

蛇形机械臂的机构设计与关节驱动分析^①

马 可^{②***} 李 斌^{*} 王 聪^{*} 张良全^{****} 常 健^{*}

(^{*} 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(^{**} 中国科学院大学 北京 100049)

(^{***} 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘 要 考虑到蛇形机械臂相比于传统六轴机械臂在运动灵活性和避障性能等方面具有明显优势,选择蛇形机械臂进行了研究。为了使其适应各类非结构化环境,给出了一种基于绳索驱动的设计方法,并用等效转轴描述方法建立了蛇形臂运动学模型,进行了静态逐模块受力分析。机械臂各模块之间串联连接,采用绳索驱动方式实现机械臂全驱动。在静态逐模块受力分析中,考虑了绳索所受摩擦力的影响,并引入了一种优化函数,分析了关节驱动绳索的牵引力大小,从而对绳索驱动位移伸长量进行补偿。同时,建立了基于 CAN 总线的闭环控制系统,提高了关节姿态准确度。最后,在 ADAMS 仿真环境中进行运动学仿真,通过与理想位姿的对比验证了位移补偿方法的可行性,并通过样机试验验证了控制系统的有效性。

关键词 蛇形机械臂, 绳索驱动, 关节驱动分析, 冗余机械臂

0 引 言

随着社会进步以及工业的快速发展,越来越多的领域开始面临非结构化的复杂工作环境,同时针对这类特殊环境所提出的作业要求也越来越高^[1]。特殊的工作环境需要机器人代替人工操作,并要求其能在复杂的环境中躲避各类障碍物。传统的关节型机械臂为实现多障碍的避让,采用了增加自由度的方法^[2],而自由度的增加导致了机械臂结构的复杂化,致使其应用范围受限。针对这类特殊需求,仿生机器人领域提出了连续型机器人这一概念^[3]。

该类仿生机器人具有机构自由度数目多、运动灵活的优点。从仿生角度出发,这类机器人多模仿具有柔软躯干的生物体^[4]。在模仿象鼻生理构造方面,Walker^[5]等研究出了刚性关节连接的仿象鼻机器人。Boccolato^[6]等人模仿章鱼柔软的触角,研

制出了线驱动连续体机器人。在模仿鱿鱼类肌肉运动方面,Walker 所研制的此类仿生机器人采用人工肌肉驱动,并进行了系列野外测试^[7]。由于该类仿生连续体机器人所具有的显著优势,英国 OC 公司已在航空、核工业等领域应用了此类机器人^[8]。国内相关方面的研究中,哈尔滨工业大学与北京航空制造工程研究所具有代表性^[9,10],其研制的机器人均采用绳索驱动方式,并已初步应用到了医疗、航空装配等领域。

生物蛇的生理构造与象鼻、章鱼、鱿鱼触角类似,身体由多段关节构成,可以适应各种环境,沈阳自动化研究所就根据蛇类这一特点研制了一种蛇形机器人^[11],既能在水中游动又可在陆地自由运动。将自由形式的仿蛇机器人以一端固定的方式设计,便形成了蛇形臂机器人。目前,关于绳索驱动的蛇形臂机器人的分析主要集中在运动学方面,对驱动

① 国家自然科学基金(61473283)资助项目。
② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:仿生机器人;联系人,E-mail: make@sia.cn
(收稿日期:2017-06-03)

机器人的绳索牵引力分析较少,而牵引力的大小将直接影响驱动系统位移量的误差,因此绳索牵引力的分析对于运动控制具有重要意义。

本文首先以蛇类为研究对象,针对蛇类生物的生理构造设计一种蛇形臂机器人,其次建立了绳索的力学模型,对绳索的驱动量进行补偿,最后建立了蛇形臂样机,并进行仿真分析与实验。

1 蛇形臂机构设计

蛇形臂机器人的机构设计采用类蛇的仿生设计思路,主要构件由蛇形臂和基座构成,蛇形臂是机器人的主要运动部分,基座则为蛇形臂提供动力。蛇形臂机器人具有 16 个空间自由度,24 个控制自由度,是自由度高度冗余的结构。机械臂的驱动形式为全驱动,利用绳索驱动各个关节。

1.1 仿生结构设计

蛇类运动灵活自如,具有 100 至 400 根脊椎骨,蛇类的解剖结构复杂但每根脊椎骨的构造简单,各段脊柱通过前后关节突相连接,形成蛇类多自由度运动灵活的骨骼结构(见图 1(a)和(c))。本文所设计的蛇形臂借鉴了蛇类的骨骼结构特点,由多段套筒与万向节形成蛇形臂的主体(见图 1(b)),各个套筒之间通过万向节相连,蛇形臂的一端固定于底座,另一端在关节驱动下实现灵活的运动。

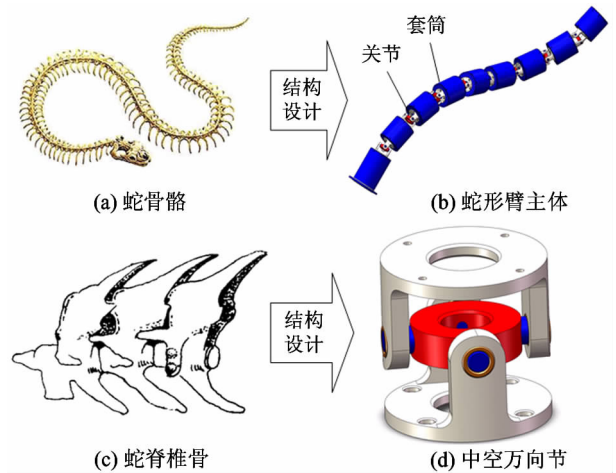


图 1 蛇形臂主体仿生结构设计

为了避免蛇形臂关节数量过多造成控制难度加大,并同时保持一定的冗余自由度,蛇形臂的主体设计为 8 节套筒与 8 个万向节相连。相邻套筒之间通

过万向节实现 2 自由度的关节转动,关节绕中心轴可偏移最大转角 33°,通过绳索驱动各关节实现转动。冗余自由度式结构设计使得蛇形臂具有运动灵活的特点,从而适应各类非结构性环境。独特的中空万向节设计(见图 1(d)),使得电缆可以从蛇形臂中间穿过,抵达末端部件而不影响蛇形臂的运动。

基座部分的主要功能是为驱动绳索提供动力,通过电机驱动丝杠螺母,从而驱动贯穿于蛇形臂的钢丝绳,钢丝绳沿其长度方向的位移驱动关节转动,如图 2(a)。绳索与预紧装置之间由弹簧相连,弹簧机构的引入有以下几点作用。(1)维持预紧装置加载到绳索上的预紧力,使蛇形臂在重力的影响下保持位姿不变。(2)在遇到突发外部载荷的情况下,依靠弹簧实现蛇形臂的被动调节,为机器人增加一道安全保护措施。丝杠螺母的导轨设计采用了独特的滑轮滑槽的设计方法,将导轨槽集中于单一零件,降低了由多根导轨带来的装配难度,如图 2(b)所示。

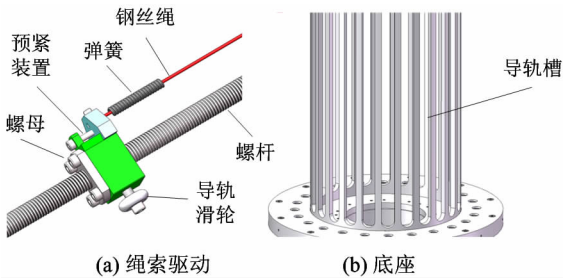


图 2 绳索驱动机构

在整体结构中,重量较大的驱动机构位于基座,蛇形臂部分的质量相对较轻,因此主要质量分布于底座,提高了蛇形臂的运动灵活性。

1.2 样机设计

蛇形机械臂样机按照蛇形臂主体与底座分别独立加工与装配,实物如图 3 所示。蛇形臂部分主要采用铝合金材质进行加工,基座部分主要采用 Q235 材质进行加工。蛇形臂具有 8 个关节,每个关节由 3 根绳索驱动,样机共使用 24 根 304 不锈钢钢丝绳作为驱动绳索,由 24 套电机驱动的执行器提供动力,每节套筒质量为 374g,蛇形臂总重 5kg。其他主要尺寸如表 1 所列。

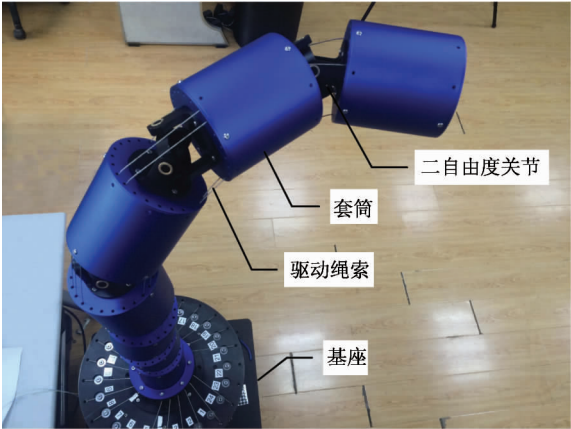


图 3 蛇形臂样机

表 1 样机主要参数

主要尺寸参数	
套筒直径 (mm)	100
蛇形臂长度 (mm)	1400
万向节最大偏角 (°)	33
基座直径 (mm)	380
丝杠驱动行程 (mm)	500
钢丝绳直径 (mm)	2

2 蛇形臂驱动原理与运动学模型

蛇形臂关节在绳索牵引力的驱动下进行运动,各关节实现完全运动但相互耦合。关节由周向间隔 120°布置的 3 根绳索驱动,如图 4(a)所示。各关节的驱动绳索固定于对应关节的上平面,1、2、3 三根绳索驱动关节 A,当这 3 根绳索处于绷紧状态时,关节 A 视为不可活动的。驱动关节 B 的 4、5、6 绳索穿过套筒固定于关节 B 的上方,此时关节 A 已固定,对关节 B 的驱动可视为相对于固定的平台,各个关节依次按此驱动,从而实现整个蛇形臂的完全驱动。

在各个关节的驱动中,万向节只起到支撑上下两节套筒的作用,3 根绳索的长度变化将直接驱动万向节旋转,从而实现 2 自由度的关节运动(见图 4(b))。穿过蛇形臂的绳索被分为了两部分,一部分位于套筒中,长度尺寸不发生变化,另一部分暴露于关节位置,只有这部分的绳索长度变化才会驱动关节转动。以图 4(b)所示关节为例,绳索 a、b、c 在该

关节中的长度分别为 h_a 、 h_b 、 h_c , 关节在弯曲平面内转动 α 角度,由几何关系可获得绳长与关节变量之间的关系,如下式所示:

$$\begin{aligned} h_{ai} &= h_0 \cos \frac{\alpha_i}{2} - 2d \cos \alpha_{ai} \sin \frac{\alpha_i}{2} \\ h_{bi} &= h_0 \cos \frac{\alpha_i}{2} - 2d \cos \alpha_{bi} \sin \frac{\alpha_i}{2} \\ h_{ci} &= h_0 \cos \frac{\alpha_i}{2} - 2d \cos \alpha_{ci} \sin \frac{\alpha_i}{2} \end{aligned} \tag{1}$$

式中 h_0 表示关节在初始位置时上平面与下平面之间的距离, α_{ai} 、 α_{bi} 、 α_{ci} 表示绳索位置与弯曲平面之间的夹角,弯曲平面由另一关节变量 θ_i 确定,关节变量 α_i 、 θ_i 将在下面介绍。

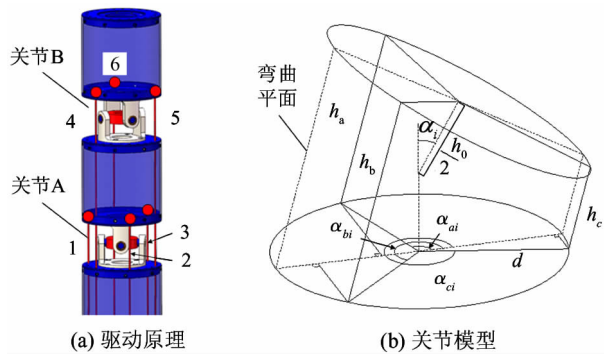


图 4 驱动原理图

蛇形臂的每个关节有 2 个自由度,在运动学模型的建立上并没有采用使用较多的 D-H 参数建模方法,而采用了等效转轴的描述方法。蛇形臂关节的运动学模型分别由 2 个参数,等效转轴偏角 θ 和旋转角度 α 来描述,如图 5 所示。0 坐标系为大地坐标系,1 ~ 8 坐标系固连于各关节的旋转中心,等效转轴 K_i 与 $i-1$ 坐标系的 y 轴的夹角为 θ_i , i 坐标系绕 K_i 轴旋转 α_i 角度, α_i 的正负由右手定则确定。图 4 中的弯曲平面即垂直于等效转轴 K_i 的平面。绳索布置如图 5(b)所示,绳索沿 z 轴贯穿于整个蛇形臂,每根绳索之间的夹角为 15°。

根据图 5(a)建立的坐标系,各关节的坐标变换矩阵如式(2)所示,式中 S 表示 $\sin$ 、 C 表示 $\cos$ 、 l_i 表示坐标原点 O_{i-1} 沿 z_{i-1} 轴到 O_i 的距离。则蛇形臂姿态描述矩阵可表示如下:

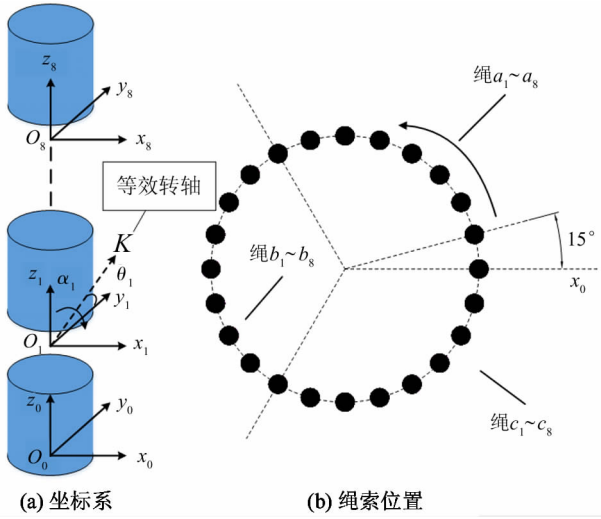


图5 结构位姿描述

$${}^{i-1}_i \mathbf{T} = \begin{bmatrix} S^2\theta_i(1-C\alpha_i) + C\alpha_i & -S\theta_i C\theta_i(1-C\alpha_i) & C\theta_i S\alpha_i & 0 \\ -S\theta_i C\theta_i(1-C\alpha_i) & C^2\theta_i(1-C\alpha_i) + C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & 0 \\ -C\theta_i S\alpha_i & -S\theta_i S\alpha_i & C\alpha_i & l_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^0_n \mathbf{T} = {}^0_1 \mathbf{T} {}^1_2 \mathbf{T} \dots {}^{i-1}_i \mathbf{T} \dots {}^{n-1}_n \mathbf{T} \quad (3)$$

3 蛇形臂关节驱动分析

在蛇形臂关节位姿的控制中,关节段绳索的长度为控制参数,关节角变量为控制目标。蛇形臂的驱动绳索在运动中受到摩擦力的作用,驱动位移发生偏差,引起关节控制误差,因而需要建立绳索系统在力学特性下的位移补偿关系,以纠正该偏差。

蛇形臂整体的运动速度较低,因此假设机械臂的运动是静态的,在分析过程中从静力学的角度出发,不考虑动力学对机械臂的影响。在建立静力学方程时,遵循以下几点基本假设^[3]:

(1) 各个模块的质量分布均匀。

(2) 静力学的建立满足静态平衡假设,绳索产生的摩擦力视为最大静摩擦力,是由绳索对机械臂本体产生的正压力产生的,该正压力的方向视为平行于关节的上下表面。

(3) 由于绳索较细,忽略绳索的重力对模型的影响,并且绳索的抗弯刚度也不在考虑范围内。

(4) 绳索只产生沿绳方向的牵引力,不能产生推力,方向更不能是任意方向的。

3.1 末端关节静力学分析

基于以上假设,首先对末端模块进行分析,末端模块只受自重 m_8g 、末端载荷 m_0g 、末端扭矩 M_0 和绳索牵引力 T_{a8} 、 T_{b8} 、 T_{c8} 作用。除此之外,为了保证关节不绕 z 轴旋转,还会受到限制扭矩 M_{z8} 的作用,如图6所示。建立如下方程:

$$\mathbf{O}_8 \mathbf{p}_8 \times m_8 g + \mathbf{O}_8 \mathbf{p}_0 \times m_0 g + \sum_k \mathbf{O}_8 \mathbf{k}_8 \times T_{k8} + M_{z8} + M_0 = 0 \quad (4)$$

式中 $\mathbf{p}_8$ 、 $\mathbf{p}_0$ 分别为自重和载荷作用点, k 代表 a 、 b 、 c 三根牵引绳。绳索牵引力的方向由关节参数决定(见图6(b)),表示如下:

$$T_{k8} = T_{k8} \cdot \frac{{}_7^8 \mathbf{T} \cdot \mathbf{O}_7 \mathbf{k}_{8,7} - \mathbf{O}_8 \mathbf{k}_8}{|{}_7^8 \mathbf{T} \cdot \mathbf{O}_7 \mathbf{k}_{8,7} - \mathbf{O}_8 \mathbf{k}_8|} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{O}_7 \mathbf{k}_{8,7}$ 为关节下平面绳索在7坐标系下的点。

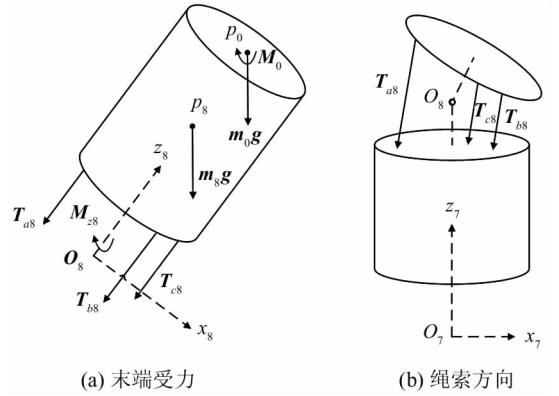


图6 末端关节模型

基于基本假设(4),牵引力应满足约束条件如下:

$$\begin{aligned} T_{ki} &\geq T_{\min} \\ T_{\min} &\geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $T_{\min}$ 为绳索预紧力,预紧力使蛇形臂在重力作用下维持自身形状。

式(4)中包含4个未知量,方程组系数矩阵非满秩,不能得到准确牵引力的解,为了得到满足能量最低原理的牵引力大小,建立优化目标即牵引力平方和最小:

$$\Omega_{\min} = \sum_k T_{ki}^2 \quad (7)$$

在计算中,以式(7)为目标函数,式(4)与式(6)为

约束函数,使用拟牛顿法,求得末端关节中各项牵引力的大小。该优化目标使计算所得 3 根绳索中最小的拉力接近绳索的预紧力,使所得结果更加接近真实牵引力的大小。

3.2 中间关节静力学分析

对中间关节进行分析,如图 7 所示。中间模块除了受到自身重力以及关节绳索的牵引力之外,还受到 $i+1$ 关节的反作用力 F'_{i+1} 及扭矩 M'_{zi+1} ,对 $i+1$ 节建立力学平衡方程,有:

$$\sum_k T_{ki+1} + m_{i+1}g + F_{i+1} + F'_{i+2} = 0 \tag{8}$$

对第 i 节建立力矩平衡方程,有:

$$O_i p_i \times m_i g + \sum_k O_i k_i \times T_{ki} + M_{zi} + M'_{zi+1} + O_i O_{i+1} \times F'_{i+1} = 0 \tag{9}$$

其中牵引力的表达方式同式(5),这里不再赘述。

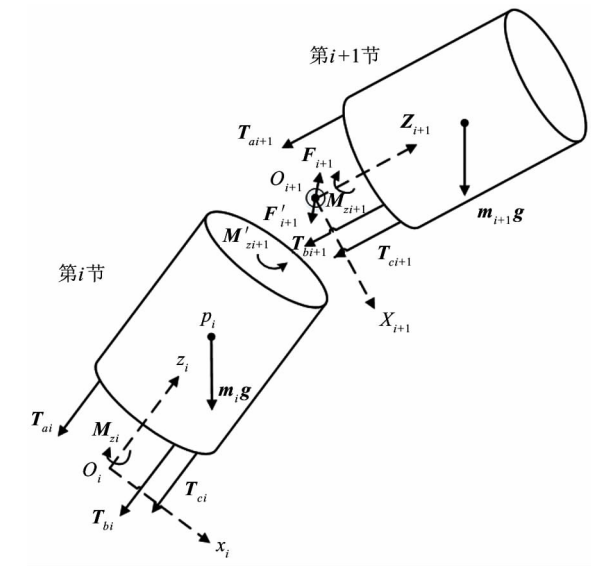


图 7 中间关节模型

在蛇形臂实际运动过程中,穿过模块的绳索与机械臂本体之间存在静摩擦力,下面对绳索受到的摩擦力展开分析。基于基本假设(2),摩擦力与绳索对模块的正压力如图 8 所示。 $T_{ki+1,i,1}$ 与 $T_{ki+1,i,2}$ 分别表示驱动 $i+1$ 关节的绳索牵引力在第 i 节段套筒内部与关节处的拉力。 $f_{i+1,i,k1}$ 、 $N_{i+1,i,k1}$ 分别表示驱动 $i+1$ 关节的拉力在第 i 节套筒上部产生的摩擦力和正压力, $f_{i+1,i,k2}$ 、 $N_{i+1,i,k2}$ 分别表示驱动 $i+1$ 关节的拉力在第 i 节套筒下部产生的摩擦力和正压力。由摩擦力模型,在式(9)中添加由 $i+1 \sim n$ 节驱动绳

索作用于模块的摩擦力与正压力所产生的扭矩,获得如下方程:

$$O_i p_i \times m_i g + \sum_k O_i k_i \times T_{ki} + M_{zi} + M'_{zi+1} + O_i O_{i+1} \times F'_{i+1} + \sum_k \sum_{c=i+1}^n (d_{kc,i} \times f_{c,i,k1} + d_{kc,i} \times f_{c,i,k2} + d_{kc,i} \times N_{c,i,k1} + d_{kc,i} \times N_{c,i,k2}) = 0 \tag{10}$$

式中 $d_{kc,i}$ 表示驱动 $i+1$ 至 n 节的绳索在第 i 节中的位置。以式(7)为目标函数,式(10)与式(6)为约束函数,可获得中间关节各项驱动绳索的牵引力大小。

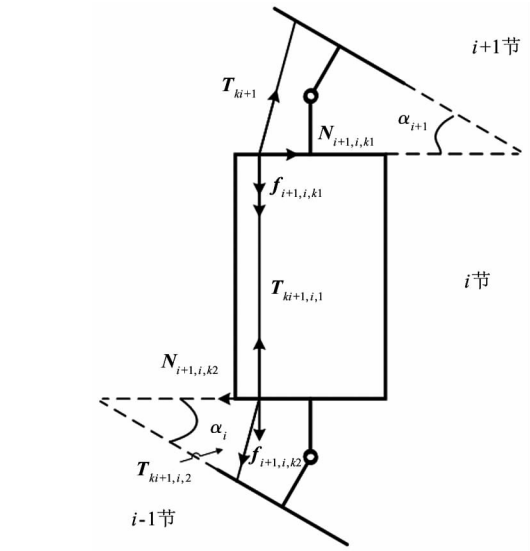


图 8 摩擦力模型

3.3 建立关节角与驱动绳长映射

绳索在穿过套筒模块时,每穿过一个接触点都会受到摩擦力的作用,因此位于各个不同区段之间的拉力大小不同。由摩擦力模型获得基座对绳索提供的牵引力大小如下式所示:

$$T_{ki,0} = T_{ki} (\mu \sin \frac{\alpha_i}{2} + \cos \frac{\alpha_i}{2}) \tag{11}$$

式中 μ 为绳索与套筒模块之间的摩擦系数。

绳索底部通过弹簧与基座相连,在绳索运动过程中,将拉力传导至弹簧并产生绳索伸长方向的位移,绳索传动所产生的位移误差导致了被控关节的角度误差。基于式(10)所得结果,对运动过程中弹簧所产生的位移进行补偿:

$$\Delta L_{ki} = \frac{T_{ki} (\mu \sin \frac{\alpha_i}{2} + \cos \frac{\alpha_i}{2})}{K_0} \tag{12}$$

其中 K_0 为弹簧的劲度系数。因此结合式(1),获得

驱动函数:

$$L_{ki} = \sum_{i=1}^i \left(h_0 \cos \frac{\alpha_i}{2} - 2d \cos \alpha_{ki} \sin \frac{\alpha_i}{2} \right) - \Delta L_{ki}$$

(13)

由此,只要给定各个关节变量,就可以通过控制绳长来较精确地驱动关节运动。

4 控制系统设计

蛇形臂机器人采用模块化设计,每个 2 自由度关节由 3 个执行器驱动,执行器选用 FAULHABER3242CR 系列直流微电机,其输入电源由外部 24V 供电模块提供,转速可达 5000rpm。为了提高控制精度,在关节处安装有 6 轴加速度计 MPU6050,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°。表 2 给出了机器人的部分硬件及控制系统参数信息。

表 2 控制系统参数

系统参数	
控制芯片	富士通 MB90F387S
执行器	FAULHABER3242CR
传感器	电位计,编码器
通信协议	CAN 总线通信

控制系统的主控单元采用了 MB90F387S 单片机,单片机内部集成了 CAN 总线控制器,将主控单元接入到 CAN 通信网络实现与各电机控制板的通信。

蛇形机械臂的运动控制系统主要包括 PC 机,主控板以及各个电机控制板。图 9 描述了机器人的控制系统结构,本文采用 CAN 总线串行通信,给每个节点定义不同的 ID 地址,以保证各下位机与主控板之间的点对点通信。PC 通过 f1232USB 转串口与主控板的串口连接,向主控板发送命令或者接收控制板的反馈信息并显示在 PC 端的串口调试助手的接收区;主控制板发送命令到 CAN 总线,各个执行单元识别与其节点地址相对应的指令,执行自身内部程序,计算得到关节长度或者关节角的数值,控制各个电机的运动。传感器测量的数据由下位机控制

板通过 CAN 总线反馈给主控单元。富士通单片机 MB90F387S 的 CAN 控制器可以发送接收标准格式报文或扩展格式报文,本文采用 29 位标识符的扩展格式报文结构,控制板供电电压为 5V。

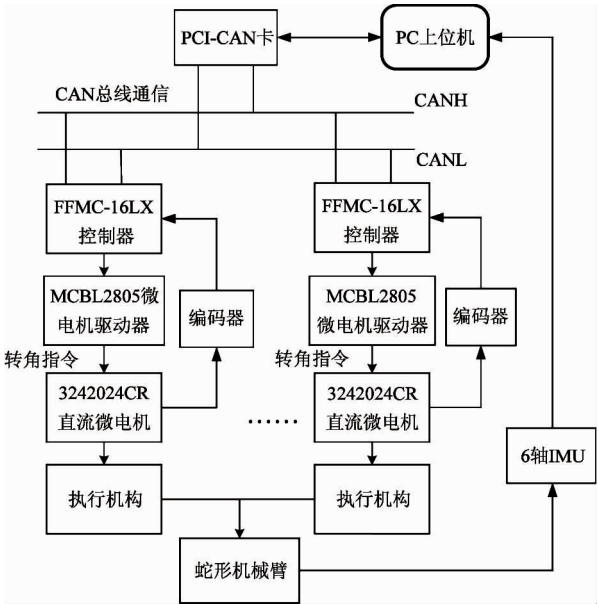


图 9 控制系统结构

CAN 总线通信速率为 19200bps,高层通信协定采用 CANOpen 标准协议。各硬件之间的通讯数据以报文形式传输,所有通讯对象都有唯一的 11 位标识符,用以确定目标驱动器地址,后面附加 5 字节的用户数据,用于给电机驱动器发送控制命令。

5 仿真分析与实验

利用 ADAMS 建立了蛇形臂的仿真模型,并进行了运动仿真。仿真条件设置蛇形臂的各关节角的理想位姿为 $\theta_i = 0^\circ$ 、 $\alpha_i = 30^\circ$,所有关节朝一个方向弯曲,理想位姿如图 10(a)、(b) 所示。

在仿真中,由各关节的期望位姿计算得出牵引绳的拉力大小,进行考虑弹簧变形的绳索驱动位移控制仿真。未进行补偿时结果如图 10(c)、(d) 所示,蛇形臂姿态在位移误差作用下与理想位姿产生偏差。补偿后结果如图 10(e)、(f) 所示,接近底座的关节角位姿得到明显改善。

在蛇形臂运动过程中,基座关节(即第一关节)承受蛇形臂整体的重量,在驱动基座关节时绳索所

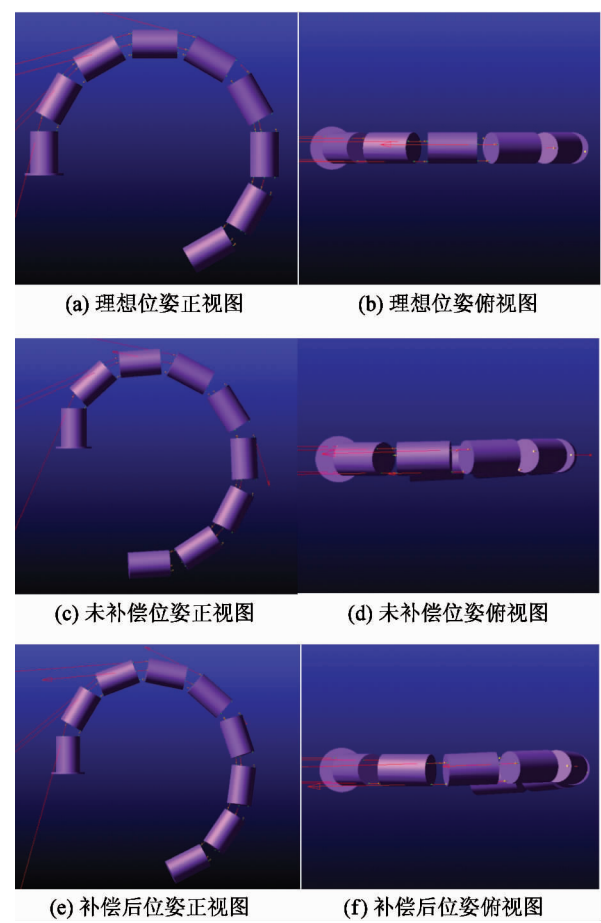


图 10 蛇形臂 ADAMS 运动仿真

提供的驱动力最大,对该关节展开分析,驱动拉力如图 11 所示(按照图 4(b)关节模型描述绳索位置)。当基座关节旋转角度 α 达到 25° 时, a 绳与 b 绳的拉力达到最大,最大拉力值为 1370N。该关节绳索所受摩擦力在运动中呈现非线性增长,最大幅值为 62N,如图 12 所示。绳索内力为驱动力与所受摩擦力的总和,在运动中绳索内力最大值为 1425N,在绳

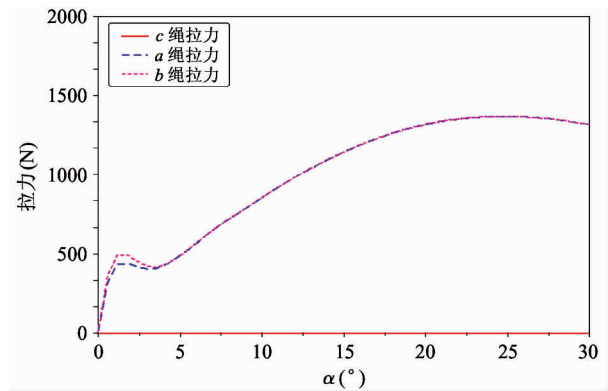


图 11 基座关节驱动绳索拉力

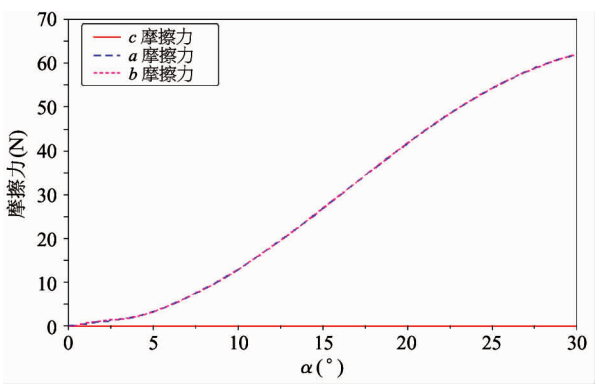


图 12 基座关节驱动绳索摩擦力

索传动系统中产生 6 ~ 7mm 的被动拉伸,对关节位姿将产生较大误差。通过对驱动器位移的补偿改善了实际位姿与理想位姿之间的偏差,验证了位移补偿方法的可行性。

为验证控制系统的有效性,本文对蛇形臂单关节进行了样机测试。将 6 轴 IMU 与活动关节上平面固定,分别进行了开环控制与闭环控制下的姿态角测量实验,测试结果如表 3 所示。

表 3 单关节测量实验

理想位姿		开环位姿		闭环位姿	
$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$
0	25	0.98	23.46	-0.13	25.02
60	25	68.67	22.03	59.8	25.01

在闭环控制下,被控关节的关节位姿与理想值之间的偏差保持在 1° 以内,小于开环控制下所产生的偏差。图 13 为蛇形臂在闭环与开环控制下的结果对比,关节闭环纠正了绳索产生的被动拉伸,验证了闭环控制的有效性。

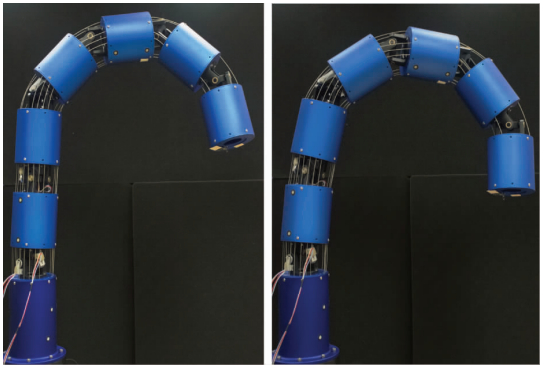


图 13 蛇形臂闭环(左)与开环(右)结果对比

6 结 论

本文提出了一种基于绳索驱动的蛇形机械臂,运动灵活可适应各类非结构化环境。同时,使用等效转轴描述方法建立了蛇形臂的运动学模型,对蛇形臂牵引力的静力分析考虑了模块自重、末端载荷以及绳索所受摩擦力,通过引入优化函数求得绳索牵引力从而对弹簧的位移进行补偿。对于蛇形臂的控制系统,使用 6 轴 IMU 做角度反馈,提高了关节运动精度。仿真分析验证了上述方法对于蛇形机械臂控制的有效性。

参考文献

- [1] 徐文福,毛志刚. 核电站机器人研究现状与发展趋势[J]. 机器人, 2011, 33(06): 758-767
- [2] 常键,王亚珍,李斌. 基于力/位混合算法的 7 自由度机械臂精细操控方法[J]. 机器人, 2016, 38(5): 531-539
- [3] Camarillo D B, Milne C F, Carlson C R, et al. Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 24(6): 1262-1273
- [4] Kato T, Okumura I, Song S E, et al. Tendon-driven continuum robot for endoscopic surgery: preclinical development and validation of a tension propagation model[J].

- IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5): 2252-2263
- [5] Hannan M W, Walker I D. The elephant trunk' manipulator, design and implementation[C]. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italy, 2001. 14-19
- [6] Bocolato G, Manta F, Dumitru S, et al. 3D kinematics of a tentacle robot[J]. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 2010, 1(4): 1-8
- [7] Memahan W, Chitrakaran V, Csencsits M, et al. Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Orlando, USA, 2006. 2336-2341
- [8] Bloss R. Snake-like robots "reach" into many types of applications[J]. *Industrial Robot*, 2012, 39(5): 436-440
- [9] 胡海燕,王鹏飞,孙立宁,等. 线驱动连续型机器人的运动学分析与仿真[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 1-8
- [10] 姚艳彬,杜兆才,魏志强. 蛇形臂机器人装配系统研究[J]. 航空制造技术, 2015, (21): 26-30
- [11] Zhang A F, Ma S G, Li B, et al. Adaptive controller design for underwater snake robot with unmatched uncertainties[J]. *Science China-Information Sciences*, 2016, 59(5): 1-15

Mechanism design and joint drive analysis of snake-arm manipulators

Ma Ke^{***}, Li Bin^{*}, Wang Cong^{*}, Zhang Liangquan^{****}, Chang Jian^{*}

(* State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(*** College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract

Considering that compared to traditional six-axis manipulators, a snake-arm has the obvious advantages in terms of movement flexibility and obstacle avoidance, a study on snake-like manipulator is conducted. In order to make a snake-like arm adapt to various types of unstructured environments, a new design method for snake-like arms based on wire driven is given, a kinematic model for snake-like arms is established by using the method for description of equivalent rotating shaft, and a static force module analysis is performed. The modules are connected in series. Fully driven of the snake-arm is based on the rope-driven approach. In the static force module analysis, the influence of the rope friction force is considered. An optimization function is introduced to analyze the traction force of the joint drive rope, so as to compensate the elongation of the rope displacement. Further, a closed-loop control system based on CAN bus is established to improve the accuracy of joint pose. Finally, the kinematic simulation is carried out in ADAMS simulation environment. The feasibility of the displacement compensation method is verified by comparing with the snake-arm's ideal pose, and the effectiveness of the control system is verified by the prototype test.

Key words: snake-like arm, wire-driven, joint drive analysis, redundant arm