

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102029614 B

(45) 授权公告日 2012. 05. 30

(21) 申请号 201110025549. 2

(22) 申请日 2011. 01. 24

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大  
直街 92 号

(72) 发明人 邓宗权 侯绪研 姜生元 全齐全

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事  
务所 23109

代理人 徐爱萍

(51) Int. Cl.

B25J 17/02 (2006. 01)

审查员 吴志敏

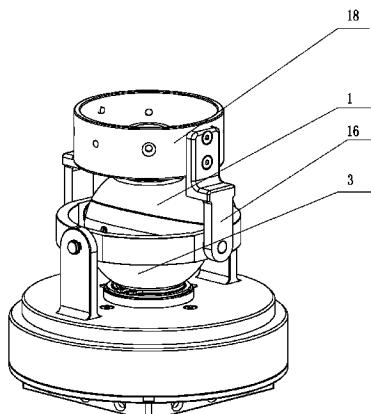
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 4 页

(54) 发明名称

三自由度球型空间机器人手腕

(57) 摘要

一种三自由度球型空间机器人手腕，它涉及一种机器人手腕。针对三自由度机器人手腕结构复杂、集成度低、自身重量大且存在运动耦合的问题。上半球轴与末端执行器接口转动连接，上半球和下半球转动连接，上半球和下半球的接触面为偏置斜面，偏置斜面与水平面之间的角度为 $10^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$ ，上半球电机与减速机构通过上半球齿轮传动机构与万向节轴固接，万向节轴通过内部万向节与上半球轴固接，上半球轴与末端执行器接口转动连接，下半球电机与减速机构通过下半球齿轮传动机构与下半球轴固接，自转电机与减速机构通过自转齿轮传动机构与转盘固接，转盘通过外部万向节与末端执行器接口传动连接。本发明用于宇航机器人中。



1. 一种三自由度球型空间机器人手腕，其特征在于所述手腕包括球型组件、上半球齿轮传动机构（5）、上半球电机与减速机构（6）、下半球电机与减速机构（8）、机架（9）、下半球齿轮传动机构（10）、自转电机与减速机构（12）、自转齿轮传动机构（13）、转盘（15）、外部万向节（16）、末端执行器接口（18）和三个绝对转角传感器（7），球型组件包括上半球轴（1-1）、上半球（1）、下半球（3）、下半球轴（3-1）、内部万向节（4）和内部万向节轴（4-1），上半球轴（1-1）与上半球（1）同轴设置且制成一体，上半球轴（1-1）与末端执行器接口（18）转动连接，上半球（1）和下半球（3）转动连接，上半球（1）和下半球（3）的接触面为偏置斜面，偏置斜面与水平面之间的角度（ $\alpha$ ）为 $10^{\circ} - 25^{\circ}$ ，下半球（3）和下半球轴（3-1）同轴设置且制成一体，球型组件由上至下设有贯通空腔（19），内部万向节（4）设在贯通空腔（19）内，且内部万向节（4）的转动中心与上半球（1）和下半球（3）构成的球体的球心重合，内部万向节（4）的输出端设在上半球轴（1-1）的贯通空腔（19）内，内部万向节（4）的输入端设在下半球轴（3-1）的贯通空腔（19）内，下半球轴（3-1）设在机架（9）内，且下半球轴（3-1）与机架（9）转动连接；

下半球齿轮传动机构（10）由第一主动齿轮（10-1）和第一从动齿轮（10-2）构成，上半球齿轮传动机构（5）由第二主动齿轮（5-1）和第二从动齿轮（5-2）构成，自转齿轮传动机构（13）由第三主动齿轮（13-1）、第三从动齿轮（13-2）、齿轮轴（13-3）和外齿圈（13-4）构成，上半球齿轮传动机构（5）、下半球齿轮传动机构（10）和第三主动齿轮（13-1）、第三从动齿轮（13-2）均设置在机架（9）内；

下半球电机与减速机构（8）的输出端上固装套有第一主动齿轮（10-1），第一主动齿轮（10-1）与第一从动齿轮（10-2）啮合，第一从动齿轮（10-2）固装在下半球轴（3-1）上；

上半球电机与减速机构（6）的输出端上固套装有第二主动齿轮（5-1），第二主动齿轮（5-1）和第二从动齿轮（5-2）啮合，第二从动齿轮（5-2）固套装在内部万向节轴（4-1）的一端上，内部万向节轴（4-1）的另一端与内部万向节（4）的输入端固接，内部万向节（4）的输出端与上半球轴（1-1）固接，上半球轴（1-1）与末端执行器接口（18）转动连接，上半球电机与减速机构（6）、下半球电机与减速机构（8）和自转电机与减速机构（12）的末端各装有一个绝对转角传感器（7）；

自转电机与减速机构（12）的输出端上固套装有第三主动齿轮（13-1），第三主动齿轮（13-1）与第三从动齿轮（13-2）啮合，第三从动齿轮（13-2）固套装在齿轮轴（13-3）上，齿轮轴（13-3）与机架（9）转动连接，齿轮轴（13-3）与外齿圈（13-4）啮合，外齿圈（13-4）与转盘（15）固接，转盘（15）设置在机架（9）上且二者转动连接，转盘（15）通过外部万向节（16）与末端执行器接口（18）传动连接。

2. 根据权利要求1所述三自由度球型空间机器人手腕，其特征在于所述手腕还包括薄壁轴承（2），上半球（1）和下半球（3）通过薄壁轴承（2）转动连接。

3. 根据权利要求1或2所述三自由度球型空间机器人手腕，其特征在于所述手腕还包括法兰轴承（11），下半球轴（3-1）与机架（9）通过法兰轴承（11）转动连接。

4. 根据权利要求1或2所述三自由度球型空间机器人手腕，其特征在于所述手腕还包括转动轴承（17），上半球轴（1-1）与末端执行器接口（18）通过转动轴承（17）转动连接。

## 三自由度球型空间机器人手腕

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种空间机器人手腕。

### 背景技术

[0002] 空间机器人在星球探测与采样、航天器和空间站的维护等任务中发挥着越来越重要的作用,如实现月球与火星表面土壤的采样、飞船的控制与舱门的开启、空间舱段的组装、航天器的维修等,均可代替宇航员完成,空间机器人的显著特征是结构紧凑,集成化程度高,功重比和作用空间大。

[0003] 应用于危险和极限环境下的空间机器人对腕部的性能指标要求苛刻。腕部是连接臂与手的重要基础部件,其性能直接影响空间机器人末端执行器的定位精度、灵活性与作业功能。机器人腕部的功用是通过局部微小调整来改变末端执行器在空间的姿态,实现准确定位,腕部的自由度及姿态范围直接影响机器人的灵活性、稳定性与定位精度,机器人任意位置及姿态的控制需要六个自由度,手腕应有三个自由度,手腕位于臂部的前端,腕部的重量又构成小臂的附加载荷而增加能耗。腕部是在狭小的空间实现三轴回转,因此手腕的机构设计复杂、可变参数多,手腕的性能指标已经成为限制机器人在空间极限环境下应用与扩展的主要瓶颈。

[0004] 目前,机器人腕部尚不能完全满足空间作业要求,其三自由度运动的传递普遍采用齿轮传动,结构复杂、集成度低,存在运动耦合问题,使得末端执行器的灵活性、姿态调整能力和精确定位能力受限,空间机器人尚不能通过腕部的调整完成飞船舱门开启等复杂作业,在星球采样方面也存在一些局限性。

[0005] 机器人手腕基本上可分为三类:1. 球型手腕,它的三个关节轴线相交于一点,其位置和姿态是解耦的,逆运动学分析简单,结构紧凑,功重比大,所以空间机器人等特殊场合下使用的机器人大多采用球型手腕。由于受机械结构的限制,这种手腕设计难度大,结构复杂,重量难以降低,工作空间小,腕部的自转角度较小,一般在 260° 左右;2. 非球型手腕,它的三个轴线不交于一点,克服了机械结构的局限性,每个关节的转动角度都能达到 360° 以上,但其缺点是结构不紧凑,体积庞大,限制了功重比指标的提高,运动不能解耦,控制精度低;3. 并联结构手腕,此种结构的手腕实际上是一种小型化的并联机构。

[0006] The Martin Marietta 和美国 NASA 的宇航飞行中心于 1991 年研制的一种用于空间站装配的遥控机器人腕部模块,其电机的布置采用俯仰、侧摆和自转分离方式,但其结构不紧凑,功重比小,三个关节的运动不解耦,控制精度低。

[0007] US Patent No. 5239883 公开的一种可通过齿轮副传动实现侧摆与俯仰两自由度运动的球型机械腕部关节,由于运动的传递都是通过齿轮副的传动实现,因此其结构过于复杂,重量较大。

[0008] 1991 年 Graco Robotics, Inc. 研制了紧凑型双万向节万向腕,它的斜齿轮传动链由防倾斜的在齿轮滑轨内运动的凸轮机构导向来保证,克服了以往腕部功重比小和结构强度欠佳的缺点,俯仰和侧摆分别由两个相交的万向节转动轴传动,使结构更加紧凑,但该腕

部的缺点仍然是结构复杂,加工难度大,但腕部斜齿轮在载荷的作用下有跳跃的不平稳现象。

[0009] NASA 研制了新一代的腕部模块,传动系统采用三个并联的螺杆驱动实现侧摆、俯仰,简化了设计,降低了成本,由于其附加的灵活性适于非结构化环境, NASA 喷气推力实验室已经将该万向腕成功的应用于处理危险的物品。但该腕部的缺点是要三个驱动实现侧摆、俯仰两个运动。

[0010] 韩国提出了一种球型两自由度主动驱动机器人腕部关节,它的下半球运动通过齿轮传动实现,上半球通过内部万向节传递运动,两个偏置斜面复合成手腕的侧摆与俯仰两个运动,结构紧凑、简单,且实现了两个输入运动的解耦,并通过离合器的啮合程度控制传递力矩的大小,使腕部在一定力矩的作用下成为被动腕,起到了过载荷保护和避免机械干涉而损坏腕部关节的作用,但离合器的啮合会使手腕输出端的绝对位置不能记忆,使手腕的位置控制失效,此外该腕部只能实现两个自由度的运动。

[0011] 目前,由于腕部不能实现姿态的准确调整,给空间机器人在外星球取样任务的顺利完成带来了困难与不便,主要原因是通过其它大关节的配合运动实现执行器末端姿态准确调整时存在运动耦合问题,还会带来整个机械臂的振颤而影响定位精度。

[0012] 空间机器人不能开启舱门的原因是腕部自转角度有限,通过其它关节的配合运动实现执行器末端的旋转存在运动耦合问题,会发生旋转轨迹的机械干涉而使舱门的开启失败;旋启舱门后的拉开过程中,末端执行器的运动轨迹还会与舱门旋转轨迹发生机械干涉而失败,甚至损坏腕部;机械臂在外星球探险时,从土壤中拉出石头的过程也同样存在易损坏腕部的问题,解决途径是要求腕部能实现主、被动腕的工作模式。

## 发明内容

[0013] 本发明的目的是提供一种三自由度球型空间机器人手腕,以解决目前三自由度机器人手腕结构复杂、集成度低、自身重量大且存在运动耦合的问题。

[0014] 本发明为解决上述技术问题采取的技术方案是:手腕包括球型组件、上半球齿轮传动机构、上半球电机与减速机构、下半球电机与减速机构、机架、下半球齿轮传动机构、自转电机与减速机构、自转齿轮传动机构、转盘、外部万向节、末端执行器接口和三个绝对转角传感器,球型组件包括上半球轴、上半球、下半球、下半球轴、内部万向节和内部万向节轴,上半球轴与上半球同轴设置且制成一体,上半球轴与末端执行器接口转动连接,上半球和下半球转动连接,上半球和下半球的接触面为偏置斜面,偏置斜面与水平面之间的角度为 $10^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$ ,下半球和下半球轴同轴设置且制成一体,球型组件由上至下设有贯通空腔,内部万向节设在空腔内,且内部万向节的转动中心与上半球和下半球构成的球体的球心重合,内部万向节的输出端设在上半球轴的空腔内,内部万向节的输入端设在下半球轴的空腔内,下半球轴设在机架内,且下半球轴与机架转动连接;

[0015] 下半球齿轮传动机构由第一主动齿轮和第一从动齿轮构成,上半球齿轮传动机构由第二主动齿轮和第二从动齿轮构成,自转齿轮传动机构由第三主动齿轮、第三从动齿轮、齿轮轴和外齿圈构成,上半球齿轮传动机构、下半球齿轮传动机构和第三主动齿轮、第三从动齿轮均设置在机架内;

[0016] 下半球电机与减速机构的输出端上固装套有第一主动齿轮,第一主动齿轮与第一

从动齿轮啮合,第一从动齿轮固装在下半球轴上;

[0017] 上半球电机与减速机构6的输出端上固套装有第二主动齿轮,第二主动齿轮和第二从动齿轮啮合,第二从动齿轮固套装在内部万向节轴的一端上,内部万向节轴的另一端与内部万向节的输入端固接,内部万向节的输出端与上半球轴固接,上半球轴与末端执行器接口转动连接,上半球电机与减速机构、下半球电机与减速机构和自转电机与减速机构的末端各装有一个绝对转角传感器;

[0018] 自转电机与减速机构的输出端上固套装有第三主动齿轮,第三主动齿轮与第三从动齿轮啮合,第三从动齿轮固套装在齿轮轴上,齿轮轴与机架转动连接,齿轮轴与外齿圈啮合,外齿圈与转盘固接,转盘设置在机架上且二者转动连接,转盘通过外部万向节与末端执行器接口传动连接。

[0019] 本发明具有以下有益效果:1、本发明的内部万向节、外部万向节的转动中心和两个偏置斜面相结合的双半球球心重合构成球型手腕,可实现侧摆、俯仰和自转三个主动输入运动的解耦,成为独立运动,使姿态的控制简便易行,避免了关节配合调整时出现的运动耦合与机械臂的振动现象;2、腕部的侧摆和俯仰是由两个主动驱动的半球复合而成的运动,两个偏置斜面相结合的双半球使腕部俯仰和侧摆作业空间明显加大、结构紧凑、简单且加工容易,由于控制腕部姿态的传动没有斜齿轮与锥齿轮,因此克服了在动载荷作用下产生跳跃的不平稳现象;3、与末端执行器相连接的输出端的自转运动是由外部万向节的输出端与上半球轴颈采用轴承连接实现悬浮,因此使腕部的自转运动成为独立的解耦运动,可实现大角度自转;4、末端执行器姿态的侧摆与俯仰和上半球输出端随动并保持一致,但转动姿态不变,使末端执行器法线方向调整方便,腕部完成定位后,由于外部万向节是悬浮在上半球上的一个解耦的独立运动,外部万向节可带动球形腕输出端的末端执行器实现大自转运动,使开启舱门等复杂作业能够顺利实现;5、手腕完成定位与抓紧后,通过上、下半球驱动电机的主动驱动,实现摩擦力补偿,解除腕部俯仰与侧摆的约束,变成柔顺性的被动腕,有效解除机械干涉,满足空间极限环境对机器人腕部的特殊需求,完成外星球取样过程中拔出石头和旋启、拉开舱门的复杂作业。

## 附图说明

[0020] 图1是本发明机器人手腕结构示意图,图2是本发明机器人手腕侧摆与俯仰传动机构主剖视图,附图3是本发明机器人手腕自转传动机构主剖视图示意图,附图4是具体实施例的结构示意图。

## 具体实施方式

[0021] 具体实施方式一:结合图1-图3说明本实施方式,本实施方式的手腕包括球型组件、上半球齿轮传动机构5、上半球电机与减速机构6、下半球电机与减速机构8、机架9、下半球齿轮传动机构10、自转电机与减速机构12、自转齿轮传动机构13、转盘15、外部万向节16、末端执行器接口18和三个绝对转角传感器7,球型组件包括上半球轴1-1、上半球1、下半球3、下半球轴3-1、内部万向节4和内部万向节轴4-1,上半球轴1-1与上半球1同轴设置且制成一体,上半球轴1-1与末端执行器接口18转动连接,上半球1和下半球3转动连接,上半球1和下半球3的接触面为偏置斜面,偏置斜面与水平面之间的角度 $\alpha$ 为 $10^\circ - 25^\circ$ ,

下半球 3 和下半球轴 3-1 同轴设置且制成一体，球型组件由上至下设有贯通空腔 19，内部万向节 4 设在空腔 19 内，且内部万向节 4 的转动中心与上半球 1 和下半球 3 构成的球体的球心重合，内部万向节 4 的输出端设在上半球轴 1-1 的空腔内，内部万向节 4 的输入端设在下半球轴 3-1 的空腔内，下半球轴 3-1 设在机架 9 内，且下半球轴 3-1 与机架 9 转动连接；

[0022] 下半球齿轮传动机构 10 由第一主动齿轮 10-1 和第一从动齿轮 10-2 构成，上半球齿轮传动机构 5 由第二主动齿轮 5-1 和第二从动齿轮 5-2 构成，自转齿轮传动机构 13 由第三主动齿轮 13-1、第三从动齿轮 13-2、齿轮轴 13-3 和外齿圈 13-4 构成，上半球齿轮传动机构 5、下半球齿轮传动机构 10 和第三主动齿轮 13-1、第三从动齿轮 13-2 均设置在机架 9 内；

[0023] 下半球电机与减速机构 8 的输出端上固装套有第一主动齿轮 10-1，第一主动齿轮 10-1 与第一从动齿轮 10-2 啮合，第一从动齿轮 10-2 固装在下半球轴 3-1 上；

[0024] 上半球电机与减速机构 6 的输出端上固套装有第二主动齿轮 5-1，第二主动齿轮 5-1 和第二从动齿轮 5-2 啮合，第二从动齿轮 5-2 固套装在内部万向节轴 4-1 的一端上，内部万向节轴 4-1 的另一端与内部万向节 4 的输入端固接，内部万向节 4 的输出端与上半球轴 1-1 固接，上半球轴 1-1 与末端执行器接口 18 转动连接，上半球电机与减速机构 6、下半球电机与减速机构 8 和自转电机与减速机构 12 的末端各装有一个绝对转角传感器 7；

[0025] 自转电机与减速机构 12 的输出端上固套装有第三主动齿轮 13-1，第三主动齿轮 13-1 与第三从动齿轮 13-2 啮合，第三从动齿轮 13-2 固套装在齿轮轴 13-3 上，齿轮轴 13-3 与机架 9 转动连接，齿轮轴 13-3 与外齿圈 13-4 啮合，外齿圈 13-4 与转盘 15 固接，转盘 15 设置在机架 9 上且二者转动连接，转盘 15 通过外部万向节 16 与末端执行器接口 18 传动连接。

[0026] 具体实施方式二：结合图 2 说明本实施方式，本实施方式的手腕还包括薄壁轴承 2，上半球 1 和下半球 3 通过薄壁轴承 2 转动连接，可以保证上半球轴 1-1 绕下半球 3 偏置斜面的法线自由旋转，使输出端上半球轴 1-1 的作业空间以偏置斜面法线为轴线，锥角为  $2\alpha$  的圆锥体。其他组成及连接关系与具体实施方式一相同。

[0027] 具体实施方式三：结合图 2 说明本实施方式，本实施方式的手腕还包括法兰轴承 11，下半球轴 3-1 与机架 9 通过法兰轴承 11 转动连接，可以保证下半球 3 绕机架 9 的中心轴线自由旋转，使下半球 3 偏置斜面法线绕机架 9 的中心轴线旋转  $360^\circ$ ，进而使输出端上半球轴 1-1 的作业空间扩大为绕机架 9 中心轴线，锥角为  $4\alpha$  的圆锥体。其他组成及连接关系与具体实施方式一相同。

[0028] 具体实施方式四：结合图 3 说明本实施方式，本实施方式的手腕还包括转动轴承 17，上半球轴 1-1 与末端执行器接口 18 通过转动轴承 17 转动连接，可以保证末端执行器接口 18 与上半球轴 1-1 的侧摆和俯仰姿态相随动，并使末端执行器接口 18 的自传成为解耦的独立运动。其他组成及连接关系与具体实施方式一相同。

[0029] 本实施例是将本发明应用到开舱门上的一个具体实施例：结合图 4 说明，末端执行器接口 18 与末端执行器 21 固接，末端执行器 21 上安装一个双向力传感器 20，首先调整末端执行器接口 18 的法线方向与舱门旋钮中心线一致，完成夹紧舱门旋钮；由于自转运动与侧摆与俯仰是解耦的，成为一个独立的运动，并能实现大角度自转，因此可以驱动自转电机与减速机构 12 带动自转齿轮传动机构 13 实现末端执行器 21 自转运动，旋开舱门旋钮，

实现舱门旋启。

[0030] 按上半球 1 与下半球 3 按逆运动学计算出的角度规律驱动,可以实现腕部末端执行器 21 在通过机架 9 的中心轴线的任意平面内的摆动,考虑到拉开舱门时,能避开腕部末端执行器 21 轨迹与舱门运动轨迹发生干涉,在机器人腕部末端执行器 21 上安装一个双向力传感器 20,上半球电机与减速机构 6 和下半球电机与减速机构 8 分别与双向力传感器 20 检测到的力 F 构成闭环控制,驱动上半球电机与减速机构 6 克服内部万向节 4、上半球齿轮传动机构 5 和接触面等摩擦力和驱动下半球电机与减速机构 8 克服下半球齿轮传动机构 10 和接触面的摩擦力,并保证腕部末端执行器 21 的运动轨迹在过机架 9 的中心轴线和力 F 组成的平面内沿力 F 的方向摆动,就可以通过电机减速装置和运动传递机构的内摩擦力补偿,实现腕部末端执行器 21 在所受力 F 的平面内沿着所受力 F 的方向运动,上半球电机与减速机构 6 和下半球电机与减速机构 8 与双向力传感器 20 检测到的力 F 通过闭环控制并追随力 F 的方向摆动,当双向力传感器 20 的检测到的力 F 值小到 0.1N 以下,就能实现电机减速装置和运动传递机构的摩擦力完全补偿,变成一个完全柔顺被动腕,提高腕部的灵活性,保护腕部拔出石头和拉开舱门时不受损坏。当力 F 的方向改变时,按照雅可比矩阵改变上半球电机与减速机构 6 和下半球电机与减速机构 8 的转动方向,可实现反方向摩擦力补偿。三自由度机器人手腕采用被动腕模式作业时,侧摆、俯仰与自转的位置依然可以由末端绝对转角传感器 7 存储记忆,三自由度机器人手腕作业完成恢复到主动腕时,可以恢复到零点标定位置。

[0031] 通过上半球电机与减速机构 6 和下半球电机与减速机构 8 的主动驱动的摩擦力补偿,可以解除腕部俯仰和侧摆的约束,使腕部变成被动腕模式,有效的解除机械干涉,满足空间极限环境对机器人腕部的特殊需求,完成外星球采样时拔出石头和航天器舱门拉开等复杂作业。

[0032] 工作原理:本发明在作业之前要进行姿态零点标定,其过程是驱动上半球电机与减速机构 6 使上半球轴 1-1 与机架 9 的中心轴线重合,此时上半球 1 与下半球 3 的相对转角为零,对三自由度解耦手腕的侧摆与俯仰没有影响;此时分别给三个末端绝对转角传感器 7 通电,三个转角传感器 7 便存储并记忆三自由度解耦手腕的零点位置;当三自由度解耦手腕定位时,上半球电机与减速机构 6 驱动上半球齿轮传动机构 5 及内部万向节 4 带动上半球 1 的转动,下半球电机与减速机构 8 驱动下半球齿轮传动机构 10 转动带动下半球 3 的转动,自转电机与减速机构 12 驱动自转齿轮传动机构 13 带动转盘 15 及末端执行器接口 1 自转,下半球 3 固定时,上半球 1 的转动是以下半球 3 斜面的法线为轴线,以两倍于斜面倾斜角  $\alpha$  为圆锥角的圆锥,当下半球自转 360 度时,上半球输出端的运动范围是以下半球自转轴为轴心,以四倍于斜面倾斜角  $\alpha$  为圆锥角的圆锥,也就是手腕侧摆与俯仰的作业空间范围,两个偏置斜面相结合的双半球使腕部的俯仰和侧摆的作业空间明显加大,与上半球轴 1-1 通过轴承 17 转动连接的末端执行器接口 18,可以输出旋转扭矩和作用力,腕部输出端的姿态取决于上半球 1 的自转位置和下半球 3 旋转过程中在斜面处相对上半球 1 的转角决定的腕部的侧摆与俯仰角度。

[0033] 上半球电机与减速机构 6、下半球电机与减速机构 8 和自转电机与减速机构 12 分别与各自末端安装的绝对转角传感器 7 构成位置闭环控制,实现上半球 1 转角、下半球 3 转角和外部万向节 16 输入传动轴的转角位置控制,进而可以感知与记忆三自由度解耦型手腕的侧摆、俯仰和自转位置。

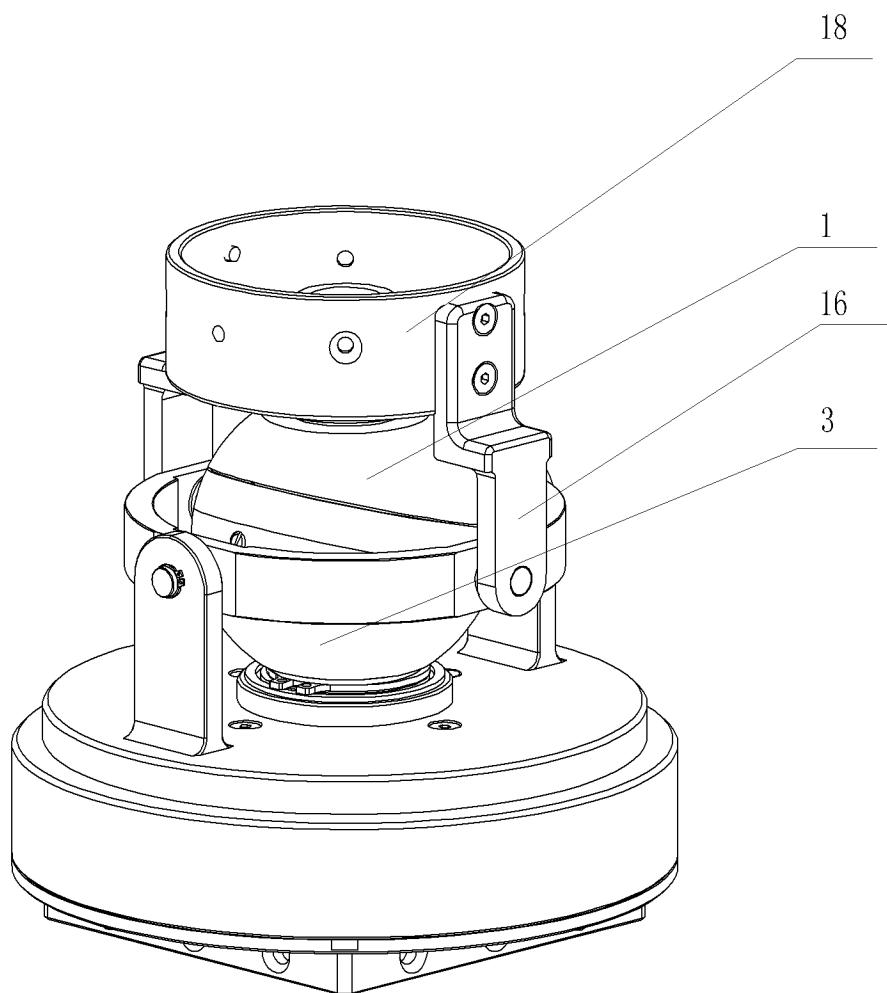


图 1

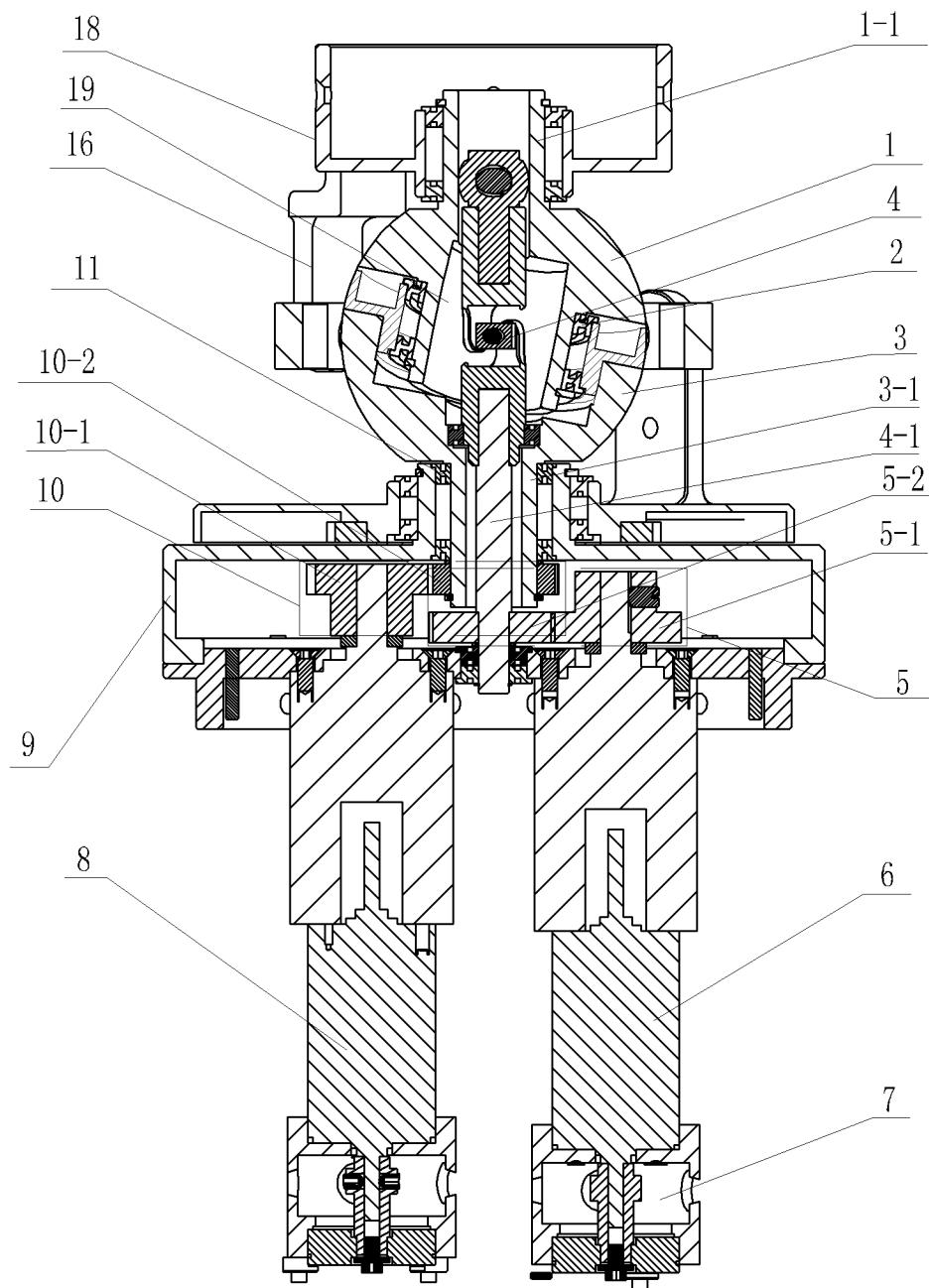


图 2

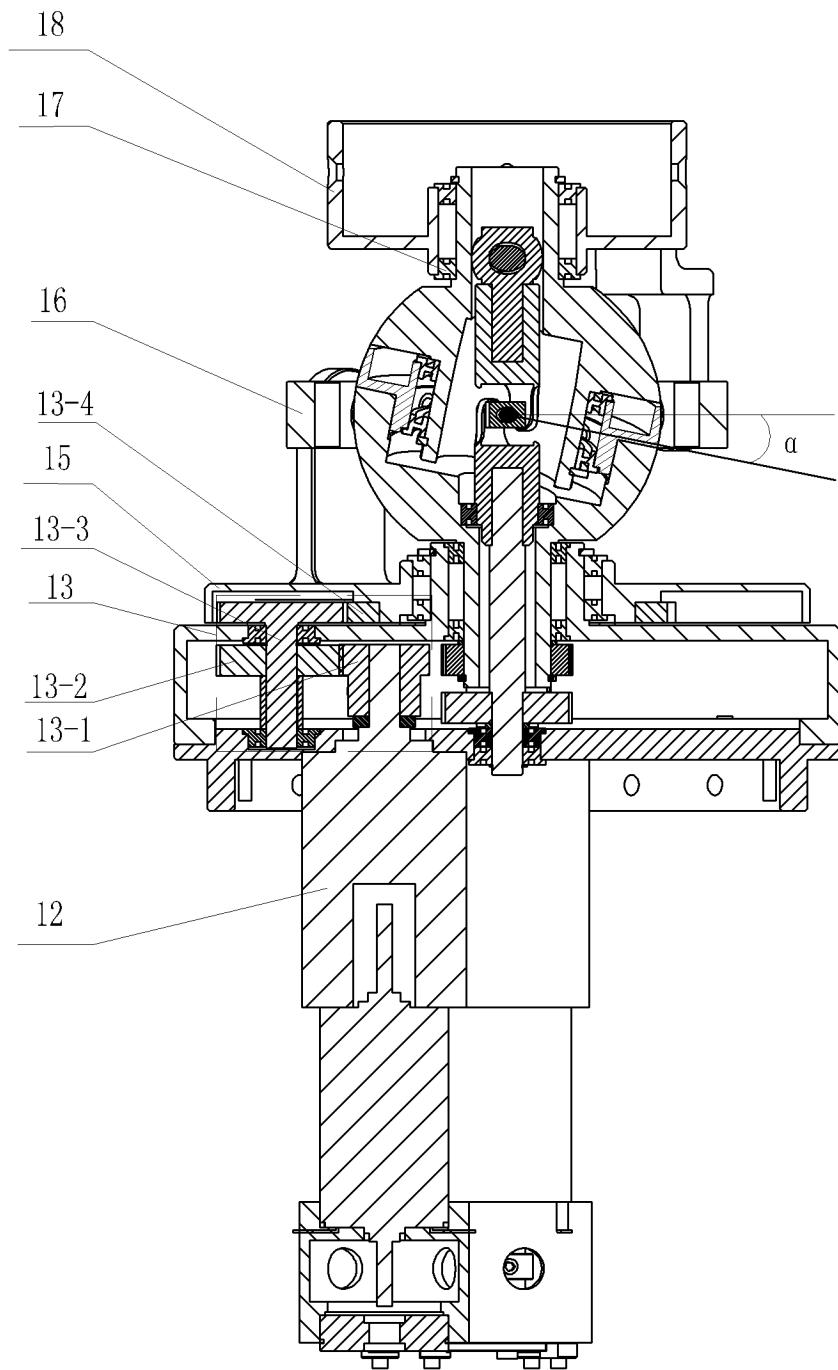


图 3

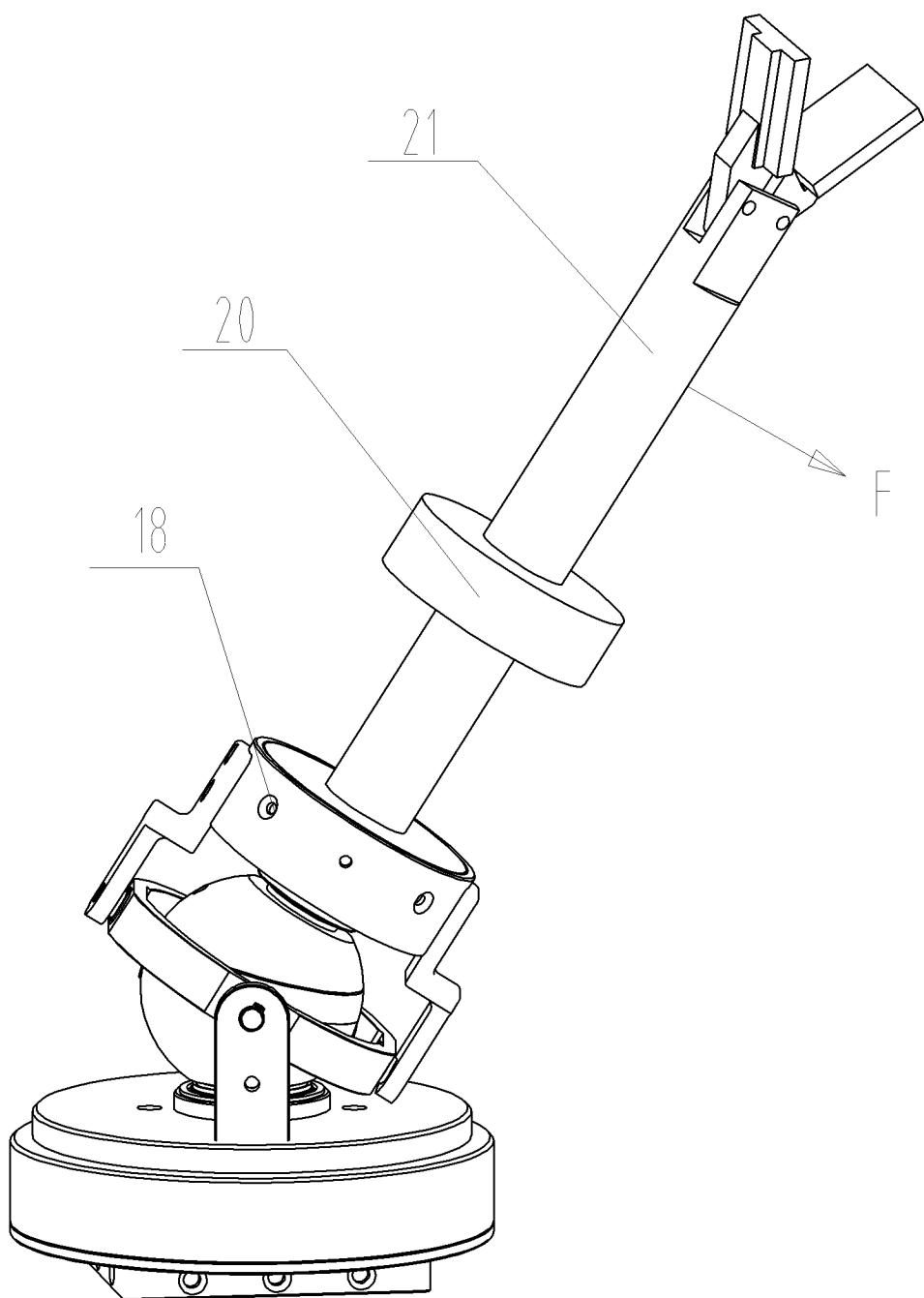


图 4