

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.12.005

绳驱动机器人被动解耦模块的设计及验证研究*

华达人¹, 王尧尧^{1,2}, 李彬彬¹, 鞠 锋^{1,2}, 陈 柏^{1*}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 浙江大学
流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对绳驱动关节机器人中前后关节独立运动时各关节驱动绳索的运动耦合问题,对绳索的关节耦合关系进行了研究,创新设计了一种新型绳驱动被动解耦机构。采用一种新型的绳索缠绕方式,利用解耦绳索的正反向缠绕带动随动轮以 1/2 的前端关节角速度运动,使以类似方式走线的两股后端关节驱动绳索在导线轮盘上分别缠绕脱落,避免后端关节驱动绳索在通过前端关节时因前端关节运动而产生绳长变化,以解决绳驱动串联机器人的绳驱关节耦合问题,并搭建了解耦模块验证实验平台,验证了设计的合理性。实验结果表明:该绳驱动被动解耦机构能够补偿前端关节运动导致的后端关节驱动绳索的绳长变化,实现运动耦合的解耦;但受制于绳索自身的弹性,解耦机构在关节换向时会存在一定的解耦误差。

关键词:绳驱动机器人;绳驱耦合;被动解耦模块

中图分类号:TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)12-1279-06

Design and verification of motion-decoupled modular for cable-driven robot

HUA Da-ren¹, WANG Yao-yao^{1,2}, LI Bing-bing¹, JU Feng^{1,2}, CHEN Bai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the motion-coupling between manipulator joints in cable-driven robots, the coupling relationship was studied and a novel motion-decoupled mechanism was proposed. A new routing of cables was adopted in this modular. The decoupling cables restricted the follower wheel to rotate at an angular velocity half the rotation angular velocity of proximal joint. Two driving cables of distal joint with similar routing would wind or unwind along the guide pulley, which avoids the length change of the driving cables during the rotation of proximal joint. As a result, the motion-coupling problem could be solved. A decoupling verification platform system was built. The experiment results show that this motion-decoupled mechanism could compensate the length change of driving cables of distal joint when proximal joint is rotating, which means motion-decoupling has been realized. However, there is still some errors in this motion-decoupled mechanism when driving direction of proximal joint is changed.

Key words: cable-driven robot; motion coupling; motion-decoupled modular

0 引 言

目前,绳索驱动的机器人在相关研究和应用领

域受到了广泛关注。绳驱动关节型串联机器人采用绳索作为驱动介质,使得驱动单元后置于底部基座处,大大减小了机器人的运动质量与惯量,一方面大

收稿日期:2018-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575256, 51705243);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20170522);浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金项目(GZKF-201606)

作者简介:华达人(1984-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事绳驱动机器人方面的研究。E-mail:darceyhdr@163.com

通信联系人:陈 柏,男,教授,博士生导师。E-mail:chenbye@126.com

幅度提高了机器人的负载自重比,另一方面降低了机器人的功耗。同时,由于绳索自身的柔顺性,使机器人在缓冲、吸振等方面有较好的性能,提高了交互安全性。然而,在采用绳索对机械臂关节进行驱动时,由于关节的驱动单元置于基座位置,绳索的走线缠绕常常会导致多关节间发生运动耦合,使得关节驱动精度发生退化。

为了实现各个关节间运动的独立,解决绳驱关节运动耦合问题成为学者们的研究热点。MIT 大学的 TOWNSEND W T 等人^[1-2]设计出了 WAM 绳驱动七自由度拟人机械臂,采用差速绳索驱动关节,使得 4 个绳索驱动关节不发生耦合,目前已成功应用在医疗、服务、科研等多个领域;韩国燃料循环系统技术研究院的 LEE J K 等人^[3-4]研制了基于滑轮-绳索驱动的 BTSM 关节型主从机械手,设计了由动滑轮组和连杆组成的解耦模块,实现了相邻关节间的运动解耦^[5];Nebraska-Lincoln 大学的 ZHAO Bao-liang 等人^[6]提出了一种基于行星齿轮的旋转关节的绳索解耦机构,并提出了一种与行星齿轮等价的绳驱动机构;德国 Igus 公司设计了模块化的绳驱动机器人 Robolink,采用自行设计的“Bowden cable segment”套管,通过绳索-滑轮和套索两种形式相结合进行走线实现运动解耦,目前已做成模块化产品。除此之外,也有一部分学者采用主动解耦的方式,在算法上实现各关节的运动独立。Stanford 大学 QUIGLEY M^[7-8]的柔顺 7 自由度机械臂采用软件补偿,在肩肘关节间、肩关节俯仰、偏航两自由度方面实现了主动解耦;在国内,北京航空航天大学陈伟海教授等^[9-10]研制了拥有冗余机器人灵活性的拟人臂机器人,通过分析运动学分析耦合关系进行算法补偿,并通过仿真验证了其正确性;东南大学王兴松教授团队^[11-12]设计了一种重力平衡的上肢外骨骼绳驱机器人,采用类似刹车线构型的绳索-套筒方式驱动,避免了绳驱关节耦合问题。

针对绳驱动机器人存在的关节运动耦合问题,本文将提出一种绳驱动被动解耦机构。

1 绳驱动关节运动耦合分析

基于绳驱动的机械臂关节,其关节运动常常与驱动绳索走线穿过的前端关节运动相耦合。绳驱动关节耦合因前端关节的类型不同而有着不同形式的耦合,最常见的绳驱动串联机器人关节形式主要是俯仰关节和回转关节。

俯仰关节运动耦合分析示意如图 1 所示。

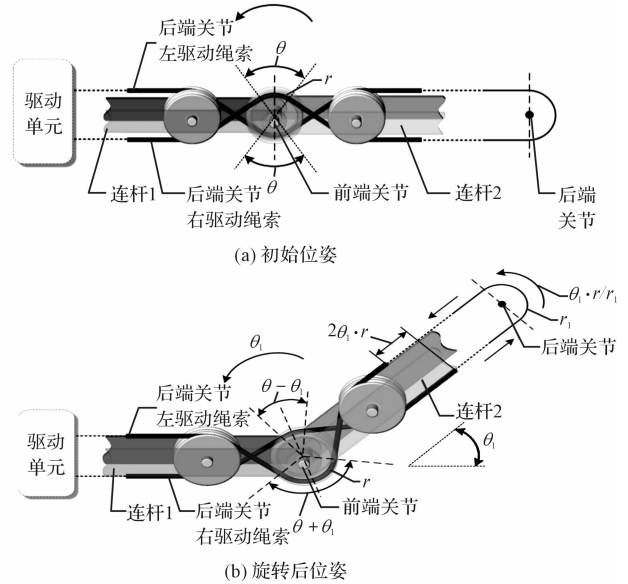


图 1 俯仰关节绳索走线示意图

由于绳索受拉不受压,每个关节需要有两股绳索驱动其正反向运动。初始位姿下,后端关节左右驱动绳索均在前端关节中心导向滑轮缠绕 θ 角度。

回转关节运动耦合分析示意如图 2 所示。

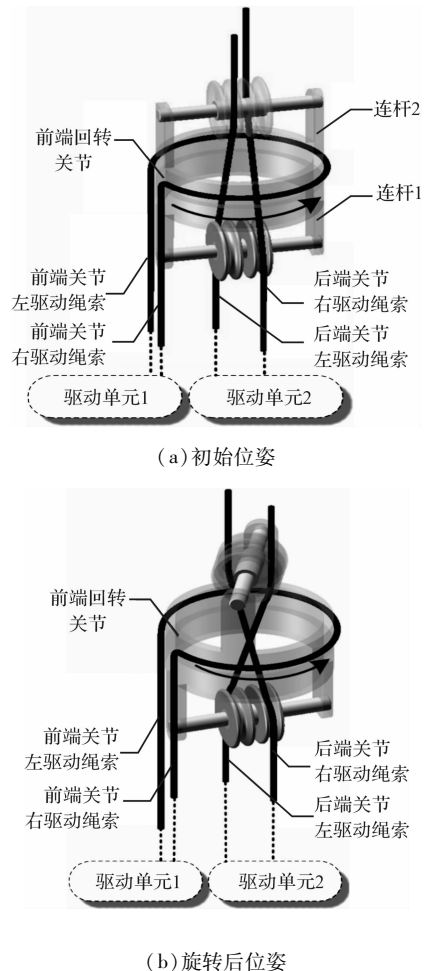


图 2 回转关节绳索走线示意图

当前端关节按如图 2 所示方向旋转 θ_1 后,导致后端关节左、右驱动绳索将沿着前端关节中心导向滑轮分别脱离 / 缠绕 θ_1 角度的绳长段,绳长变化为:

$$\begin{cases} l_1 = +\theta_1 \cdot r \\ l_2 = -\theta_1 \cdot r \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_1, l_2 —左右驱动绳索与后端关节连接的末端的位移变化; r —绳槽半径。

后端关节因此产生相对应绳长的关节旋转,也即关节运动耦合现象,耦合的运动转角为:

$$\theta_2 = \frac{\theta_1 \cdot r}{r_1} \quad (2)$$

式中: r_1 —后端关节的绳索驱动半径; θ_2 —后端关节耦合转角。

因此可知,当前端关节为俯仰关节时,前、后关节运动存在线性耦合。

当前端关节为回转关节,后端关节驱动绳索经过前端关节时走线方式如图 2(a) 所示。前端关节运动带动连杆 2 绕当前关节中心轴旋转 θ_1 角度。后端关节左右驱动绳索由于连杆 2 上导线滑轮的作用,两股绳索经过前端回转关节时将发生扭转缠绕,如图 2(b) 所示。由于后端关节驱动绳索下侧末端与基座处的驱动单元固定,此时两股绳索的上侧末端均产生向下的位移,且末端位移大小随着前端关节的旋转呈非线性变化。由此可知:当前端关节为回转关节时,前、后关节运动存在非线性耦合。

另外,回转关节运动会致后端关节驱动绳索扭转缠绕,当机器人关节较多时,多股后端关节驱动绳索间的缠绕将对机器人本身的可靠性带来不利影响。同时,随着前端关节的转动,扭转缠绕的绳索内部张力将逐渐增大,使得驱动后端关节变得困难,一方面加剧绳索本身损耗,另一方面制约了绳驱动关节型机器人驱动控制的可靠性和稳定性。

由上述分析可知:当前端关节为俯仰关节时,即前后关节轴线平行时,前、后关节间存在运动线性耦合;当前端关节为其他关节形式,即前、后关节轴线不平行(上述回转关节为关节轴线垂直呈 90°) 时,前、后关节间存在运动非线性耦合。当耦合现象存在时,后端关节将不能稳定、可靠地驱动控制。

为此,研究人员需要寻求一种新型的绳索走线方式,在能够对关节的稳定可靠地驱动的基础上,实现前端关节与后端关节间的运动被动解耦。

2 绳驱动被动解耦模块设计

2.1 被动解耦模块结构设计

针对上述绳驱动关节运动耦合问题,本文提出了

一种模块化的被动解耦机构。该被动解耦模块的结构如图 3 所示。

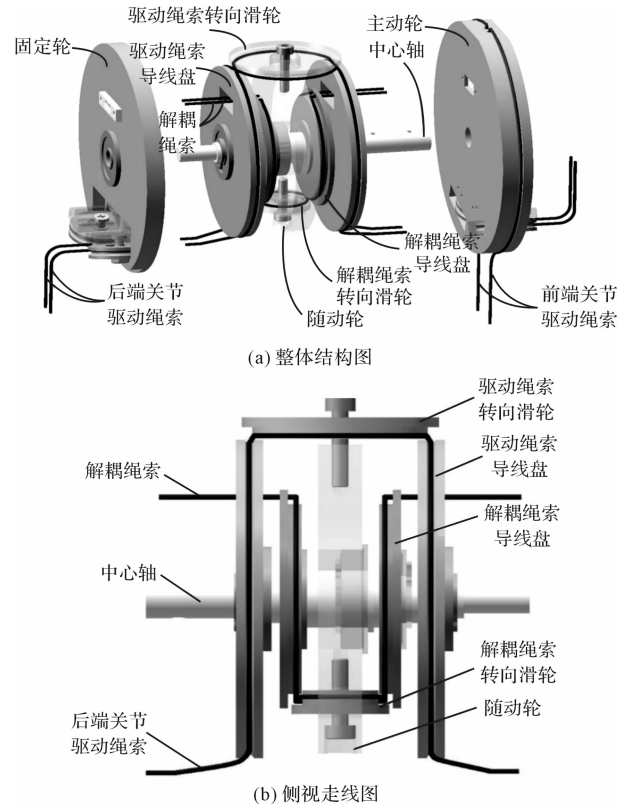


图 3 被动解耦模块结构示意图

从左往右依次是:固定轮、驱动绳索导线盘(前侧)、解耦绳索导线盘(前侧)、随动轮、解耦绳索导线盘(后侧)、驱动绳索导线盘(后侧)、主动轮。主动轮与中心轴由螺钉固定在一起,其余轮盘均通过法兰轴承安装在中心轴上,且轴向位移均被固定。其中,随动轮径向两侧分别安装有驱动绳索转向滑轮、解耦绳索转向滑轮,用于后端关节驱动绳索和解耦绳索在解耦模块中的走线换向。固定轮和主动轮盘面上加工有通孔,用于解耦绳索固定和后端关节驱动绳索导线滑轮的布置。图中两股解耦绳索绳长相等且固定,解耦绳索前端与固定轮固定,经过固定轮上通孔后穿过前侧驱动绳索导线盘上的通孔,然后由解耦绳索导线盘的小孔进入并沿前侧解耦绳索导线盘上的绳槽自上而下缠绕,到达随动轮上与解耦绳索导线盘切合的解耦绳索转向滑轮处,沿滑轮走线到随动轮的后侧,随后按对称的方式沿着后侧解耦绳索导线盘绳槽,穿过驱动绳索导线盘,最后到达主动轮上与主动轮固定连接。

驱动绳索在被动解耦模块中走线方式与驱动绳索类似,进入模块沿驱动绳索导线盘和转向滑轮正反缠绕后出模块。

2.2 解耦原理分析

被动解耦模块的工作示意如图 4 所示。

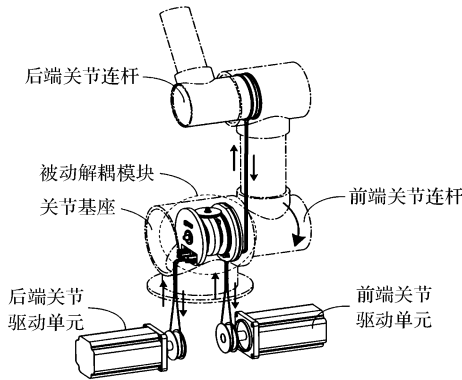


图 4 解耦模块工作示意图

固定轮与关节基座固定,主动轮与前端关节连杆固定。前端关节由置于基座处的驱动单元驱动,通过前端关节驱动绳索传递运动和力。后端关节通过后端关节驱动绳索驱动,该绳索从基座处的电机出发,走线穿过运动解耦模块后,与后端关节处的连杆固定。

解耦模块解耦效果示意如图 5 所示。

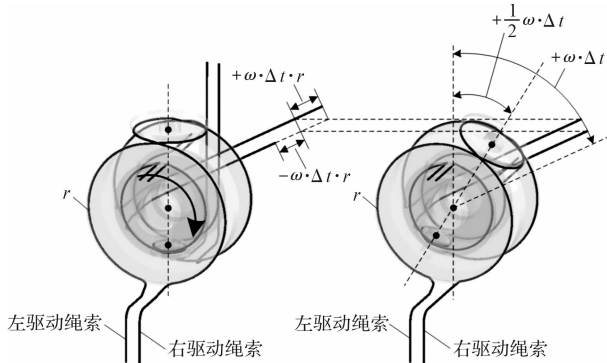


图 5 解耦模块解耦效果示意图

从绳索本身缠绕变化来看,当主动轮以图 5 中所示方向转动时,后端关节左驱动绳索将沿驱动绳索导线盘(后侧)绳槽脱离,与此同时,后端关节右驱动绳索将沿绳槽缠绕,因此原因造成左、右驱动绳索后侧末端将产生位移,位移大小为:

$$\begin{cases} s'_1 = +\theta \cdot r = +(\omega \cdot \Delta t) \cdot r \\ s'_2 = -\theta \cdot r = -(\omega \cdot \Delta t) \cdot r \end{cases} \quad (3)$$

式中: s'_1, s'_2 —左右绳索因耦合而脱离缠绕的绳索末端位移; r —后端关节驱动绳索导线盘绳槽半径; θ —主动轮转过的角度; ω —转动角速度; Δt —前端关节运动时间,以图中绳索向上为正。

然而因解耦绳索带动随动轮旋转,导致左右驱动绳索后侧末端的速率与随动轮角速率的关系为:

$$|v| = \frac{|\omega|}{2} \cdot r \cdot 2 \quad (4)$$

左、右绳索因随动轮带动末端位移大小为:

$$\begin{cases} s_1 = v_1 \cdot \Delta t = -|v| \cdot \Delta t = \\ \quad -\frac{\omega}{2} \cdot r \cdot 2 \cdot \Delta t = -(\omega \cdot r) \cdot \Delta t \\ s_2 = v_2 \cdot \Delta t = +|v| \cdot \Delta t = \\ \quad +\frac{\omega}{2} \cdot r \cdot 2 \cdot \Delta t = +(\omega \cdot r) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_1, v_2 —左、右驱动绳索后侧末端速度; s_1, s_2 —左、右驱动绳索因解耦模块而产生的末端位移。

可以发现:耦合量 s'_1, s'_2 与解耦量 s_1, s_2 相互抵消,从而实现了绳索运动解耦。由此,也即由于绳索的正反缠绕的走线方式,使得后端关节驱动绳索在后侧导线盘的脱离/缠绕绳长量在前侧导线盘上缠绕/脱离,从而补偿了后端关节驱动绳索后侧末端的绳长变化量。

综上所述不同类型的绳驱动关节型机器人的运动耦合问题,可见后端关节驱动绳索在经过该被动解耦模块后,绳索的末端不再有相对位移,实现了运动量的被动补偿,且多股绳索间不会出现拧绳等不可靠的驱动状态,从而实现了绳驱动机器人多关节间的运动被动解耦。

3 运动解耦性能验证

3.1 被动解耦模块验证平台

为验证该被动解耦模块的解耦效果,笔者搭建了解耦验证实验平台,实验平台结构示意图如图 6 所示。

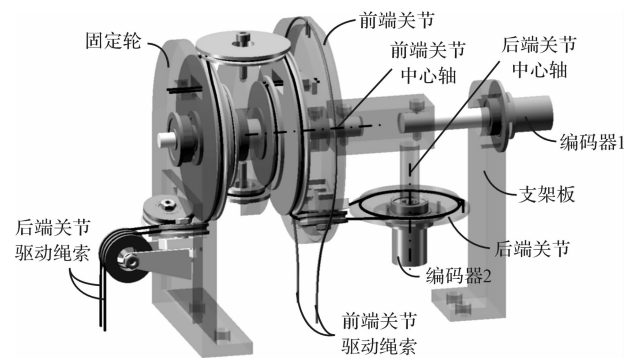


图 6 解耦验证平台示意图

所涉及两个关节轴线呈 90° 夹角,后端关节驱动绳索从解耦模块出来后直接驱动后端关节。编码器 1 读取前端关节运动转角,编码器 2 读取后端关节运动转角。基座处安装有前端关节的驱动单元,电机驱动基座上的同步带组件运动,由同步带带动末端固定在在同步带上的驱动绳索,前端关节驱动绳索经导向滑轮导向走线后直接驱动前端关节正反转。

由于验证解耦效果需要保证前后关节运动独立,本研究将后端关节驱动绳索的前侧末端与基座固连,等效于后端关节驱动单元抱闸,随后后端关节两股驱动绳索经过被动解耦模块缠绕走线,从解耦模块出来后直接驱动后端关节。

解耦验证实验平台整体样机如图 7 所示。

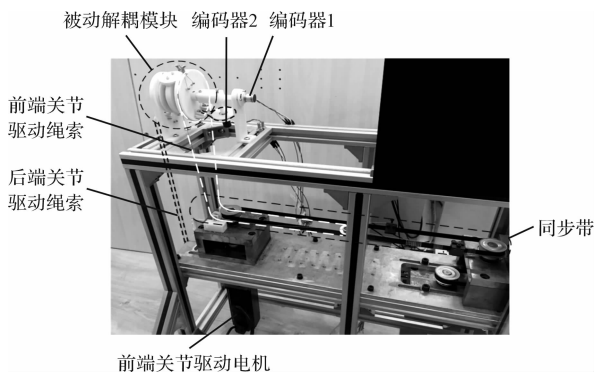


图 7 解耦验证实验平台样机

为验证该绳驱动解耦模块的运动解耦效果,本文设计实验对该机构的运动解耦性能进行评价分析。对绳驱动系统的两驱动绳索进行初始预张紧,实验中,前端关节的驱动电机工作在位置模式,对前端关节电机施加位置控制命令,驱动前端关节作正弦往复转动;通过读取两伺服驱动器的外部编码器寄存器实时获取关节编码器 1、2 的脉冲数据信息,从而得到两关节间的运动的独立关系。

3.2 实验及结果分析

验证实验结果如图 8 所示。

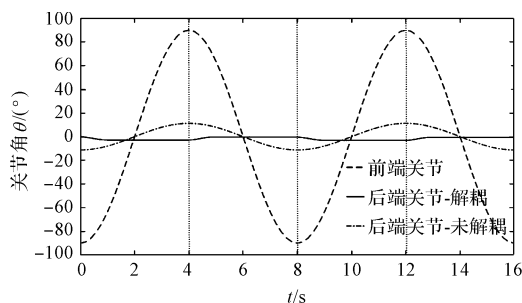


图 8 解耦效果验证结果

虚线—前端关节运动转角随时间变化的曲线;实线—实验中编码器 2 所得后端关节在经过解耦模块后的关节角变化曲线

电机驱动前端关节作正弦往复运动,运动范围在 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。根据前述关节运动耦合关系分析可知:若无被动解耦模块,后端关节由于驱动绳索末端受前端关节运动影响,将会产生相应的耦合运动,其关节运动转角的跟随耦合关系如图中点画线所示;从实验数据曲线可知:经过被动解耦模块解耦后的后端关节驱动绳索带

动后端关节运动并未出现关节间的运动耦合,关节转角近似一条水平线,也即前、后关节间的运动独立性好,说明了该被动解耦机构具有良好的解耦效果。

但从实验结果曲线中也不难发现,后端关节转角在 $t=0\text{ s}$ 、 $t=4\text{ s}$ 、 $t=8\text{ s}$ 、 $t=12\text{ s}$ 等位置出现了关节转角偏移,偏移范围在 $\pm 2.9^{\circ}$ 。

后端关节转角两个往复运动周期内的实验数据变化趋势放大观察如图 9 所示。

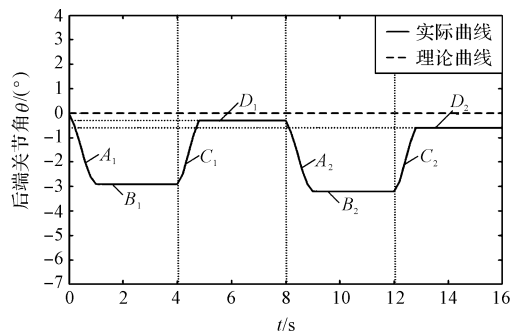


图 9 后端关节转角变化曲线

每个周期大致可分为 A、B、C、D 4 个变化阶段。以第一个周期为例,在 A1 阶段,前端关节开始正向运动,后端关节转角向前端关节运动方向的反向偏移了 2.9° ;在 B1 阶段,后端关节转角保持不变;到 C1 阶段,前端关节换向,后端关节向前端关节运动方向的反向偏移了 2.6° ;在 D1 阶段,后端关节转角不变,维持在 -0.3° 。对于 A1、C1 两次转角偏移,主要由于前端关节驱动方向发生变化,换向过程中,后端关节左右驱动绳索和解耦模块两股解耦绳索发生松紧状态切换,由于绳索本身有一定的伸缩性,导致解耦机构的随动轮有一定的滞后转动,同时后端关节也发生一定的滞后转动,两者综合造成 A1、C1 两处的转角偏移。对于 D1 阶段,后端关节最终在一个周期后保持在 -0.3° 的转角偏移,主要是由于制造、装配误差导致左、右两驱动绳索在解耦模块中的走线存在轻微的不对称。

实验中,为减小 A、C 阶段由于绳索本身伸缩性导致的转角偏移,本研究先对解耦绳索加强预张紧,然后对解耦绳索和驱动绳索同时加强预张紧,并将 3 次实验结果进行对比,对比实验结果如图 10 所示。

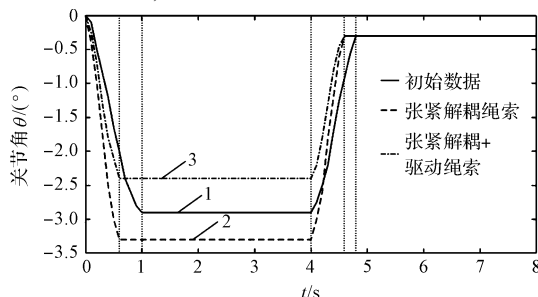


图 10 加强预张紧力后后端关节转角曲线

图 10 中:曲线 1—原始数据;曲线 2—加强解耦绳索预张紧后后端关节转角变化曲线;曲线 3—同时加强解耦绳索和驱动绳索预张紧后后端关节转角变化曲线。

对比曲线 1 和曲线 2 可以发现:在加强两股解耦绳索的预张紧后,后端关节转角的滞后时间更短,但转角偏移增大,这主要是由于在解耦绳索张紧后,解耦绳索换向时松紧切换更快,从而能更早地驱动解耦模块中随动轮跟随转动,从而消除前、后关节运动耦合,但也正是因此,减弱了后端关节跟随前端关节运动耦合的同向转动变化量,由于后端关节驱动绳索伸缩性带来的相对前端关节运动反向的偏移没有变化,相对于曲线 1 总体角度偏移增大;对比曲线 2 和曲线 3 可以发现:在加强解耦绳索预张紧后,再对驱动绳索加强预张紧,后端关节转角的滞后时间不变,转角偏移减小,显然,由于后端关节驱动绳索伸缩性带来的相对前端关节运动反向的偏移减小,最后转角偏移减小;而对比 3 条变化曲线可以发现:由于加工装配带来的不对称误差无法通过张紧措施来消除。

综上所述可知:为改善被动解耦模块的解耦效果:(1)要适当加强绳驱动系统各股绳索的预张紧力,以加快换向时绳索松紧边的切换,从而减小运动滞后;(2)提高机构的加工制造装配的精度,减小由此带来的不对称误差。

4 结束语

本文详细分析了绳驱动关节型机器人存在的前后关节运动耦合问题,针对绳驱动关节耦合问题,创新设计了一种被动解耦机构,通过一种新型的绳索走线方式消除了绳驱动关节型机器人前后关节的运动耦合;搭建了被动解耦模块的实验平台验证了解耦模块具有不错的解耦效果,并对实验数据中所表现出来的转角偏移问题进行原因分析,针对预张紧力的影响效果进行改进对比实验,由对比实验结果得到了改善解耦效果的方式方法。

对于本文所设计的被动解耦模块,后续将进行不同拉伸刚度的绳索进行对比实验,从而对绳驱动关节型机器人的整体结构进行优化;同时,未来将对解耦模

块的力位传递特性进行建模,为被动解耦的绳驱动机器人精确力位控制奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] TOWNSEND W T, SALISBURY J K. Mechanical design for whole-arm manipulation robots and biological systems: towards a new bionics. [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1993.
- [2] WT TOWNSEND J G. Teleoperator slave-WAM design methodology[J]. **Industrial Robot**, 1999, 26(3): 167-177.
- [3] LEE J K, CHOI C H, YOON K H, et al. Design and evaluation of cable-driven manipulator with motion-decoupled joints[C]. International Conference on Smart Manufacturing, Gyeonggi-do: IEEE, 2008.
- [4] LEE J K, CHANG H C, YOON K H, et al. Design of a servo manipulator with tendon transmission[J]. **International Conference on Control, Automation and Systems**, 2008(10): 1653-1656.
- [5] LEE J K, PARK B S, LEE H J, et al. Master-slave servo manipulator system for the PRIDE facility[C]. International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal: IEEE, 2010.
- [6] ZHAO B, NELSON C A. Decoupled cable-driven grasper design based on planetary gear theory[J]. **Journal of Medical Devices**, 2015, 7(2): 020918.
- [7] QUIGLEY M, ASBECK A, NG A. A low-cost compliant 7-DOF robotic manipulator[J]. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 2012, 19(6): 6051-6058.
- [8] 陈伟海,王辉华,于守谦,等. 绳驱动机器人的解耦分析和位置控制仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(1): 94-99.
- [9] 陈伟海,游贤强,崔翔,等. 绳驱动拟人臂机器人的动力学建模及张力分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(3): 335-339.
- [10] 吴青聪,王兴松,杜峰坡,等. 双套索系统力矩传动特性与摩擦补偿分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 22-29.
- [11] 陈林,王兴松. 双套索耦合传动系统建模与分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 24-31.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

华达人,王尧尧,李彬彬,等. 绳驱动机器人被动解耦模块的设计及验证研究[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1279-1284.

HUA Da-ren, WANG Yao-yao, LI Bing-bing, et al. Design and verification of motion-decoupled modular for cable-driven robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(12): 1279-1284.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>