模型图;

[0025] 图8为牛顿迭代法的算法流程图;

[0026] 图9为气动自动化系统图;

[0027] 图10为遥操作系统框图;

[0028] 图11为从端机械手；

具体实施方案

[0029] 下面结合附图对本发明作进一步说明。

[0030] 本发明涉及一种基于遥操作应用的气动力反馈数据手套的设计。整个遥操作系统由主端系统,时延通讯环节,从端系统三大部分组成,端系统主端系统是通过控制本地的设备,控制虚拟场景的运动,生成遥操作指令再通过Internet,将遥操作指令发送到从端系统。

[0031] 主端系统包括虚拟外设即设计的力反馈数据手套与主端服务器。它能够驱动主端数据手套进行运动,并将一部分反馈信息(主要是力反馈)反馈给操作者。遥操作命令的生成、数据的传递、数据的处理、力反馈数据手套控制都是在主端服务器上完成的。数据手套实时地测量人手各个关节角度的变化,再由计算机通过采样信号控制器对各个传感器进行信号采样和处理,即可将用户手的姿态和动作信息传递给计算机。

[0032] Internet作为一个通信环节将主端和从端连接在一起。

[0033] 从端系统接收由主端系统传递过来遥操作命令,并把从端系统中的一些关键系统反馈给主端系统,再反馈到操作者,便于操作者根据实际情况调整遥操作命令。即从端的机械手(如图11)接收主端由数据手套检测得到的人手运动信息(包含关节角度,运动速度等)转化成自身的运动信息实现实时的运动映射。同时在对从端环境进行交互时,位于从端机械手上的传感器(力觉传感器等)对环境信息进行感知,最终将感知到的环境信息通过从端服务器经由Internet传递回主端服务器,经由手套将反馈信息传递给人手。

[0034] 1. 硬件设计:

[0035] 图1为数据手套的运动捕捉模块,主要包括一支普通手套,五个应变片式弯曲传感器,一个姿态检测传感器,ATmega328P微型控制器,蓝牙通信模块以及电池模块。

[0036] 图2为数据手套力反馈模块,主要包括三个微型气缸,机械连接结构,以及整个气动系统。

[0037] ATmega328P控制器安装在手套背部的pcb板上,是整个手部运动捕捉模块的核心。ATmega328P控制器其核心处理器为AVR,该控制器集成六通道PWM,8路A/D转换通道,23个I/O端口,具有高性能低功耗的特点,适用于多传感器连接,满足放生机器人系统的控制要求。

[0038] 五个应变片式弯曲传感器用固定绑带安装在手套五个手指的背部,采用的是美国SPECTRASymbol Flex4.5单向弯曲传感器,长度112.24mm宽6.35mm,接口为2-Pin金属引脚,弯曲电阻变化范围为60k-110k欧姆。

[0039] 姿态检测传感器安装在手套背部的pcb板上,用于检测整个手掌的运动姿态,考虑到人手运动范围较小,选择六轴加速度计MPU6050,可准确追踪快速与慢速动作。模块内部带电压稳定电路,可以兼容3.3V/5V的嵌入式系统。保留了MPU6050的I2C接口,满足访问底层测量数据的需求。采用数字滤波技术,能有效降低测量噪声,提高测量精度。模块内部集成了姿态解算器,配合动态卡尔曼滤波算法,能够在动态环境下准确输出模块的当前姿态,姿态测量精度0.01度。

[0040] 电源模块为控制系统提供直流电,采用输出电压为3.7V的锂电池,容量300mAh,尺寸为30mm×20mm×3mm。配置一个电压转换器,将3.7V转换成5V。

[0041] 三个微型气缸安装在手套掌心处,通过机械结构两两相互连接,分别与手套的大拇指,食指和无名指连接。微型气缸采用的是cjd2d10-30-b双耳环型微型气缸,缸径为10mm,使用压力0.06-0.7MPa,气缸行程30mm。

[0042] 2.本发明所述数据手套系统工作的总流程图如图5所示。首先由数据手套的运动捕捉模块对手运动进行采集,然后,经过指尖映射算法在从端机械手上完成对主手的运动映射。接着对从端机械手输入一个反馈力,将反馈的力信号传递到主手的微型气缸,通过气动系统对微型气缸冲气实现相应的力反馈。所述用于遥操作的力反馈数据手套系统包括以下步骤:

[0043] (1) 利用设计完成的手套运动捕捉模块对手部运动信息进行采集。首先对手模型进行分析。人手共19块骨骼和16个关节。骨骼通过关节相连,不会发生变形,骨骼的运动决定了人手的姿态。手指的运动方式有两种弯曲伸展和内收外展。末端指关节和近端指关节只能进行弯曲或者伸展,相当于机械运动副的转动副,只有一个转动自由度。掌骨指关节不但能进行弯曲或者伸展运动,还能进行内收或者外展运动,相当于机械运动副中的球销副,具有两个转动自由度。通过以上分析可以得出人手运动简图模型如图6所示。

[0044] (2) 对采集到的主手的运动信息经过指尖运动映射算法转换成从端机械手的关节角度信息,实现主手到从手的运动映射。对于指尖位置的计算基于笛卡尔儿坐标系随手部建立运动学模型如图7所示。

[0045] 已知手指的关节转角,通过正向运动学,获得手指关节及指尖的位置。把手看作一个关节链接的铰链结构,按照旋转矩阵转移坐标系建立手指的运动方程。食指、中指、无名指和小指在结构上是一样的,每个手指有4个转动关节和4个自由度,根据转动轴方向的不同,关节角度分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 ,1长度为0,连杆2、3、4的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 ,即相应两个z轴之间的距离。以食指为例,参照手指运动简图,求解其运动学方程:

[0046] 手指运动类型有侧摆和屈曲,分别在食指MCP、PIP、DIP(掌指关节、近端指间关节、远端指间关节)以及指尖处建立坐标系,模型的基坐标设在食指指骨与掌骨的交叉连接处。通过旋转矩阵,建立关节坐标在直角坐标系之间的转换,坐标系i和坐标系k之间的坐标转换为

$$[0047] \quad A_i^k = A_i^{i-1} A_{i-1}^{i-2} \dots A_{k+1}^k$$

[0048] 其中坐标系i与坐标系i-1之间的齐次变换矩阵及利用正向运动学计算指尖坐标的过程如下:

$$[0049] \quad A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_i & \cos \alpha_i s_i & -\sin \alpha_i s_i & l_i c_i \\ -s_i & \cos \alpha_i c_i & -\sin \alpha_i c_i & -l_i s_i \\ 0 & \sin \alpha_i & c_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0050] \quad A_1^0 = \text{rot}(z_0, \theta_1) \text{rot}(x_1, \alpha_1) = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0051] \quad A_2^1 = \text{rot}(z_1, \theta_2) \text{rot}(x_2, \alpha_2) = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0052] \quad A_3^2 = \text{rot}(z_2, \theta_3) \text{rot}(x_3, \alpha_3) = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_2 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0053] \quad A_4^3 = \text{rot}(z_3, \theta_4) \text{rot}(x_4, \alpha_4) = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & l_3 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & l_3 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3$$

$$[0054] \quad = \begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -c_1 s_{234} & s_1 & (l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2) c_1 \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & -c_1 & (l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2) s_1 \\ s_{234} & c_{234} & 0 & -(l_3 s_{234} + l_2 s_{23} + l_1 s_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0055] 式中 $\text{rot}(A, B)$ 表示绕A轴旋转角度B所产生的变换矩阵. 指尖坐标 $(x_{\text{tip}}, y_{\text{tip}}, z_{\text{tip}})$ 为 A_4^0 最后一列。

$$[0056] \quad x_{\text{tip}} = l_3 c_1 c_{234} + l_2 c_1 c_{23} + l_1 c_1 c_2$$

$$[0057] \quad y_{\text{tip}} = l_3 s_1 c_{234} + l_2 s_1 c_{23} + l_1 s_1 c_2$$

$$[0058] \quad z_{\text{tip}} = -l_3 s_{234} - l_2 s_{23} - l_1 s_2$$

[0059] 其中:

$$[0060] \quad s_i = \sin \theta_i, c_i = \cos \theta_i$$

$$[0061] \quad s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

$$[0062] \quad s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k), c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$$

[0063] 人手与机器人灵巧手在尺寸上的一致, 导致了主从手指尖运动空间映射的困难. 主从手的各个手指及关节的结构尺寸是不一致的, 导致主从手映射时存在运动空间不一致的问题, 针对主从手尺寸不一致的问题, 引入主从手指节长度比例关系:

$$[0064] \quad l'_{i,j} = k_{i,j} \times l_{i,j}$$

[0065] 其中 i 是手指编号, j 是指节编号, l 和 l' 分别是主从手指节的长度, 从手长度固定, 主手长度因人而异可以通过测量得出, k 为尺寸比例系数即主端人手与从端机械手的长度比例。

[0066] 利用已知的指尖坐标, 经过正逆运动学变化求解从端机械手关节角度信息. 最终实现从端机械手的运动映射。

[0067] 已知由正运动学求解得出的指尖坐标为:

$$[0068] \quad x_{\text{tip}} = l_3 c_1 c_{234} + l_2 c_1 c_{23} + l_1 c_1 c_2$$

$$[0069] \quad y_{\text{tip}} = l_3 s_1 c_{234} + l_2 s_1 c_{23} + l_1 s_1 c_2$$

[0070] $z_{tip} = -l_3 s_{234} - l_2 s_{23} - l_1 s_2$

[0071] 由式前两个式子及三角函数理论可得侧摆的角度 θ_1 满足以下方程:

[0072] $\tan \theta_1 = \frac{y_{tip}}{x_{tip}}, \theta_1 = \arctan \frac{y_{tip}}{x_{tip}}$

[0073] 根据手指关节PIP, DIP本身的连动结构可知,远端指关节角度 θ_4 与近端指关节角度 θ_3 角度比例为 $\frac{2}{3}$,即:

[0074] $\theta_4 = \frac{2}{3} \theta_3$

[0075] 由 y_{tip} 与 z_{tip} 的表达式可知:

[0076] $l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2 = \frac{x_{tip}}{\cos \theta_1} = \frac{y_{tip}}{\sin \theta_1}$

[0077] 针对主从手指尖运动映射,用从手长度 l' 替换掉主手长度 l ,得到指尖映射下从手的相应关节角度信息:

$$\frac{1}{l'_1} \cos\left(\frac{2}{3}\theta_3\right) + \frac{1}{l'_2} \cos\left(\frac{5}{3}\theta_3\right) + \frac{1}{l'_3} \cos \theta_3$$

[0078]
$$= \frac{\left(\frac{x_{tip}}{\cos \theta_1}\right)^2 + (l'_3 s_{34} + l'_2 s_3) c_2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2) s_2^2 - l'_1{}^2 - l'_2{}^2 - l'_3{}^2}{2l'_1 l'_2 l'_3}$$

[0079] 上式为关于近端指间关节角度 θ_3 的三角方程,无解析解,采用迭代方法求解其数值解。先通过二分法找到满足上述方程的近端指间关节角度 θ_3 的值,再用牛顿法进行迭代运算求得近端指间关节角度 θ_3 终值,进而可知远端指间关节角度 θ_4 ,根据指尖 z 轴坐标可得出掌指关节角度 θ_2 :

[0080]
$$\theta_2 = \arctan \frac{(l'_3 s_{34} + l'_2 s_3) c_2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2) s_2}{\pm \sqrt{(l'_3 s_{34} + l'_2 s_3)^2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2)^2 - (l'_3 s_{34} + l'_2 s_3) c_2 + (l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2) s_2^2}} - \arctan \frac{l'_3 s_{34} + l'_2 s_3}{l'_3 c_{34} + l'_3 c_3 + l'_2}$$

[0081] (3) 力反馈的实现是将从端机械手产生的力反馈到操作者手上,形成为力觉手套的气动系统控制如图8所示。

[0082] 选择二位三通电磁阀,双线圈控制,一个线圈瞬间通电后关闭电源、阀打开,另一个线圈瞬间通电后关闭电源、阀关闭。初始时,二位三通电磁阀逆向导通,气体不能从气缸进气口进入,只能排气,人手可以与气缸一起自由运动。虚拟手产生虚拟力时,计算气缸所需要的供气压力,调节压力比例阀产生对应压力所需要的输入电压,二位三通阀导通,对应压力的气体就直接作用于气缸活塞上产生与虚拟力同大小的推力,作用到操作者手上,最终实现力觉反馈。设计的气动自动化系统如图9所示。

[0083] 力反馈数据手套能够输出反馈力的大小直接由驱动器的性能决定,气缸的输出力计算公式为:

$$[0084] \quad F = \frac{\pi}{4}PD^2 - f$$

[0085] 式中:

[0086] F-气缸输出力,N;

[0087] D-活塞直径,mm;

[0088] P-供气压力,Mpa;

[0089] f-活塞运动时活塞与缸筒之间的滑动摩擦阻力,N;

[0090] 3. 通系统稳定性分析:Internet作为一个通信环节将主端和从端连接在一起。在Internet上传输数据按照包传输协议通信,当数据被一个交换机转发给下一个交换机时,就产生了时延。而数据包的路由选择能影响Internet上包的交换和所路过节点的处理策略,致使Internet通讯时延成为一个随机变量。具有通信时延的遥操作系统如图10所示。

$$[0091] \quad \text{主手: } f_h = M_m \dot{v}_m + B_m v_m + u_{dm}$$

$$[0092] \quad \text{从手: } u_d = M_s \dot{v}_s + B_s v_s + f_s$$

$$[0093] \quad \text{环境: } f_e = M_e \dot{v}_s + B_e v_s + K_e \int v_s dt, \quad f_e = f_s$$

[0094] 其中M、B、K分别表示质量,阻尼和弹性系数,均可认为测量,下标m、s、e分别表示主手、从手、和环境, v_m, v_s 表示主从手的速度。 f_k 为操作者对主手的作用力, f_e 为主手和环境的相互作用力。 u_d 为主手对从手的控制, u_{dm} 为从手反馈给主手的状态。

[0095] 通讯环节:由计算机网络构成。

[0096] 理想状态(即无通信时延):

$$[0097] \quad u_d(t) = u_m(t)$$

$$[0098] \quad u_{dm}(t) = u_s(t)$$

[0099] 在计算机网络有时延的情况下,设主手到从手的传输时延为 $T_R(t)$ 、从手到主手的传输时延为 $T_L(t)$:

$$[0100] \quad u_d(t) = u_m(t - T_R(t))$$

$$[0101] \quad u_{dm}(t) = u_s(t - T_L(t))$$

[0102] 在没有时延的情况下,其控制律通常设计为:

$$[0103] \quad u_m(t) = \begin{pmatrix} x_m(t) \\ v_m(t) \end{pmatrix}, \quad \bar{x}_s(t) = \begin{pmatrix} x_s(t) \\ v_s(t) \end{pmatrix}$$

$$[0104] \quad u_d(t) = F(u_m(t) - \bar{x}_s(t))$$

$$[0105] \quad u_{dm}(t) = f_s(t)$$

[0106] 而实际中只能:

$$[0107] \quad u_d(t) = F(u_m(t - T_R(t)) - \bar{x}_s(t))$$

$$[0108] \quad u_{dm}(t) = f_s(t - T_L(t))$$

[0109] 这样由于时延的存在,实际中必然导致系统操作性能的降低,甚至使系统不稳定。采用“操作-等待-操作”的方法,该方法解决了系统的稳定性问题并能完成操作任务,但操作者易于疲劳。

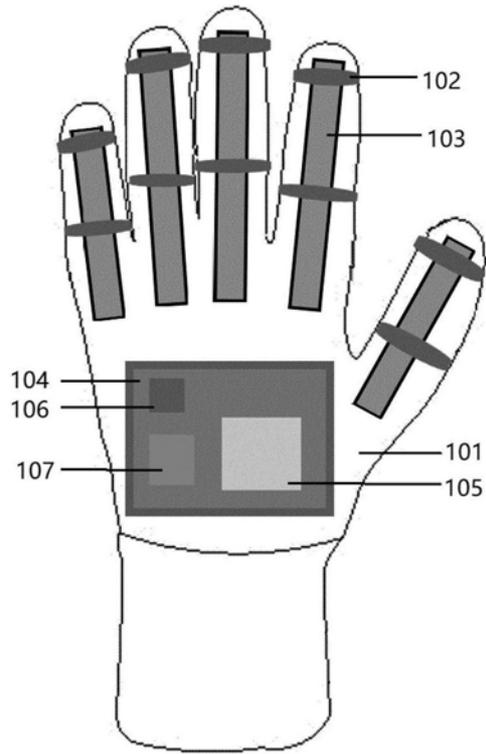


图1

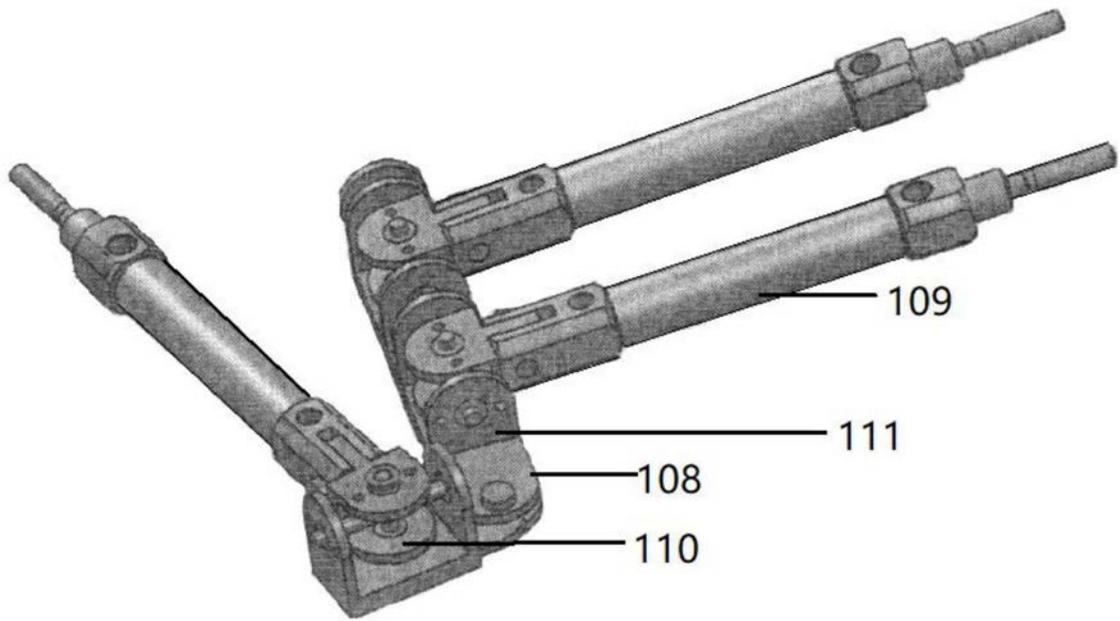


图2

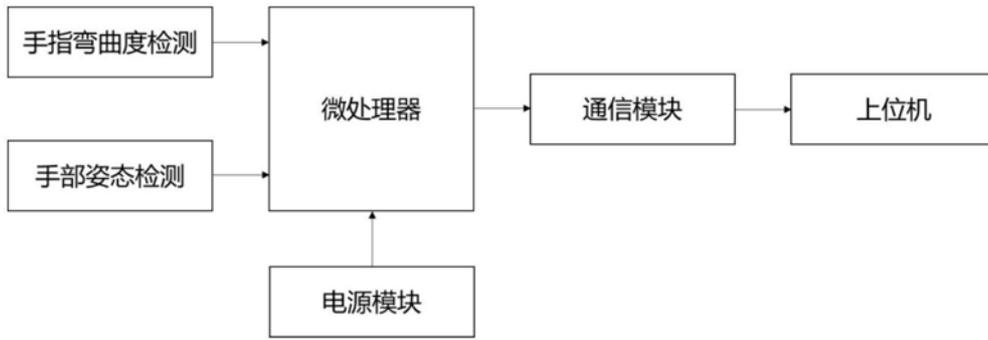
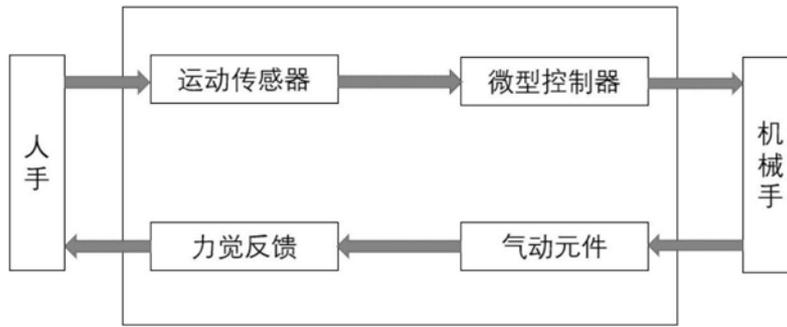


图3



图4



力反馈数据手套

图5

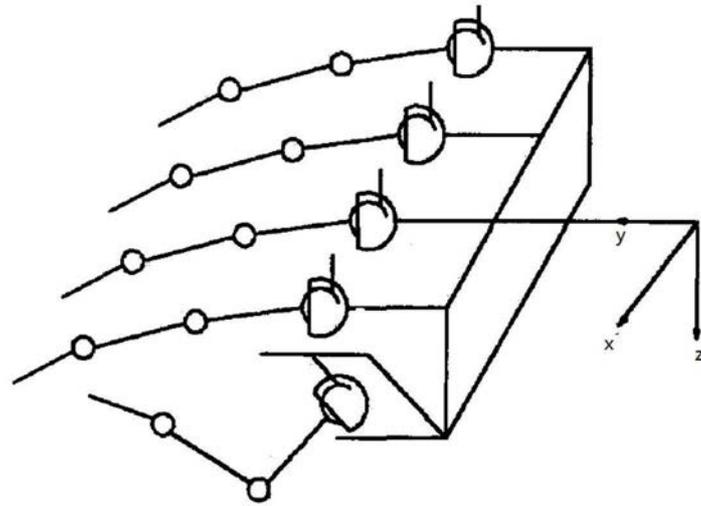


图6

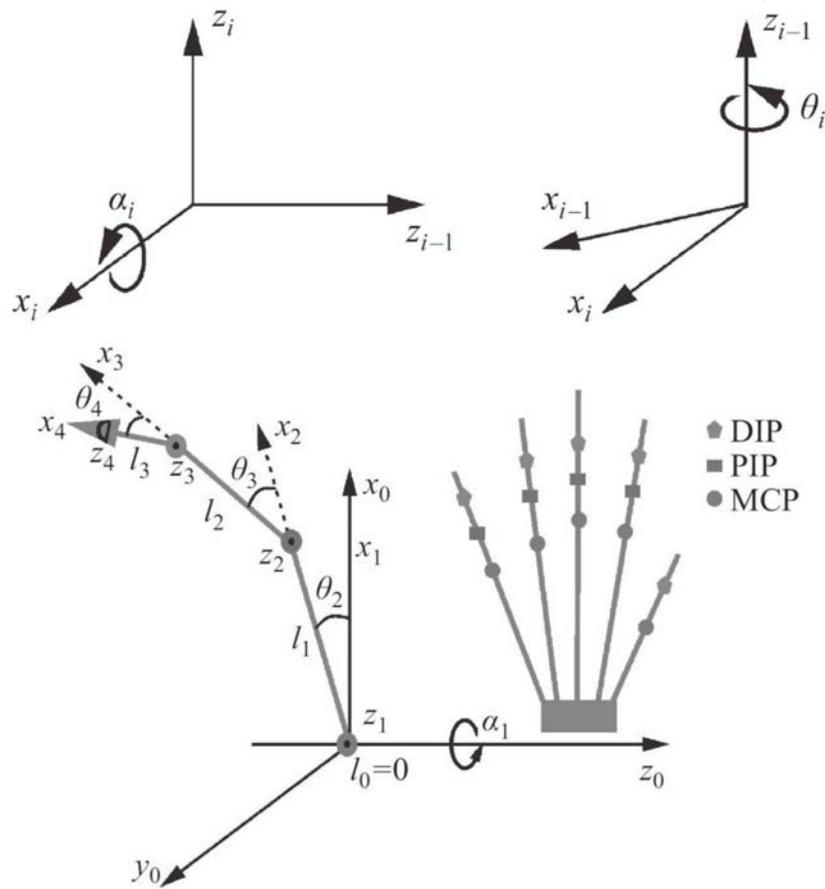


图7

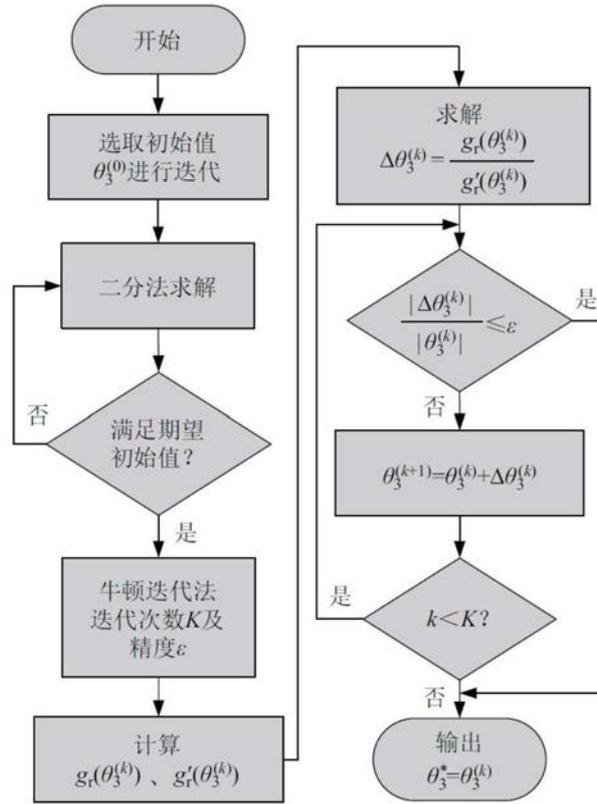


图8

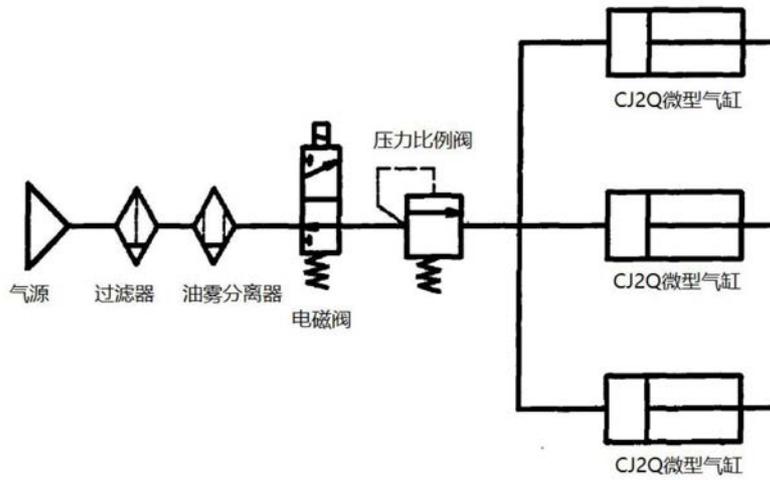


图9

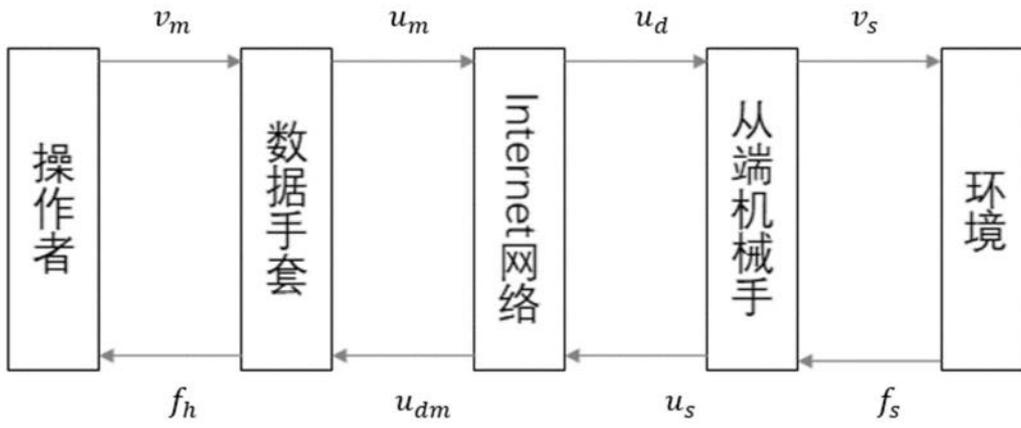


图10

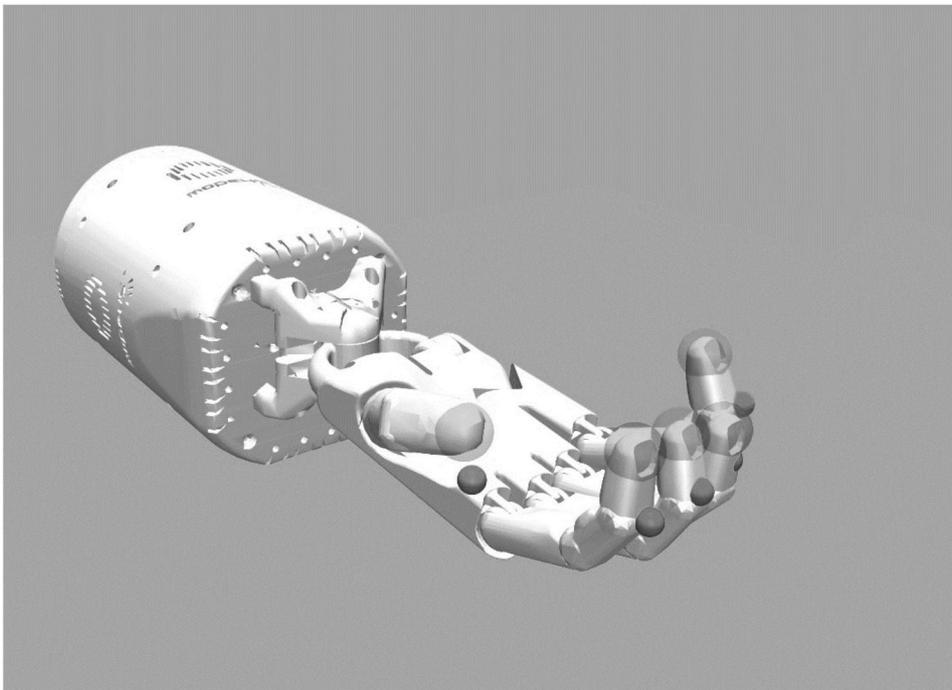


图11