

绳驱并联机器人导纳控制研究

张傲杰
(武汉工程大学机电工程学院 湖北 武汉 430205)

摘要: 本文提出一种用于 8 绳 6 自由度绳驱并联机器人的导纳控制器。建立绳驱并联机器人导纳控制模型，通过安装在末端执行器力传感器的反馈，经过导纳控制模型转化为末端执行器一定范围的位置修正，从而实现末端执行器对环境的柔顺控制。

关键词: 绳驱机器人；力反馈；导纳控制

0 引言

绳驱并联机器人是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新型并联机器人，相对于传统刚性并联机器人，该机器人具有工作空间大、负载比高、运动惯性小和模块化程度高等优点，这些优点使其在低速风洞试验、大中型搬运吊装、康复机器人等领域得到了应用。绳驱并联机器人的潜在优势和应用前景使得相关研究成为机器人领域的一个热点。

根据绳索数目 m 和末端执行器的自由度 n 之间的关系，绳驱并联机器人可分为欠约束 ($m < n + 1$)，完全约束 ($m = n + 1$) 和冗余约束 ($m > n + 1$) 三种。绳驱并联机器人的控制方式多种多样，基于位置控制的阻抗控制（即导纳控制）是主动柔顺控制的技术的一个重要分支，将导纳控制应用到绳驱并联机器人中具有重要意义。

1 导纳控制系统搭建

机器人阻抗控制模型可以等效为一个简单的“质量-阻尼-弹簧”的物理控制模型，如图 1 所示，机器人末端执行器位置与外界环境的相互作用表现为微分的形式。

以一维的“质量—阻尼—弹簧”系统为例，其力 F 与位移 x 的关系表示为：

$$F(t) = M\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Kx(t) \quad (1)$$

式中， M 为惯性系数； B 为阻尼参数； K 为刚度参数。

当该系统以力反馈量为输入，位置量为输出时，拉氏变换得到导纳模型的传递函数为：

$$\frac{x(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \quad (2)$$

系统固有频率为 $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$ ，阻尼比为 $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{MK}}$ 。

由此可知，导纳控制器就像一个二阶低通滤波器，对环境接触力进行了滤波处理。

在此基础上，搭建位置内环导纳外环的绳驱并联控制系统，如图 2 所示。

将绳驱并联机器人的期望力与实际力的差值 W_e 作为导纳控制的输入，得到六自由度绳驱并联机器人由于外力接触产生的位置修正量。

$$\Delta x_f(s) = \frac{w_e(s)}{I(s)s^2 + D(s)s + C(s)} \quad (3)$$

式中， $\Delta x_f \in R^{6 \times 1}$ 为绳驱并联机器人的经导纳控制器得到的位置修正量， $W_e \in R^{6 \times 1}$ 为机器人所受的外力与外力矩的误差。 I 、 D 、 C 分别是惯性对角矩阵、阻尼对角矩阵和刚度对角矩阵。

图 2 中 G_p 表示闭环位置传递函数， G_e 表示环境传递函数。从规划位置 x_0 减去导纳控制块 G_f （位置校正 Δx_f ）的输出信号，计算得到位置控制器的输入向量为参考位置 x_r ，从而实现绳驱并联机器人对环境的柔顺控制。

2 绳驱并联机器人导纳控制仿真

在 MATLAB/Simulink 中搭建绳驱并联机器人导纳控制系统，如图 3 所示。

选择周期半径为 0.3m 的圆曲线轨迹进行仿真，设定末端执行器的轨迹位置量为：

末端执行器从初始点首先运动到切入点，并开

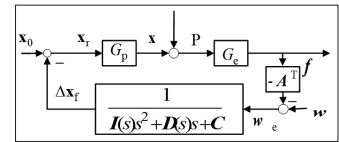


图 2 绳驱并联机器人导纳控制系统

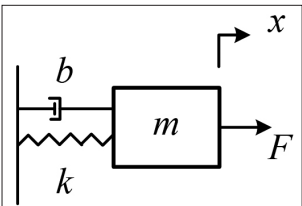


图 1 质量-阻尼-弹簧系统

选择周期半径为 0.3m 的圆曲线轨迹进行仿真，设定末端执行器的轨迹位置量为：

$$\begin{cases} q_1 = 0.2 \\ q_2 = 0.25 \\ q_3 = 0.15 \\ q_4 = 0.35 \cos(\omega t) \\ q_4 = 0.35 \sin(\omega t) \\ q_5 = 0.3 \end{cases} \quad (4)$$

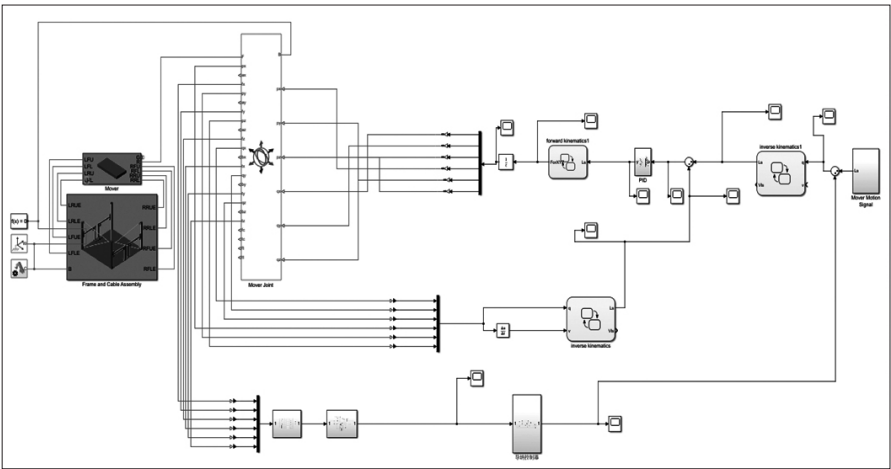


图 3 绳驱并联机器人导纳控制模型

始做圆轨迹运动，设置仿真时间为 20s，在仿真运行 5s 时，施加一个沿 z 轴负方向 5N 大小的力，并在 10s 时撤去。末端执行器运动轨迹和八根绳索变化量分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知，当未对末端执行器施加力时，按着期望轨迹进行圆周运动，当给定一个 5N 的 Z 轴负方向的力时，导纳模型将受到的力转化为末端执行器期望轨迹的一定范围的修正量，使 Z 轴方向的位置下移。通过图 5 绳驱并联机器人绳索变化也能发现在仿真时间 5 ~ 10s 内，由于末端执行器下移使绳索长度发生变化。

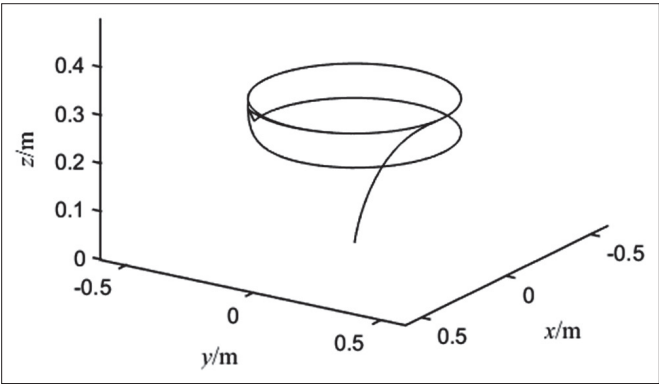


图 4 末端执行器位置变化

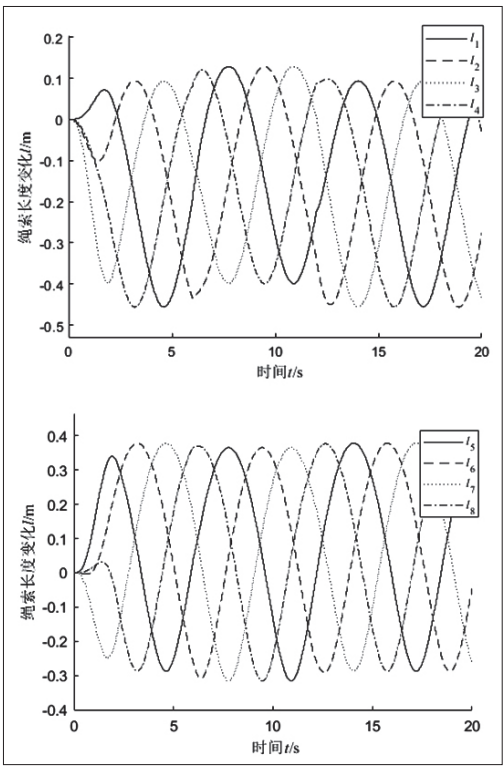


图 5 绳驱并联机器人绳索长度变化

3 结语

本文建立了绳驱并联机器人导纳控制模型，并在 MATLAB/Simulink 中进行了仿真实验。结果表明，末端执行器位置因受到外力进行了一定程度的改变，实现了绳驱并联机器人的柔顺控制，为后续的运动控制的研究提供了一定的理论基础。

参考文献：

[1]Jamshidifar H , Khosravani S , Fidan B , et al. Vibration Decoupled Modeling and Robust Control of Redundant Cable-Driven Parallel Robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018(99):1-1.

[2] 刘雄伟 , 郑亚青 , 林麒 . 应用于飞行器风洞试验的绳牵引

并联机构技术综述 [J]. 航空学报 , 2004, 25(004):393-400.

[3]Laribi M A , Carbone G , Zeghloul S . Optimal Design of Cable Driven Robot for Rehabilitation with Prescribed Workspace: Advances in Theory and Practice[M].New Trends in Medical and Service Robotics. 2019.

[4]Tang X . An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014,(1):1-9.

[5] 董晓东 , 段清娟 , 马彪 , 等 . 基于凸集理论的绳牵引串并联机器人工作空间算法 [J] . 中国机械工程 , 2016,27(18):2424-2429.

