

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.06.002

介入手术机器人滑轮绳索系统传动特性的研究^{*}

殷 杰, 齐 飞, 鞠 峰, 陈 柏^{*}

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对介入手术导管机器人绳索运动过程中存在非线性摩擦力的问题,对滑轮-绳索系统传动特性进行了研究,利用经典 Capstan 方程对传动过程中绳索受力进行了分析,建立了摩擦力与包角的函数关系,并根据 Power 法则分析了摩擦力与材料接触特性的关系;利用拉力传感器对传动过程中绳索的输入力和输出力进行了测量,并通过改变包角大小对绳索系统摩擦力进行了实验,分析了传动模型的准确性。研究结果表明:滑轮绳索系统运动过程中摩擦力大小与包角及材料的接触特性有关,当采用高分子材料作为驱动绳索时,考虑到粘弹性变形,绳索受到的摩擦力较小,系统传动效率可到达 90%,保证了力控制的精度。

关键词:介入手术机器人;力控制;滑轮绳索模型

中图分类号:TH112.3;TP242.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)06-0560-06

Characteristics of cable-pulley system for interventional surgical robot

YIN Jie, QI Fei, JU Feng, CHEN Bai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem of nonlinear friction in the movement of the interventional surgical robot, the transmission characteristics of the cable-pulley system were investigated. The classical Capstan equation was used for analysis of the force of the cable in the transmission process. After the analysis of the relationship between friction and wrapping angle, the relationships between friction and material contact characteristics were also established by power law. Then, the input force and output force of the cable in the transmission process were measured by the tension sensor, and the friction of the cable system was tested by changing the wrapping angle. Finally, the accuracy of the transmission model was analyzed. The results indicate that the friction of the pulley cable system is related to the contact characteristics of the material and wrapping angle. When using the polymer material as the driving cable and considering viscoelastic deformation, the frictional force of the rope is small and the system transmission efficiency can reach 90%, which ensures the precision of the force control.

Key words: interventional surgical robot; force control; cable-pulley system

0 引 言

随着达芬奇手术机器人的出现和推广应用^[1],机器人辅助介入手术系统得到广泛的关注,国内外很多学者对这个领域展开一系列研究。相比于传统介入手

术治疗,机器人技术能够提高医疗器械灵巧性和控制精度,同时能大大提高手术成功率和降低医生的疲劳程度^[2]。当微创介入导管机器人进入人体时,保证机器人运动精度是非常关键的,很小的力损失都会对人体造成伤害,甚至威胁病人的生命。因此,手术机器人精确力控制一直是研究的热点和难题^[3]。为了实现

收稿日期:2017-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575256);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0243);南京航空航天大学启动基金(90YAH16062)

作者简介:殷 杰(1992-),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事医疗介入导管机器人方面的研究。E-mail:1977961159@qq.com

通信联系人:陈 柏,男,博士,教授。E-mail:chenbye@nuaa.edu.cn

精确力控制,需要研究手术机器人系统的力传输特性。

介入导管手术机器人主要采用绳索驱动机构^[4],能在狭小的血管中运动,减小体积和重量,有较高的灵活性。然而,由于滞后、侧隙、死区等非线性问题,绳驱动方式存在一些缺陷,这些非线性行为导致张力损失和系统性能差^[5]。根据机械结构传动模型进行划分,绳驱动结构大致可以两种:一种是通过滑轮进行换向,其传动路线固定;第二种可以通过套索进行传动,其传动路线可以是任意方向。这两种传动方式在医疗机器人中都有所应用,如下肢外骨骼康复机器人,达芬奇手术机器人,Sensei 送管机器人系统,腹腔镜手术机器人等^[6]。但是由于在传动过程中存在非线性摩擦,导致在使用力控制模型控制导管机器人时,难以准确控制其驱动力的大小。

一种解决方式是在传动系统末端添加传感器测量实际输出力,但是由于机器人机械结构复杂且微小,不易直接在末端添加传感器。同时传感器对环境的要求很高,在插管实验时人体环境会对其较大干扰,导致精度下降。

另一种方式是通过建立传动模型对输出力进行实时预测和计算,这种方式是现在主流的研究方向。吴青松等^[7]推导了任意负载条件下的双套索力矩传动模型,并通过试验验证双套索系统在正弦输入各阶段力矩传动关系,并建立摩擦补偿模型;GAO Xiaoping^[8-9]对 Capstan 方程进行改进,引入 power 法则摩擦力和弯曲刚度对高性能的纱线传动模型进行分析,为精确控制张力提供理论依据;XUE Ren-feng^[10]将该方法应用于腹腔镜手术机器人末端执行器,并提出了力和位置补偿策略;PENG Yun^[11]基于任意拉格朗日欧拉耦合法,提出了有效的摩擦索滑轮系统多体建模方法。

针对介入导管机器人的滑轮绳索传动结构,本文在 Capstan 方程基础上,建立系统传动模型,并分析传动过程中非线性摩擦力,通过仿真和实验分析传动模型的准确性,在不加入传感器的情况下,准确预测绳索末端输出力。

1 滑轮绳索系统

在机器人驱动单元中由于绳索需要换向和预紧,在传动系统中常使用滑轮进行传动和换向,同时在绳驱动机器人系统中存在非线性摩擦和导管本体反作用力,在手术过程中很难预测力和位置^[12-14]。本文建立了驱动单元的力传递模型,以便更好地实现导管力控制,保证导管介入的安全性和可靠性。

介入导管机器人单节绳索通过两组滑轮进行转向,最终将力传递到导管前端。导管采用单线驱动方式,其本身可以看成弹性体,施加外力变形,撤去外力恢复原状,因此可以用弹簧等效为导管本体,机器人驱动模块滑轮绳索系统图如图 1 所示。

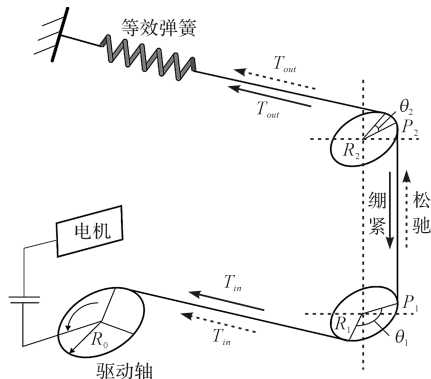


图1 机器人驱动模块滑轮绳索系统图

虚线—该状态下力的方向; P_1, P_2 —两个滑轮; R_0 —驱动轴半径; R_1, θ_1 —滑轮 P_1 半径和夹角; R_2, θ_2 —滑轮 P_2 半径和夹角。

整个系统类似于一个开环系统,具有两种独立的状态。实线表示电机正转时,绳索处于紧绷状态,此时驱动绳索受到电机输出力 T_{in} 和弹簧阻力 T_{out} 的作用,且 $T_{in} > T_{out}$,绳索收缩,拉紧弹簧,黑色箭头表示该状态下力的方向;当电机反转时,绳索处于放松状态,且 $T_{in} < T_{out}$,此时主要依靠弹簧本身的力驱动绳索,绳索伸长。

2 滑轮绳索建模

2.1 经典 Capstan 方程

经典的 Capstan 方程用于建立皮带轮的传动模型,主要研究摩擦力对其传动效率的影响,是相对简单的传动模型。由于摩擦力和张力的作用,绳索张力在滑轮两端的力是不相等的。

$$\frac{T_{i,i-1}}{T_{i+1,i}} = e^{\mu\theta} \quad (1)$$

式中: $T_{i,i-1}$ —输入力; $T_{i+1,i}$ —输出力; μ —摩擦系数; α —包角。

由公式可见,当摩擦系数和包角一定时,输入力 $T_{i,i-1}$ 和输出力 $T_{i+1,i}$ 成线性关系;当摩擦系数和输入力一定时,包角越大,输出力越小;当包角和输入力一定时,摩擦系数越大,输出力越小。

2.2 非线性摩擦建模

经典的 Capstan 方程相对简单,假设条件较苛刻。

仅仅考虑当两个物体接触的时候,遵循 Amontons 准则^[15]。Amontons 准则只是对纯刚体试用,当两个物体产生粘弹性变形时,遵循 Power 准则,力的表达式为:

$$F = aN^n, n \leq 1 \quad (2)$$

式中: F —摩擦力; N —正向力; a —接触特性常量 1; n —接触特性常量 2。

当 $n = 1$ 时,材料体现塑性变形;当 $n = 0.67$ 时,材料体现出粘弹性变形。当 $a = \mu, n = 1$ 时,Power 准则和 Amontons 准则一致。而本文采用的大力马的钓鱼线是一种高强度聚乙烯纤维线,属于超高分子聚合物,同时具备粘性和弹性。理想弹性体是受到外力形变很小,符合胡克定律,撤去外力后能够恢复原状。理想粘性液体是指符合牛顿定律的流体,撤去外力之后不能恢复。在外力作用下,高分子材料的特性会介于弹性和粘性之间。

在滑轮传动过程中,整个受力过程如图 2 所示。

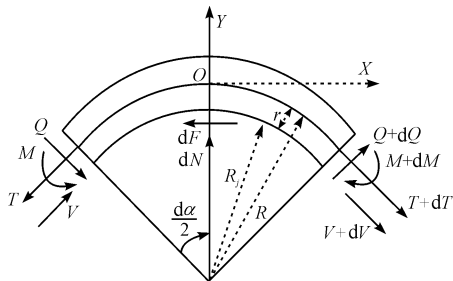


图 2 绳索受力分析图

T —绳子的张力; N —绳子的正压力; V —运动方向; M —剪切力矩; Q —剪切应力; F —摩擦力; α —包角; R_j —第 j 个滑轮半径; r —绳索半径; R —滑轮半径与绳索半径之和

在无限小绳索中点处取原点 O , X 轴沿切线方向向右。考虑到 x, y 方向的受力平衡和扭矩 M 平衡,可以推导出 X 方向受力平衡:

$$F_X = (T + dT) \cos \frac{d\alpha}{2} - T \cos \frac{d\alpha}{2} + (Q + dQ) \sin \frac{d\alpha}{2} + Q \sin \frac{d\alpha}{2} - dF = 0 \quad (3)$$

Y 方向受力平衡:

$$F_Y = (Q + dQ) \cos \frac{d\alpha}{2} - Q \cos \frac{d\alpha}{2} - (T + dT) \sin \frac{d\alpha}{2} - T \sin \frac{d\alpha}{2} - dN = 0 \quad (4)$$

M 转矩平衡:

$$M_0 = (M + dM) - M - (Q + dQ) \frac{R d\alpha}{2} - dQ \frac{R d\alpha}{2} + r dF = 0 \quad (5)$$

由于 $d\alpha \rightarrow 0, \sin d\alpha \rightarrow d\alpha, \cos d\alpha \rightarrow 1$, 方程可以简化为:

$$\begin{cases} dT + Q d\alpha - dF = 0 \\ dQ - T d\alpha + dN = 0 \\ dM - Q R d\alpha + r dF = 0 \end{cases} \quad (6)$$

整套系统包括非线性摩擦,但是由于使用了柔性绳,可以忽略弯曲刚度的影响。

把 $Q = M = 0, r = 0$ 代入式(3,4) 可得:

$$\begin{aligned} T &= a N^n \\ -T d\alpha + dN &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

最终可得:

$$\begin{aligned} N(\alpha) &= [N^{1-n}(0) + a(1-n)\alpha]^{\frac{1}{1-n}} \\ T(\alpha) &= a \left[\left(\frac{T(0)}{a} \right)^{\frac{1-n}{n}} + a(1-n)\alpha \right]^{\frac{n}{1-n}} \end{aligned} \quad (8)$$

在 $T_{i-1,i}$ 滑轮输入绳子的输入力 $T_{i-1,i}$ 和输出力 $T_{i+1,i}$, 输入力 $T_{i-1,i}$ 和输出力 $T_{i+1,i}$ 的关系为:

$$T_{i+1,i} = a \left[\left(\frac{T_{i-1,i}}{a} \right)^{\frac{1-n}{n}} + a(1-n)\theta_i \right]^{\frac{n}{1-n}} \quad (9)$$

根据式(9) 分析可得:在 a, n, θ 一定的情况下,输入力越大,输出力越大;当输入力不变时,包角 θ 越大,输出力越小。

3 滑轮绳索系统仿真及实验分析

3.1 仿真分析

本研究令输出力 $T_{i+1,i} = 1$, 改变 a 和 n 取值,即改变接触特性,模拟绳索材料两种变形状态,绘制出输出输入比例($1/T_{i-1,i}$) 随包角变化的曲线。笔者利用经典模型,当 $n = 1$ 时,改变 a 的值,绘制出曲线(实线和点虚线)。根据非线性摩擦模型,保证 a 值为 0.15 和 0.30, 分别取 n 为 0.99(塑性变形)和 0.67(粘弹性变形)进行仿真。

本研究同时对两种模型进行对比仿真,一种是经典的 Capstan 方程模型,另一种是包含非线性摩擦力的滑轮绳索模型,两种模型仿真对比图如图 3 所示。

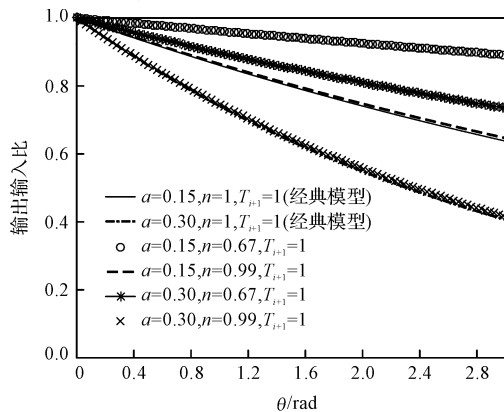


图 3 两种模型仿真对比图

在经典 Capstan 方程中,当 $n = 1$ 时,摩擦系数 $\mu = a$,得到曲线一、二,两条曲线在包角变大时,其输出输入的比值越小,由于输出力一定, a 越大输入力越大,力损失也就越大,控制精度相对较差;而考虑其非线性摩擦时,在 a 不变时,对比塑性变形和粘弹性变形 ($n = 1, n = 0.67$),可知塑性变形时,包角和输出输入比成负相关,而粘弹性变形时,输入力和输出力的差值较小,力损失小,有利于提高控制精度。

对比曲线1(实线)和曲线4(虚线),其 a 和 n 的值是一致的,两种模型不同,但绘制的曲线相同,由此可见非线性摩擦模型和经典 Capstan 方程具有一致性,经典 Capstan 方程是非线性摩擦模型一种特殊情况。

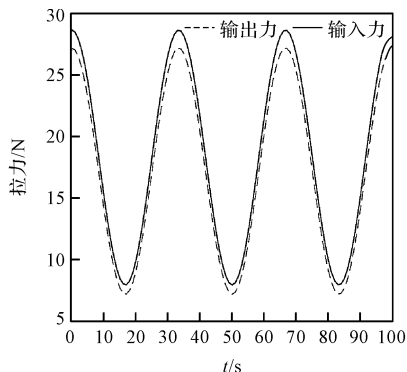
利用非线性模型对输入力和输出力进行仿真,使 $\mu = 0.3, n = 0.67, \theta = \pi$,令输出力:

$$T_{i+1,i} = 10\sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right) + 17.25 \quad (10)$$

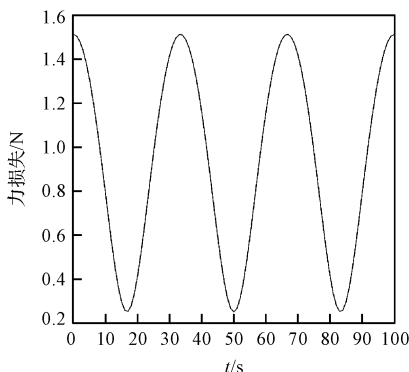
式中: f —频率, $f = 0.03 \text{ Hz}$; t —时间。

将输入力代入式(9),计算 $T_{i-1,i}$ 输入力的大小,同时模拟力损失的大小。

仿真分析图如图4所示。



(a) 输入输出力仿真图



(b) 力损失仿真图

图4 仿真分析图

由图4(a)可知,在一个周期内,输入力随时间先变小之后变大,输出力也是先变小后变大,并且成正弦分布;由4(b)可知,力损失是随时间近似成正弦分布,

在输入力最大时,输出力最大,力损失最大;在输入力最小时,输出力最小,力损失也最小。

3.2 实验平台搭建

本研究对上述两种模型进行分析,设计实验验证理论和仿真的准确性。根据简图1搭建实验平台,如图5所示。

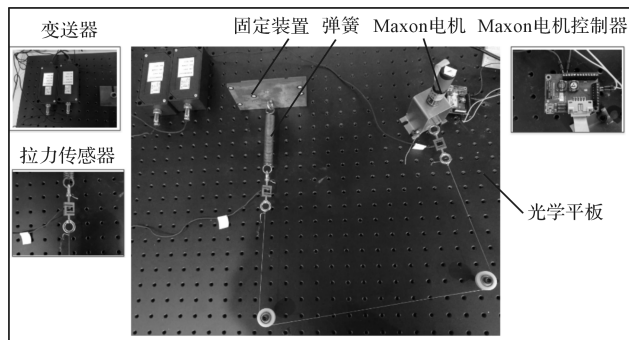


图5 实验验证平台

本研究在输入和输出端添加拉力传感器,以便测量力的大小。拉力传感器用于测量输入力和输出力,利用变送器将力学量转换成标准电压信号输出 $0 \sim 5 \text{ V}$,并直接与自动控制设备接口或与计算机联网。Maxon电机提供初始的预紧力,以及位置模式下正弦输出,保证正弦输出力,实现绳长和力控制。电机控制器用于发送命令控制电机,具有速度、位置和电流模式,同时具有两个模拟量输入端口,可以读取两个拉力传感器的数值,并将数据发送至上位机进行处理。

首先在实验前,需要对两个传感器进行标定,保证测量值的准确性。测量时,空载状态为 300 g ,分别再加载 $0, 200 \text{ g}, 400 \text{ g}, 600 \text{ g}, 800 \text{ g}, 1\,000 \text{ g}, 1\,200 \text{ g}, 1\,400 \text{ g}, 1\,600 \text{ g}, 1\,800 \text{ g}, 2\,000 \text{ g}, 2\,200 \text{ g}, 2\,400 \text{ g}, 2\,600 \text{ g}, 2\,800 \text{ g}, 3\,000 \text{ g}, 3\,200 \text{ g}$ 的砝码,等信号稳定后,读取电压值并保存至文本文件中,在 Matlab 中对其求平均值,在利用 cftool 工具包拟合曲线,得到两组标定曲线。

3.3 实验分析

该实验利用 Maxon 电机的位置模式,输入正弦轨迹:

$$\beta = \frac{1\,500\sin(2\pi ft + \pi/2)}{2\,048} (f = 0.03\text{hz}) \quad (11)$$

式中: β —输出角度变化,Maxon 电机位置模式中以 qc 为单位,2 048 qc 为电机转一圈的大小。

通过调整电机位置,拉动绳索控制初始预紧力。绳索的伸长量为:

$$x = \frac{1\,500\sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right)}{2\,048} * 2\pi r_1 \quad (12)$$

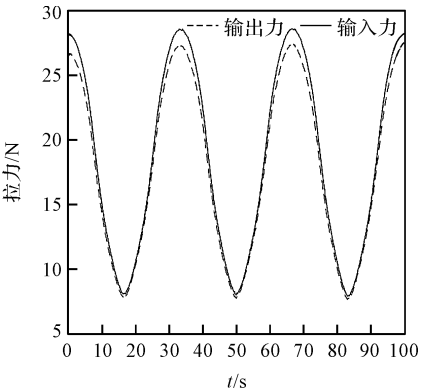
弹簧的拉力随伸缩量变化,实验中阻力的等于弹簧的拉力:

$$F_{拉} = kx_{弹} = k \frac{1\,500\sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right)}{2\,048} * 2\pi r_1 \quad (14)$$

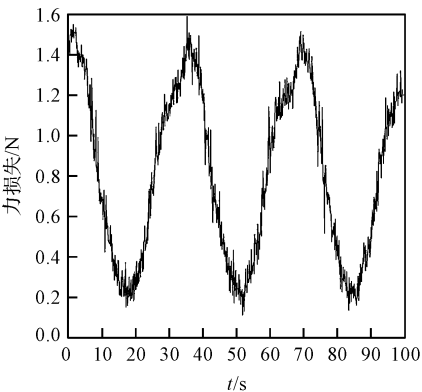
式中: r_1 — 旋转轴半径; k — 弹性系数; $x_{弹}$ — 弹簧伸缩量(绳索的伸缩量)。

大力马线受力伸长量很小,可以忽略,因此绳索的伸长量 x 与弹簧伸缩量 $x_{弹}$ 相等。

实验数据分析如图 6 所示。



(a) 输入输出力曲线



(b) 力损失曲线

图 6 实验数据分析图

如图 6(a) 所示,在 100 s 内 3 个周期中,输入力和输出力都是通过拉力传感器实际测量的力,输出力随着输入力的变化而发生变化。在一个周期内输入力先下降,电机反转,弹簧收缩,此时弹簧相当于驱动力,将弹簧力作为输入力,靠近电机端的力视为输出力;到达谷底的时候,输入力逐渐增加,电机正转,此时电机的力为输入力(驱动力),弹簧被动伸长,弹簧受力为输出力,输出力也逐渐变大。造成这种现象的原因是由于摩擦力的方向在电机正、反转的时候不同,导致输入和输出力之间不断转换。

输入力和输出力的偏差即代表力的损失量,在滑轮绳索系统中,力损失主要是由于滑轮摩擦带来的,因

此滑轮摩擦可以近似等于力损失,如图 6(b) 所示。分析摩擦力曲线可知:摩擦力大小是随时间近似成正弦分布,在输入力最大时,摩擦力最大,在输入力最小时,摩擦力也最小,这与仿真的结果是相一致的。

在上述实验中, a,n,θ 都是定值,不会影响实验中输出力和输入力的测量。为了验证滑轮摩擦模型是否准确,本研究改变滑轮包角并进行正弦运动,找到运动过程中输出力为 20 N 时,输入力的大小,计算输入和输出力之比,试验数据如表 1 所示。

表 1 不同包角输入力和输出力的比值

角度 $\theta/$ ($^{\circ}$)	输出 输入比	角度 $\theta/$ ($^{\circ}$)	输出 输入比	角度 $\theta/$ ($^{\circ}$)	输出 输入比
25	0.99	77	0.962	123	0.925
34	0.981	84	0.955	131	0.920
43	0.975	92	0.950	142	0.911
56	0.977	101	0.941	154	0.902
67	0.970	112	0.932	163	0.895

表 1 中,随着包角角度的不断变大,其输出输入的比值不断变小,摩擦力也就不断增加。但是整体下降幅度不大,单滑轮所受摩擦力较小,输入力和输出力相差不大。

将实验数据进行曲线拟合,得到的点线如图 7 所示。

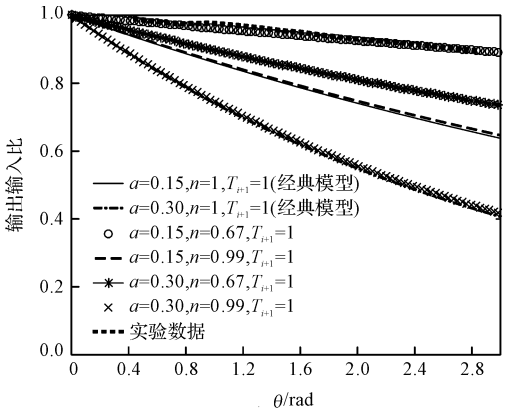


图 7 模型仿真及实验拟合曲线

拟合曲线与($a=0.15,n=0.67$)考虑非线性摩擦的仿真分析结果一致。可以看出,利用经典模型时,其输入输出比小,摩擦力损失较大。而考虑到非线性摩擦,其输入输出比小,摩擦力损失小,有利于力传递。同时在实验过程中,绳索的摩擦具有粘弹性,其不能等效为普通刚体,经典 Capstan 方程并不适用于该系统,系统摩擦力较小。本文采用的绳索为高分子聚乙烯纤维,属于聚合物,具有粘弹性,因此其实验结果与粘弹性模型最为相似,在实际驱动过程中,可以采用此模型进行力控制,能够提高控制精度。

4 结束语

本文针对介入导管机器人绳驱动结构,研究了绳索在传动过程中受到的摩擦力,利用经典 Capstan 方程分析绳索受力,考虑到非线性摩擦问题,根据 Power 准则,分析了绳索粘弹性变形,建立了绳索-滑轮传动模型。同时保证正弦输出力前提下,利用非线性摩擦模型仿真输入力以及系统力损失,并分析了力损失与输入力和输出力的关系。

本研究利用电机位置模式输入正弦轨迹,保证正弦输出力,测量了输入力和输出力,计算得到了力损失。通过改变包角,得到了实际输入和输出力的比值与包角关系曲线。实验结果与仿真结果相符合,进一步验证了摩擦模型的准确性,为介入手术机器人精确力控制提供了理论支撑。

参考文献 (References):

- [1] GUO J, GUO S, SHAO L, et al. Design and performance evaluation of a novel robotic catheter system for vascular interventional surgery[J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 22(9): 2167-2176.
- [2] JIA F, GUO S, WANG Y. An interventional surgical robot system with force feedback[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Zhuhai: IEEE, 2016.
- [3] GUO S, CHEN Q, XIAO N, et al. A fuzzy PID control algorithm for the interventional surgical robot with guide wire feedback force [C]. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin: IEEE, 2016: 426-430.
- [4] 寇月阳. 绳驱动介入主动导管建模与路径规划研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2014.
- [5] 席万强, 陈柏, 丁力, 等. 考虑非线性摩擦模型的机器人动力学参数辨识[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 393-399.
- [6] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 45-52.
- [7] 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.
- [8] GAO X, WANG L, HAO X. An improved Capstan equation including power-law friction and bending rigidity for high performance yarn [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2015(90): 84-94.
- [9] SHIRYAEV V, ORLIK J. Modeling of textiles as nets of one-dimensional hyperelastic strings with friction controlled by Capstan equation[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2014.
- [10] XUE R, REN B, YAN Z, et al. A cable-pulley system modeling based position compensation control for a laparoscope surgical robot[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2017(118): 283-299.
- [11] PENG Y, WEI Y, ZHOU M. Efficient modeling of cable-pulley system with friction based on arbitrary-Lagrangian-Eulerian approach [J]. *Applied Mathematics & Mechanics*, 2017, 38(12): 1785-1802.
- [12] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 1-13.
- [13] 韩敬虎, 俞经虎. 食品检测咀嚼机器人工作空间研究[J]. *轻工机械*, 2016, 34(3): 1-4.
- [14] 岳翠萍, 刘新乐, 冯巍, 等. 机器人压盖机[J]. *包装与食品机械*, 2017(5): 47-49.
- [15] CHEN J, GAO W. Unconventional behavior of friction at the Nanoscale beyond Amontons' law [J]. *Chemphyschem*, 2017, 18(15): 2033-2039.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

殷杰, 齐飞, 鞠峰, 等. 介入手术机器人滑轮绳索系统传动特性的研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(6): 560-565.

YIN Jie, QI Fei, JU Feng, et al. Characteristics of cable-pulley system for interventional surgical robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(6): 560-565.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>