

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.210069

基于移动补偿的绳驱动关节运动解耦方法

贺磊盈^{1,2}, 陈建国¹, 吴天次¹, 杨亮亮¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 提出了一种通过移动补偿解决绳驱动关节运动耦合的方法。首先, 根据运动耦合的机理推导出解耦的约束条件, 并相应地设计了一种 2 自由度绳驱动机械臂; 然后, 为分析绳索的弹性形变对解耦效果的影响, 应用绞盘方程建立了绳索拉力对关节转角偏移影响的理论模型; 最后, 开展了相应的试验。试验结果显示当关节不受外力矩时, 其最大角度偏移量为 0.72° ; 关节上施加一定力矩后, 基于上述模型得到的关节转角偏移量同试验值的差异小于 0.02° 。此外, 关节转角偏移量随着预紧力的增大而减小, 且关节的动态解耦性能良好。以上结果验证了提出的解耦方法的有效性和关节转角偏移模型的准确性。

关键词: 绳驱动; 运动解耦; 弹性形变; 关节转角偏移

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2022)-02-0195-08

A Motion Decoupling Method for Cable-driven Joint Based on Movement Compensation

HE Leiying^{1,2}, CHEN Jianguo¹, WU Tianci¹, YANG Liangliang¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A method is presented to solve the motion coupling of cable-driven joints through movement compensation. Firstly, the constraint conditions for decoupling are deduced according to the principle of motion coupling, and a 2-DOF (degree-of-freedom) cable-driven manipulator is designed correspondingly. To analyze the influence of elastic deformation of the cable on the effectiveness of decoupling, a theoretical model of the relationship between the cable tension and the joint angle offset is established by applying the capstan equation. Finally, some corresponding experiments are carried out. Results show that the maximum angular offset of the joint is 0.72° when no external torque is loaded on the joint, and the difference between the calculated angular offset and the experimental one is less than 0.02° when a certain torque is loaded on the joint. In addition, the angular offset of the joint decreases with the increase of the preload, and the dynamic decoupling performance of the joint is still good. Therefore, the effectiveness of the proposed decoupling method and the accuracy of the joint angle offset model are verified.

Keywords: cable-driven; motion decoupling; elastic deformation; joint angle offset

1 引言 (Introduction)

目前, 农业智能化生产 (例如果蔬智能采摘) 和危险环境的特种检测 (例如石油化工厂的泄漏检测) 中也需要大量应用机械臂。由于这些机械臂均是安装在移动小车上, 且工作在半结构化或非结构化环境中, 因此要求机械臂具备低功耗和高安全性特征。传统的工业机械臂虽然精度高、功能齐全, 但是较大的重量和转动惯量导致能耗大, 大刚度使其安全性较差, 这些缺点限制了其在非工业领域的应用。而绳驱动机械臂采用柔性绳索作为传动介

质, 可以实现远距离传动, 这样方便将驱动电机放于基座或腰部, 大大减小了机械臂的重量和惯量, 从而减小了功耗。而且绳索具有一定的柔顺性, 在安全性方面也具有很大的优势。

因此, 绳驱动机器人也成为了国内外许多学者们的研究热点并被应用在众多领域, 比如外骨骼机器人^[1]。Perry 等^[2]设计了一种具有低惯性、高刚度、零间隙、可反向驱动的绳驱动外骨骼康复机器人。Kirchhoff 团队^[3-4]研制了一款绳索与弹簧组合驱动的拟肌腱驱动机械臂 BioRob, 其优点是使机械结构更节能、更安全, 可防止操作人员与机器人

碰撞造成损伤^[5]。陈伟海等^[6-8]设计了一种用于外骨骼康复的7自由度绳驱动的串并混联拟人臂机器人。

然而,由于绳驱动机械臂的电机放于基座,后端关节的驱动绳索在穿过前端关节时会发生运动耦合现象,因此有必要设计合适的绳轮机构以实现关节间的运动解耦。美国麻省理工学院 Townsend 团队^[9]经过多年研究,开发了一款利用差速轮原理实现关节运动解耦的绳驱动机械臂 WAM,具有良好的交互性和柔顺性,在医疗康复方面得到广泛的应用^[10]。Zhao 等^[11]设计的一种绳驱动医疗手术夹钳,利用行星齿轮的转动特点解决了关节间的运动耦合问题。南京航空航天大学机器人研究团队^[12-13]设计了2种模块化解耦结构,可实现多关节间的运动解耦。Kim^[14]应用滚动接触关节研制了一种低惯量、高刚度、高速的7自由度拟人机械臂,该机械臂包含一个运动解耦的3自由度并联手腕^[15]。Scarcia 等^[16]等设计了一种绳索通过手腕旋转中心的机构,从而实现手指和手腕的运动解耦。Lee 等^[17]设计了一款 BTDSM 机械臂,该机械臂提出了3种不同的解耦结构用以实现不同关节间的运动解耦。Shah 等^[18]应用运动滑轮思想设计了一种保证固定部件和移动部件之间绳索长度恒定的结构,从而实现各个关节间的运动解耦。

以上结构虽然可以实现关节间的运动解耦或近似解耦,但机械结构和绳索的预紧方式均较为复杂,导致关节笨重,且对零部件的机械加工精度要求高。此外,绳驱动机械臂在运动过程中,绳索的弹性形变对机械臂的运动也会产生一定的影响,使机械臂的关节转角发生偏移。针对上述问题,本文借鉴滑轮运动的思想,提出了一种简单的利用动滑轮实现绳驱动关节运动解耦的方法。在此基础上,进一步分析机械臂因绳索弹性形变而产生的关节转角偏移现象,为机械臂的精确运动控制提供理论基础。

2 绳驱动关节运动解耦方法 (Motion decoupling method for cable-driven joints)

2.1 绳驱动关节运动耦合现象

图1显示了绳驱动机械臂的一部分结构,其中包含2个关节、3根连杆。如图1所示,驱动关节*i*的绳索长度主要分为3段, \widehat{AB} 、 \widehat{BC} 和 \widehat{CD} 。当关节*i*转动时, \widehat{BC} 段长度是关节*i+1*绳轮上的包络线长度,是一个定值;绳索在关节*i*绳轮上的包络角度会发生变化,导致 \widehat{AB} 和 \widehat{CD} 段的长度也会相应地

改变,从而使得关节*i+1*发生被动运动,即运动耦合。

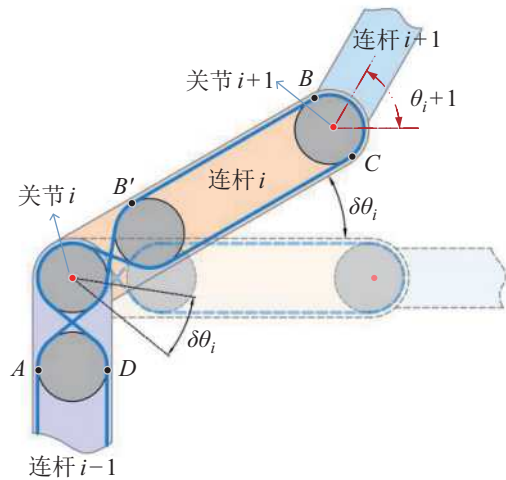


图1 关节运动耦合现象

Fig.1 Description of the joint motion coupling

假设连杆*i*和连杆*i+1*的初始位置均为水平状态(如图1虚线位置所示)。当关节*i*转动 $\delta\theta_i$ 角度后(如图1实线位置所示), \widehat{AB} 段在关节*i*绳轮上的包络角也会相应地增加 $\delta\theta_i$,则 \widehat{AB} 段的长度增加 $r_i \cdot \delta\theta_i$,其中 r_i 为关节*i*上绳轮的半径;同理 \widehat{CD} 段的长度则减小 $r_i \cdot \delta\theta_i$,结果使得关节*i+1*发生被动旋转,转角 $\delta\theta_{i+1} = r_i \cdot \delta\theta_i / r_{i+1}$, r_{i+1} 为关节*i+1*上绳轮的半径。

2.2 解耦原理

为便于叙述,将绳索未绕在绳轮上的部分称为自由段,如图1中的 $\widehat{BB'}$ 段所示。从2.1节分析中可知,绳索在关节*i*处包络长度的改变是产生运动耦合现象的根本原因。为解决耦合问题,一种有效的思路是:当驱动绳索在关节*i*处的包络长度改变时,通过反向改变其自由段的长度来补偿耦合量,从而实现关节间的运动解耦。

根据该思路,本文设计了一种解耦机构,其绕线方式和解耦原理如图2所示。图2(a)(b)中仅描述关节*i*逆时针转动时的绕线方式及解耦原理,图2(c)描述完整的单关节3维绕线方式。该解耦机构在关节每个方向上的运动都需要2条绳索,分别是驱动绳和解耦绳。驱动绳一端连接驱动电机输出的绳轮,另一端先后绕过关节*i*上的过渡轮、导向轮、驱动动滑轮,最后固定在关节*i+1*绳轮上;解耦绳一端固定在解耦轮上,绕过解耦动滑轮后另一端固定在连杆*i*上。导向轮的轴线固定在连杆*i*上;2个动滑轮共轴,且它们的轴线能在连杆*i*上移动;关节*i*上装有过渡轮;解耦轮固定在连杆*i-1*上,其

轴线与关节 i 同轴。除了解耦轮, 其余轮均能相对其轴线转动。

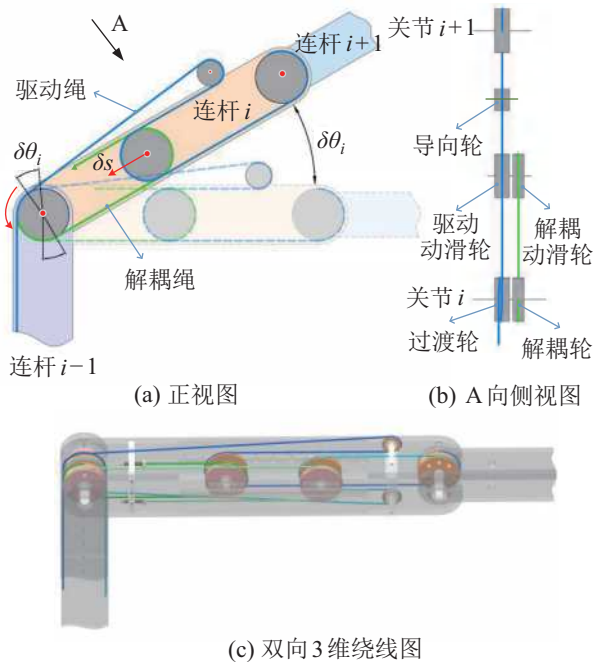


图 2 解耦机构的原理图及绕线方式

Fig.2 Principle of the decoupling mechanism and its winding way

根据几何关系可知, 各个绳轮的位置及半径会影响关节的解耦效果。实现关节运动解耦的充分条件为:

- (1) 关节 i 上解耦轮的直径和过渡轮的直径相等;
- (2) 所有绕经动滑轮的自由段绳索都必须相互平行。

如图 2 所示, 仅当关节 $i+1$ 转动时, 动滑轮不会发生移动。当关节 i 逆时针转动 $\delta\theta_i$ 角度后, 解耦绳在解耦轮上的包络角增大 $\delta\theta_i$, 其包络线长度也相应地增大 $r_i \cdot \delta\theta_i$, 为了保证解耦绳的总长不变, 解耦绳会拉动动滑轮朝解耦轮方向移动, 位移 $\delta s = r_i \cdot \delta\theta_i / 2$ 。同理, 此时驱动绳在关节 i 过渡轮上的包络绳长度会减小 $r_i \cdot \delta\theta_i$, 而动滑轮的移动使得驱动绳在动滑轮两侧的自由段绳索长度都增大 δs , 这样刚好补偿包络段长度的减小, 从而实现关节的运动解耦。关节 i 顺时针转动时的运动解耦原理也一样, 只要增加一套相同机构即可, 如图 2(c) 所示。

提出的解耦机构相对于非解耦机构主要增加了可移动的动滑轮和固定在基座上的解耦轮, 其结构相对简单。若要实现跨多关节的运动解耦, 则在跨越的所有关节上增加相应的解耦机构即可。而当两

关节旋转轴线垂直时, 可利用导向轮改变驱动绳的走线方式^[9], 再应用该解耦机构便可实现垂直关节间的运动解耦。

3 2 自由度绳驱动机械臂的设计与分析 (Design and analysis on the 2-DOF cable-driven manipulator)

3.1 结构设计

为验证上述解耦方法的可行性, 设计了一个 2 自由度绳驱动机械臂, 其 3 维模型如图 3 所示。由于在 2 自由度机械臂中, 大臂的驱动形式不影响系统的耦合关系, 所以为简化模型, 大臂关节 (关节 1) 直接用电机驱动。小臂关节 (关节 2) 由 2 根绳索驱动, 分别为驱动绳 1 和驱动绳 2。解耦绳的一端固定在解耦轮上 (该解耦轮与基座固连), 另一端连接拉力传感器。导向轮的半径是其余轮半径的一半, 其余轮的半径均相等。

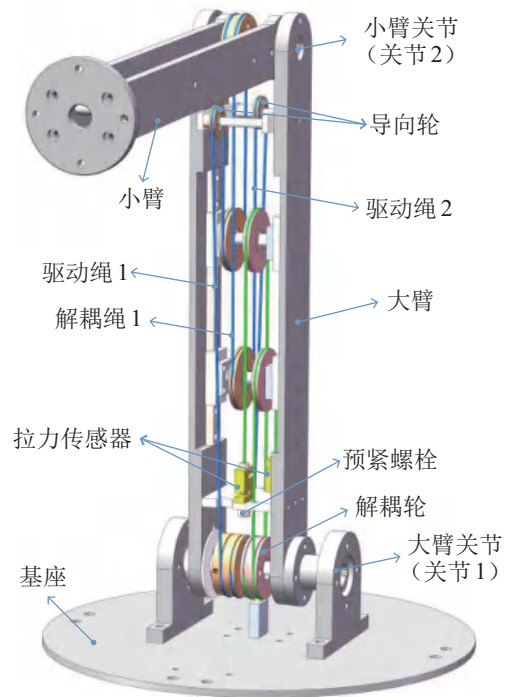


图 3 2 自由度绳驱动解耦机械臂模型
Fig.3 Model of the 2-DOF cable-driven decoupling manipulator

绳驱动机械臂需要在初始状态时预紧绳索。根据该机械臂的力传递特点可知, 所有绳索的受力都是相关的, 因此只需预紧其中一根绳索, 即可实现该关节所有绳索的预紧。针对图 3 设计的结构, 选择在解耦绳索上加入预紧结构是最简单的预紧方式。在解耦绳自由段的末端连上一个螺栓, 通过转动螺栓即可调节绳索的松紧。由于该解耦绳的存

在, 可以很方便地安装拉力传感器以测量绳索的拉力。相比于其他解耦机构, 提出的解耦结构和预紧方式更简单、有效。

3.2 关节转角偏移分析

在绳驱动机械臂的运动过程中, 由于绳索的弹性形变会使机械臂关节产生一定的转角偏移和振动, 从而影响关节的解耦效果, 因此有必要对该转角偏移现象进行分析。由绞盘传动理论可知绳索在自由段的形变为线性弹性形变^[9]; 而包络在绳轮上的绳索因为受到摩擦力的作用, 其弹性形变为非线性的。如图4所示, 绕在绳轮上的绳索可以分为3个区域: 滑动区 a、滑动区 b 和不滑动区。假设滑动区 a 为紧边, 其拉力大于预紧力 ($T_a > T_p$); 滑动区 b 为松边, 其拉力小于预紧力 ($T_b < T_p$)。

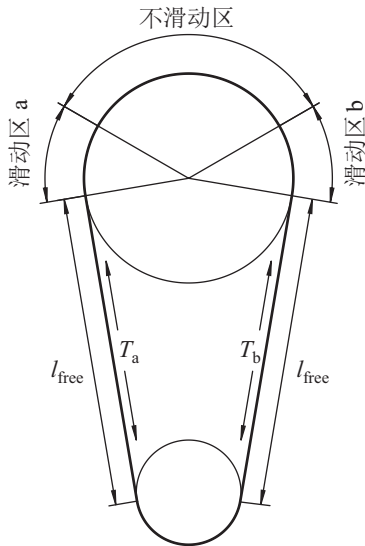


图4 绳索受力、形变图

Fig.4 Force and deformation of the cable

令滑动区的形变量为 $\Delta s = \Delta s_a + \Delta s_b$, 自由段的长度为 l_{free} , 自由段的形变量为 Δl , 根据该绞盘传动刚度理论可得到自由段的形变量为

$$\Delta l = \frac{(T_i - T_p) l_{free}}{E}, \quad i = a, b \quad (1)$$

滑动区 a 的形变量为

$$\Delta s_a = \frac{r}{E\mu} \left(T_a - T_p - T_p \ln \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (2)$$

滑动区 b 的形变量为

$$\Delta s_b = \frac{r}{E\mu} \left(T_p - T_b + T_p \ln \frac{T_b}{T_p} \right) \quad (3)$$

其中 μ 为绳索与绳轮之间的摩擦系数, E 为单位长度的绳索刚度, 即 $E = k/l$, k 为绳索的弹性系数, l 为绳索的长度。

由上述理论可根据绳索的拉力计算得到解耦机构中各段绳索的弹性形变量。如图2所示 (为便于解释, 图中只显示1对绳索), 解耦绳绕在2个绳轮上, 共有3个滑动区, 驱动绳索绕在4个绳轮上, 共有6个滑动区。令导向轮的半径为 $r/2$, 其余轮的半径为 r 。由此可知解耦绳在滑动区的总形变量为 $3\Delta s_a$ 或 $3\Delta s_b$, 驱动绳在滑动区的总形变量为 $5\Delta s_a$ 或 $5\Delta s_b$ 。由于大臂转动会使动滑轮的轴线移动, 从而改变解耦绳和驱动绳自由段的长度, 其改变量为 $\delta s = r \cdot \delta \theta_1$, 其中 $\delta \theta_1$ 为关节1的转角变化量。根据解耦原理, 驱动绳和解耦绳自由段的长度之和不变。假设在初始位置, 紧边驱动绳和松边驱动绳自由段的长度分别为 l_{qa} 和 l_{qb} , 紧边解耦绳和松边解耦绳的自由段的长度分别为 l_{da} 和 l_{db} 。综上所述, 可得紧边解耦绳的总形变量为

$$\Delta l_{da} = 3\Delta s_a + \frac{T_a (l_{da} + \delta s) - T_p l_{da}}{E} \quad (4)$$

松边解耦绳的总形变量为

$$\Delta l_{db} = 3\Delta s_b + \frac{T_b (l_{db} - \delta s) - T_p l_{db}}{E} \quad (5)$$

紧边驱动绳的总形变量为

$$\Delta l_{qa} = 5\Delta s_a + \frac{T_a (l_{qa} - \delta s) - T_p l_{qa}}{E} \quad (6)$$

松边驱动绳的形变量为

$$\Delta l_{qb} = 5\Delta s_b + \frac{T_b (l_{qb} + \delta s) - T_p l_{qb}}{E} \quad (7)$$

根据该解耦结构的传动特点可知, 解耦绳索的形变也会导致驱动绳索自由段的长度改变, 但是该长度的改变量很小, 对绳索自由段形变的影响可忽略不计。所以关节2弧长偏移量为解耦绳和驱动绳的形变量之和。由此, 分别得到关节2弧长紧边和松边的总形变量

$$\Delta L_a = \Delta l_{da} + \Delta l_{qa} = 8\Delta s_a + \frac{(T_a - T_p)L}{E} \quad (8)$$

$$\Delta L_b = \Delta l_{db} + \Delta l_{qb} = 8\Delta s_b + \frac{(T_b - T_p)L}{E} \quad (9)$$

其中 $L = l_{qa} + l_{da} = l_{qb} + l_{db}$ 为松边或紧边绳索自由段的总长度, ΔL_a 为紧边总形变量, ΔL_b 为松边总形变量。考虑到同一个关节所有相关绳索的总形变量为0, 即满足

$$\Delta L_a + \Delta L_b = 0 \quad (10)$$

这样, 关节2由于绳索的弹性形变而产生的转角偏移量分别可以由紧边或松边的总形变量计算得到:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_2 &= \frac{\Delta L_a}{r} \\ &= \frac{8}{E\mu} \left(T_a - T_p - T_p \ln \frac{T_a}{T_p} \right) + \frac{(T_a - T_p)L}{Er} \end{aligned} \quad (11)$$

或

$$\begin{aligned} \Delta\theta_2 &= \frac{\Delta L_b}{r} \\ &= -\frac{8}{E\mu} \left(T_p - T_b + T_p \ln \frac{T_b}{T_p} \right) - \frac{(T_b - T_p)L}{Er} \end{aligned} \quad (12)$$

根据上述理论可知, 在不考虑系统其他摩擦力的影响时, 小臂因绳索的弹性形变而产生的转角偏移量与关节 1 的转角无关, 而与绳索的拉力、绳索刚度、绳轮半径以及绳索与绳轮的摩擦系数有关。因此可以通过测量绳索的拉力来准确估计关节的转角偏移量, 以提高控制精度^[20]。

根据机械臂的传动特点可知, 在平衡状态时, 忽略系统内其他摩擦力的影响, 驱动绳 1 和解耦绳 1 的自由段张力均为 T_1 ; 驱动绳 2 和解耦绳 2 自由段的张力也相同, 设为 T_2 。另外, 设小臂的重力为 G , 重心与关节 2 轴线的距离为 L_2 。大、小臂相对水平线的转角分别为 θ_1 、 θ_2 , 系统初始预紧力为 T_p 。关节 1 和关节 2 驱动电机端输出的转角分别为 q_1 和 q_2 。由于关节 1 是刚性的, 因此 $\theta_1 = q_1$ 。

假设初始位形下大、小臂为竖直状态 (如图 5 所示), $q_1 = 90^\circ$, $q_2 = 0^\circ$, 此时 $T_1 = T_2 = T_p$, 即关节 2 所受外力矩为 0。而在任意位形, 根据小臂的力矩平衡方程得到:

$$(T_1 - T_2)r = GL_2 \cos \theta_2 \quad (13)$$

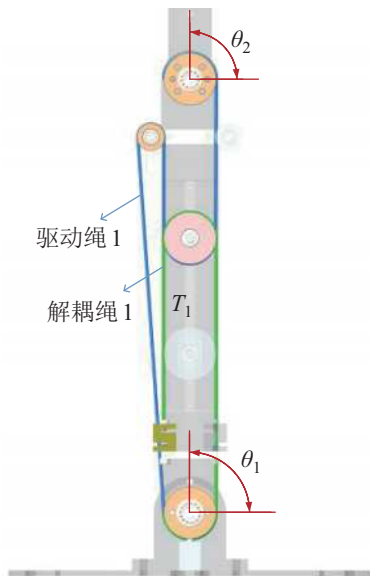


图 5 机械臂初始位形示意图

Fig.5 Illustration of the initial configuration of the manipulator

考虑到关节 2 的弹性形变, 有

$$\theta_2 = q_1 + q_2 + \Delta\theta_2 \quad (14)$$

绳索的松边和紧边取决于 T_1 和 T_2 的大小, 若 $T_1 > T_2$, 驱动绳 1 和解耦绳 1 为紧边, 而驱动绳 2 和解耦绳 2 为松边; 否则, 驱动绳 1 和解耦绳 1 为松边, 而驱动绳 2 和解耦绳 2 为紧边。由此得到:

$$\begin{aligned} T_a &= \max(T_1, T_2) \\ T_b &= \min(T_1, T_2) \end{aligned} \quad (15)$$

综上所述, 将式 (11) 或式 (12) 与式 (13)~(15) 联立, 已知 2 根解耦绳的拉力 T_1 、 T_2 , 就能计算得到机械臂所有位形下关节 2 的转角偏移量 $\Delta\theta_2$ 。

4 试验与结果 (Experiments and results)

4.1 试验平台的搭建

为验证该解耦机构的解耦效果, 研制了 2 自由度绳驱动机械臂样机, 如图 6 所示。驱动系统包括直流无刷电动机 (Deson motor 400276、Deson motor 360323, 均含配套减速器) 和电机驱动器 (Copley Accelnet ACJ-090-12), 关节 2 上装有 17 位绝对值编码器 (多摩川 TS5700 N8501), 2 根解耦绳均连接拉力传感器 (LCLY-108 300N, 精度 0.03%)。机械臂所用的绳索为直径 0.8 mm 的不锈钢绳, 导向轮直径为 17 mm, 其余绳轮直径均为 34 mm, 2 对绳索自由段的总长度均为 747.5 mm。

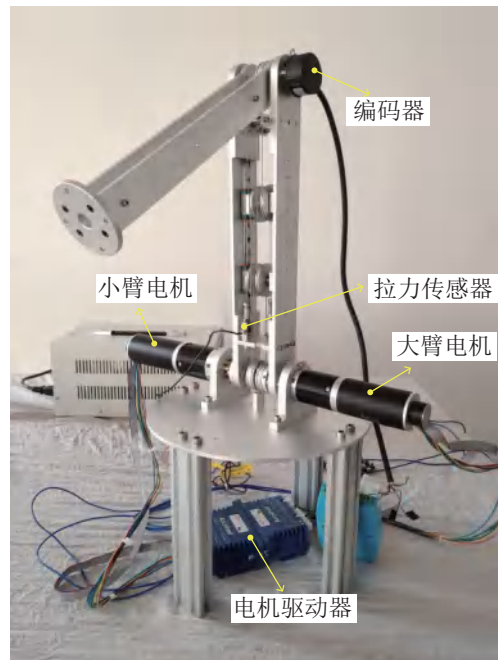


图 6 2 自由度绳驱动机械臂样机

Fig.6 Prototype of the 2-DOF cable-driven manipulator

4.2 参数的测量

为验证模型的正确性, 首先需要辨识参数 E 与

μ 的实际值, 具体方法如图 7 所示。绳索一端连接拉力传感器, 另一端固定在绳轮上, 关节处装有编码器。当小臂末端无负载时, 其自重也会使绳索张紧, 将此时的拉力设为初始预紧力 T_p 。通过在小臂末端添加不同重量的砝码, 来改变绳索的拉力 T , 同时用编码器测量该拉力下关节 2 的相对转角偏移量 $\Delta\theta$ 。此时绳索只有 1 个滑动区, 参考式 (11) 可得系统中 $\Delta\theta$ 与 T 的关系为

$$\Delta\theta = \frac{1}{E\mu} \left(T - T_p - T_p \ln \frac{T}{T_p} \right) + \frac{(T - T_p) l_{\text{free}}}{Er} \quad (16)$$

式中绳轮半径 $r = 17 \text{ mm}$, 预紧力 $T_p = 24.50 \text{ N}$, 绳索自由段的长度 $l_{\text{free}} = 223.5 \text{ mm}$ 。通过测量 20 组不同拉力下的数据, 利用非线性最小二乘法逼近数据, 得到 $E = 52011 \text{ N/m}^2$, $\mu = 0.12$ 。

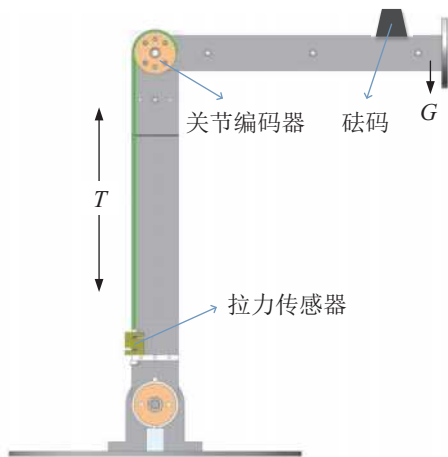


图 7 参数测量方法示意图

Fig.7 Illustration of the measurement of parameters

4.3 试验及结果分析

4.3.1 无外力矩时关节解耦效果测试

在本试验中去掉小臂, 这样关节 2 就不受任何外力矩的作用, 避免绳索弹性形变所产生的关节转角偏移。试验时的起始位形 $q_1 = q_2 = 0^\circ$, 预紧力 $T_p = 26.46 \text{ N}$, 关节 2 固定, 关节 1 先从 0° 位形按梯形速度方式运动到 180° , 然后再按相同运动方式反向运动至 0° 位形。其中匀速阶段的角速度为 $14.74^\circ/\text{s}$, 加减速时间为 0.3 s 。运动过程中以 200 Hz 的采样频率实时采集编码器的数值, 结果如图 8 所示。

从图中可以看出, 在此运动过程中关节 2 的转角偏移量变化比较小, 变化幅值小于 0.72° 。从 2.1 节耦合现象的分析中可知, 若未加入该解耦机构, 关节 2 的耦合角度范围为 $\pm 180^\circ$ 。由此可见, 设计的解耦机构能有效解除关节 1 的运动对关节 2 角度

的影响。但是, 在大臂运动过程中, 绳一轮之间的摩擦力也在不断变化, 使得绳索发生轻微的弹性形变, 从而在一定程度上影响关节 2 的解耦效果。

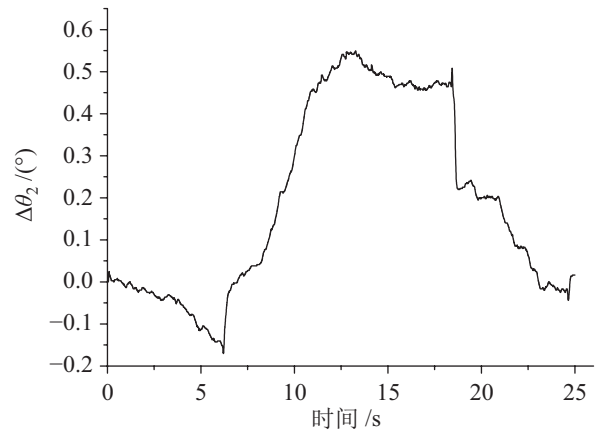


图 8 无外力矩时的关节解耦效果

Fig.8 Result of joint decoupling effect without external torque

4.3.2 解耦关节转角偏移模型验证

为证明解耦关节转角偏移模型的准确性, 将机械臂调节至图 7 所示位形, 在小臂上增加砝码以调整关节 2 的外力矩, 从而改变两端绳索的拉力, 测量此时绳索的拉力与关节 2 的转角偏移量。总共测量 3 组试验, 预紧力分别为 30.97 N 、 38.32 N 和 41.75 N 。试验时每次通过增加砝码改变的拉力大小为 4.9 N 。由于小臂的自重导致难以确定关节 2 力矩为 0 时编码器的数值, 所以每组实验均以第 1 个数据为基准, 设此时编码器数值为 0。将紧边拉力 T_a 代入式 (11) 或松边的拉力 T_b 代入式 (12) 均可求出关节 2 的转角偏移量。由于紧边拉力大, 相对误差比较小, 因此试验中用紧边拉力来估计偏移量的理论值。

图 9 显示 3 组初始预紧力下, 紧边拉力 T_a 对关节 2 转角偏移的影响。从试验结果可以发现, 测量值同理论值非常接近, 最大误差不超过 0.02° , 从而验证了关节转角偏移模型的准确性。同时, 预紧力越大, 关节转角偏移量也就越小。另外, 关节转角偏移量在一定范围内同紧边拉力 T_a 之间近似呈线性关系, 因此可以把该解耦关节等效为弹性关节。

4.3.3 机械臂关节的动态解耦效果测试

本试验中大臂和小臂在初始位置下均为水平状态, 关节 1 按梯形速度做 $0^\circ - 180^\circ - 0^\circ$ 之间的往复运动, 其中加减速时间均为 4 s , 匀速阶段的速度为 $17.70^\circ/\text{s}$, 编码器采样频率 200 Hz 。同样, 试验分为 3 组, 每组的初始预紧力分别为 28.22 N 、 38.02 N 和 49.10 N , 试验结果如图 10 所示。图中虚线为关节 1 的角速度 ω_1 曲线。

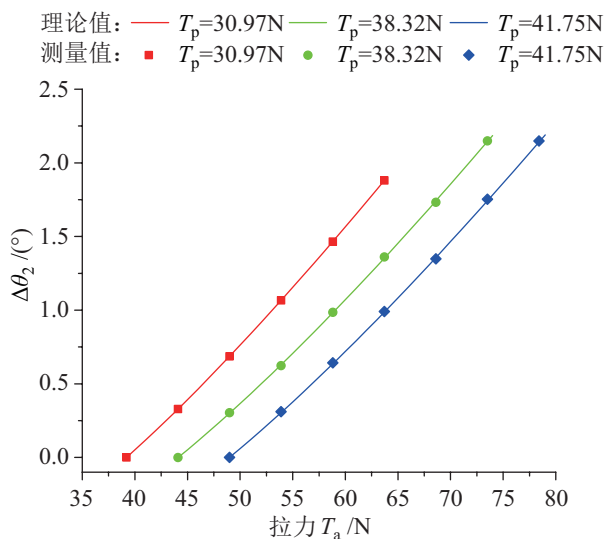


图9 关节2的转角偏移试验结果

Fig.9 Experimental results of the angle offset of joint-2

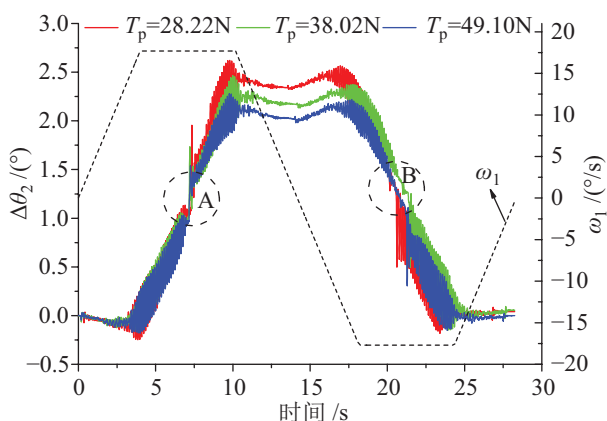


图10 关节2动态解耦效果

Fig.10 Results of the dynamic decoupling effect of joint-2

观察图10可以发现:

(1) 机械臂关节1运动过程中关节2的转角偏移量会发生明显的变化,但是偏移量不超过 3.0° ,表明关节2的动态解耦性能良好;

(2) 关节2的转角偏移量会发生周期性的抖动,尤其是匀速运行阶段,这是由于关节2的动态弹性形变导致的;

(3) 随着预紧力增大,机械臂关节2的转角偏移量减小;

(4) 在A、B区域,关节2的转角偏移量发生明显突变,此时对应的 $q_1 \approx 90^\circ$,这是因为机械臂在转过竖直位形时,关节2所受重力力矩方向突然改变,使得关节由于行星齿轮减速器的齿隙产生角度跳动。

根据上述试验结果可知,提出的解耦方法的解耦效果良好,也验证了关节转角偏移模型的准确性。通过测量绳索拉力,并结合关节转角偏移模

型,不仅可以准确估计关节的转角偏移量,同时也可以得到关节所受力矩,因此在精度要求不高的应用场合中可以不使用关节编码器和扭矩传感器。

为了实现机械臂精确的运动控制,获得理想的定位精度,则需要更换高性能减速器,同时应用鲁棒的减振控制算法消除抖动。

5 结论 (Conclusion)

(1) 本文对绳驱动机械臂关节运动耦合现象进行了分析,提出了一种采用通过动滑轮补偿关节运动耦合量,从而实现绳驱动关节运动解耦的方法。

(2) 基于解耦原理,研制了一种2自由度绳驱动机械臂。进而分析了绳索的弹性形变对关节解耦效果的影响,建立了关节转角偏移理论模型。

(3) 通过试验验证了提出的解耦机构的有效性,以及关节转角偏移模型的准确性,同时显示关节转角偏移量同紧边拉力 T_a 之间近似呈线性关系,预紧力越大,关节转角偏移量越小。

(4) 机械臂的动态测试试验结果表明机械臂关节的动态解耦性能良好,但为了实现高精度定位,后续需要应用鲁棒的减振控制算法。

参考文献 (References)

- [1] Grosu S, de Rijcke L, Grosu V, et al. Driving robotic exoskeletons using cable-based transmissions: A qualitative analysis and overview[J]. Applied Mechanics Reviews, 2018, 70(6). DOI: 10.1115/1.4042399.
- [2] Perry J C, Rosen J, Burns S. Upper-limb powered exoskeleton design[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(4): 408-417.
- [3] Kirchoff J. Towards dependability of ultra lightweight tendon driven series elastic robots[D]. Darmstadt, Germany: The Technical University of Darmstadt, 2018.
- [4] Kirchoff J, Stryk O V. Velocity estimation for ultra lightweight tendon driven series elastic robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 664-671.
- [5] Lens T, Kunz J, Stryk O V, et al. BioRob-arm: A quickly deployable and intrinsically safe, light-weight robot arm for service robotics applications[C]//41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [6] 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.
Chen W H, You X Q, Cui X, et al. Dynamics modeling and tension analysis for a cable-driven humanoid-arm robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(3): 335-339.
- [7] 陈伟海, 陈竞圆, 崔翔, 等. 绳驱动拟人臂机器人的刚度分析和优化[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 12-16.

- Chen W H, Chen J Y, Cui X, et al. Stiffness analysis and optimization of a novel cable driven anthropomorphic-arm manipulator[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(2): 12-16.
- [8] 王建华, 刘素庆, 陈伟海. 具有关节角反馈的绳驱动仿人肩关节的张力优化与控制[J]. 机器人, 2011, 33(3): 324-331.
- Wang J H, Liu S Q, Chen W H. Tension optimization and control of a cable-driven humanoid shoulder with joint angle feedback[J]. Robot, 2011, 33(3): 324-331.
- [9] Townsend W T, Guertin J A. Teleoperator slave – WAM design methodology[J]. Industrial Robot, 1999, 26(3): 167-177.
- [10] Lioulemes A, Theofanidis M, Kanal V, et al. MAGNI dynamics: A vision-based kinematic and dynamic upper-limb model for intelligent robotic rehabilitation[J]. International Journal of Biomedical and Biological Engineering, 2017, 11(4): 158-167.
- [11] Zhao B L, Nelson C A. Decoupled cable-driven grasper design based on planetary gear theory[J]. Journal of Medical Devices, 2013, 7(2). DOI: 10.1115/1.4024329.
- [12] 蒋素荣. 绳驱动机械臂解耦方法与鲁棒控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- Jiang S R. Research on motion-decoupling methods and robust control of cable-driven manipulator system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [13] Jiang S R, Hua D R, Wang Y Y, et al. Design and modeling of motion-decoupling mechanism for cable-driven joints[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5). DOI: 10.1177/1687814018777428.
- [14] Kim Y J. Anthropomorphic low-inertia high-stiffness manipulator for high-speed safe interaction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(6): 1358-1374.
- [15] Kim Y J, Kim J I, Jang W. Quaternion joint: Dexterous 3-DOF joint representing quaternion motion for high-speed safe interaction[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 935-942.
- [16] Scarcia U, Melchiorri C, Palli G. Towards simplicity: On the design of a 2-DOFs wrist mechanism for tendon-driven robotic hands[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1317-1322.
- [17] Lee J K, Choi C H, Yoon K H, et al. Design of a servo manipulator with tendon transmission[C]//International Conference on Control, Automation and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 1653-1656.
- [18] Shah D, Parmiggiani A, Kim Y J. Constant length tendon routing mechanism through axial joint[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 753-758.
- [19] Baser O, Konukseven E I. Theoretical and experimental determination of capstan drive slip error[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(6): 815-827.
- [20] Chen L, Wang X S, Xu W L. Inverse transmission model and compensation control of a single-tendon-sheath actuator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1424-1433.

作者简介:

- 贺磊盈 (1983-), 男, 博士, 副教授。研究领域: 机器人机构学, 机器人视觉技术。
- 陈建国 (1995-), 男, 硕士生。研究领域: 绳驱动机械臂的结构设计。

(上接第 194 页)

- [34] Banerjee S, Lavie A. METEOR: An automatic metric for MT evaluation with improved correlation with human judgments[C]//ACL Workshop on Intrinsic and Extrinsic Evaluation Measures for Machine Translation and/or Summarization. Stroudsburg, USA: ACL, 2005: 65-72.
- [35] Lin C Y. ROUGE: A package for automatic evaluation of summaries[C]//Workshop on Text Summarization Branches Out, Post-Conference Workshop of ACL. Stroudsburg, USA: ACL, 2004: 74-81.
- [36] Vedantam R, Zitnick C L, Parikh D. CIDEr: Consensus-based image description evaluation[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 4566-4575.
- [37] Ramanishka V, Das A, Zhang J M, et al. Top-down visual saliency guided by captions[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 3135-3144.
- [38] Chen X, Fang H, Lin T Y, et al. Microsoft COCO captions: Data collection and evaluation server[DB/OL]. (2015-04-3)[2020-11-12]. <https://arxiv.org/abs/1504.00325v2>.
- [39] Venugopalan S, Rohrbach M, Donahue J, et al. Sequence to sequence – Video to text[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 4534-4542.
- [40] Gan Z, Gan C, He X D, et al. Semantic compositional networks for visual captioning[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 1141-1150.
- [41] Quigley M, Gerkey B, Conley K, et al. ROS: An open-source robot operating system[A/OL]. [2020-11-12]. <http://www.robots.stanford.edu/~ang/papers/icra09-ROS.pdf>.
- [42] Chitta S, Sucas I, Cousins S. MoveIt![J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2012, 19(1): 18-19.
- [43] Bochkovskiy A, Wang C Y, Liao H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection[DB/OL]. (2020-04-23)[2020-11-12]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.

作者简介:

- 莫秀云 (1995-), 女, 硕士生。研究领域: 机器视觉。
- 陈俊洪 (1995-), 男, 博士生。研究领域: 智能机器人, 计算机视觉。
- 杨振国 (1988-), 男, 副教授, 硕士生导师。研究领域: 多模态机器学习, 舆情监测, 深度学习等。