

一种人机交互执行器的动力学建模及重力补偿

乔 丹^{1 2 3}, 高 阳^{1 2 3}, 倪仕全^{1 2 3}, 田大鹏^{* 1 2 3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 执行器是实现人机交互的核心设备。提出一种应用于人机交互的直线电机直驱 6-PSS 并联机构。机构具有多自由度、高动态、轻量化的特点。基于牛顿-欧拉法建立了其动力学模型。根据动力学模型设计了重力补偿控制器, 采用弹性阻尼模型模拟人手操作力对重力补偿效果进行仿真验证。结果表明, 建立的动力学模型能够准确描述该执行器的特性, 模型误差小于 3.55%。经过重力补偿后, 操作机构所克服的重力由 2.028N 降低为 1.148×10^{-8} N。动力学模型与重力补偿控制器为实现高精度控制系统设计奠定了基础。

关键词: 人机交互; 并联机构; 动力学建模; 牛顿-欧拉方法; 重力补偿

中图分类号: TP113 **文献标识码:** B

Dynamic Modeling and Gravity Compensation of a Human-Computer Interaction Actuator

QIAO Dan^{1 2 3}, GAO Yang^{1 2 3}, NI Shi-quan^{1 2 3}, TIAN Da-peng^{* 1 2 3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China;

3. Key laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China)

ABSTRACT: Actuator is an important part of human-computer interaction. High performance is necessary for degrees of freedom, dynamic and weight. A 6-PSS parallel mechanism driven by linear motors is proposed. The dynamic model was established by the Newton-Euler method. Furthermore, a gravity compensation controller was designed according to the dynamic model. The elastic damping model was used to simulate the operating force of the hand to verify the effect of gravity compensation. And the simulation results show that the proposed dynamic model is correct. The model error is less than 3.55%. After gravity compensation, the operating force is reduced from 2.028N to 1.148×10^{-8} N in a gravity environment. The dynamic model and gravity compensation controller are the basis for the design of high-precision control systems.

KEYWORDS: Human-computer interaction; Parallel mechanism; Dynamic modeling; Newton-Euler method; Gravity compensation

1 引言

人机交互实现了操作者与机器之间的交互和协作, 是当前的一项研究热点^[1-2]。在人机交互领域, 执行器的设计及其控制问题是影响操作体验的直接因素^[3]。为了实现灵活

的人机交互, 高动态、轻量化、多自由度的执行器设计已成为一项关键问题。

面向人机交互的执行器的机械结构包括串联机构、并联机构、串联与并联混合机构^[4-6]。与串联机构相比, 并联机构具有结构紧凑、输出能力强的突出优点^[7], 在人机交互的执行器设计中得到了广泛应用^[8-10]。然而, 在现有的设计中, 驱动并联机构的运动副通常采用伺服电机结合减速机构

收稿日期: 2020-09-23 修回日期: 2020-10-11

来实现,限制了执行器的动态性能。而为了提高动态性能、实现灵活运动的目的,采用电机直驱的方式越来越受到重视。对于直驱方式,执行机构自身的重力会导致外环控制量较大、增益难以提升的问题。对机构的重力补偿控制就成为不得不面对的问题。

并联机构的重力补偿基于对机构进行静力平衡分析^[11],一般有两种方法:机构配重法和基于动力学分析的驱动法。其中,基于动力学分析的方法更加精确,得到广泛的研究。例如,余昆等以 Delta 并联机构的手控器为研究对象,运用虚位移原理计算出机构在任意位置时的重力补偿力矩^[12]。还有将并联机构与串联机构结合的触觉设备为研究对象,采用虚功原理法建立动力学方程,得到重力矩进行补偿^[13]。然而,现有的研究多是针对少自由度并联机构开展的,对于采用直驱设计的多自由度并联结构的深入研究十分有限。

本文提出了一种应用于人机交互中动作采集的 6-PSS (Prismatic joint-Spherical joint-Spherical joint, 移动副-球面副-球面副) 并联机构。该机构采用直线电机直接驱动,避免了减速机构产生的精度损失。采用牛顿-欧拉法对每个构件建立动力学方程,进而得到整个机构的动力学模型。进一步地,从动力学模型中得到重力模型,并基于重力模型建立重力补偿控制器。最后,采用 Simulink 工具箱对该机构的动力学模型进行了仿真验证。采用弹性阻尼模型模拟人机交互过程,对重力补偿前后的效果进行仿真验证。

2 6-PSS 并联机构描述

本文提出的动作采集机构如图 1 所示。该机构为横置 6-PSS 并联机构,主要由动平台 1、基座 6 以及六条支链 (PSS) 组成。每条支链包含上球铰 2 (S)、连杆 3、下球铰 4 (S) 和移动副 5 (P)。其中,移动副为直驱型直线电机。

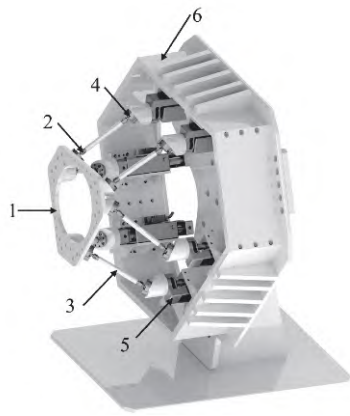
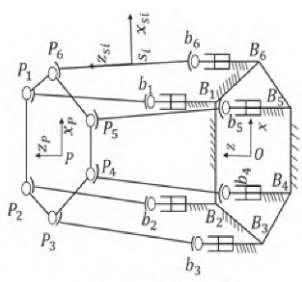


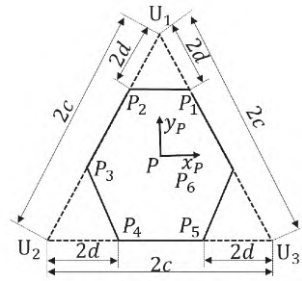
图 1 6-PSS 并联机构结构图

忽略与动力学无关的几何尺寸,由各运动副中心得到如图 2 (a) 所示的结构示意图。沿连杆方向,以连杆质心作为

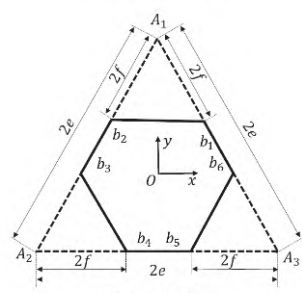
原点建立各连杆坐标系 $S_i-x_{si}y_{si}z_{si}$ 。动平台上运动副位置分布如图 2 (b) 所示。其中 $U_1U_2U_3$ 为等边三角形,以三角形质心为原点建立动坐标系 $P-x_py_pz_p$,由图中尺寸可确定各上球铰坐标 P_i 。同理,以图 2 (c) 中等边三角形 $A_1A_2A_3$ 的质心作为原点建立定坐标系 $O-xyz$,由图中尺寸可确定移动副上的下球铰坐标 b_i 。为了避免移动副所受重力对动力学的影响,本文首次设计了移动副与地面平行的结构。



(a) 6-PSS 机构示意图



(b) 动平台示意图



(c) 基座示意图

图 2 机构位置简图

此外,为了保证机构自由度与运动学可解,动平台与基座的参数设计需满足如式 (1) 所示条件。

$$\begin{cases} c > 3d \\ 3f > e > 2f \\ f > c - d > e - f > d \end{cases} \quad (1)$$

3 基于牛顿-欧拉法的动力学建模

基于模型的重力补偿需要机构的重力模型。而重力模型包含在动力学模型之中,因此本文首先对机构的动力学模型进行研究。

牛顿-欧拉法建立动力学模型需要对动平台、连杆以及

移动副分别建立牛顿-欧拉动力学方程,根据各个构件中力与力矩平衡原则,进而得到移动副驱动力与动平台位姿之间的联系,即逆动力学方程。由于直驱机构的重力远大于摩擦力,因此在分析时忽略摩擦的影响。

3.1 动平台动力学方程

对于本文提出的横置机构,重力沿 x 轴负方向。动平台承受自身的重力 $m_p g$ 以及第 i 个连杆的约束力 F_{pi} 和约束力矩 M_{pi} ,设动平台受到外力 F_{ext} 和外力矩 M_{ext} 。则动平台受力如图 3 所示。

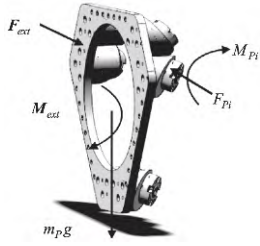


图 3 动平台受力图

基于力与力矩平衡,建立动平台的动力学方程为

$$F_{ext} + m_p g + \sum_i F_{pi} = m_p a_p \quad (2)$$

$$M_{ext} + M_{pi} + \sum_i P_i^0 \times F_{pi} = {}^0_p I \varepsilon_p + \omega_p \times ({}^0_p I \omega_p) \quad (3)$$

式中 a_p 为动平台的加速度; P_i^0 为上球铰中心 P_i 相对基坐标系的位置矢量; ${}^0_p I = {}^0_p R \cdot I_p \cdot ({}^0_p R)^T$ 为动平台相对基坐标系的惯量矩阵; I_p 为动平台相对动坐标系的惯量矩阵; ${}^0_p R$ 为 z - y - x 型欧拉角法的旋转矩阵。 ε_p 为动平台的角加速度; ω_p 为动平台的角速度。

3.2 连杆动力学方程

对于第 i 个连杆,连杆受到上球铰关节的约束力 F_{pi} 和约束力矩 M_{pi} 、自身的重力 $m_i g$ 以及安装在移动副的下球铰关节的约束力 F_{bi} 和约束力矩 M_{bi} 。连杆受力图如图 4 所示。

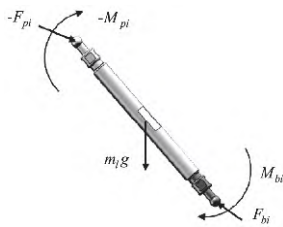


图 4 支链受力图

基于力平衡与力矩平衡,建立连杆动力学方程为

$$-F_{pi} + m_i g + F_{bi} = m_i a_{li} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} -M_{pi} + M_{bi} + \frac{1}{2} L \delta_i \times (-F_{pi}) + \left(-\frac{1}{2} L \delta_i\right) \times F_{bi} \\ = {}^0_{li} I \varepsilon_{li} + \omega_{li} \times ({}^0_{li} I \omega_{li}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 a_{li} 为连杆质心的角加速度; L 为连杆长度; δ_i 为第 i 连杆单位矢量; ${}^0_{li} I = {}^0_{li} R \cdot I_{li} \cdot ({}^0_{li} R)^T$ 为连杆相对基坐标系的惯量矩阵; I_{li} 为连杆相对连杆坐标系的惯量矩阵; ${}^0_{li} R$ 表示连杆坐标系到基坐标系的旋转矩阵; ε_{li} 为连杆的角加速度; ω_{li} 为连杆的角速度。

3.3 移动副动力学方程

移动副自身受到下球铰关节的约束力 F_{bi} 、自身的重力 $m_b g$ 、基座支撑力 F_B 以及电机对其作用力 F_i ,见图 5。

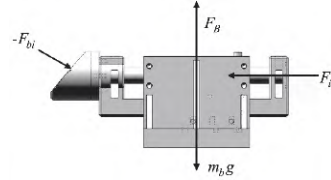


图 5 移动副受力图

移动副自由度受到自身的约束,水平方向以外的合力与合力矩均为零。

则水平方向的移动副动力学方程

$$F_i - F_{bi} = m_b a_{bi} \quad (6)$$

式中 a_{bi} 为第 i 移动副移动的加速度

3.4 整体机构动力学方程

基于文中建立的方程 (2) - (6),在消除各构件的内力后,可建立动平台位姿 $q = [x \ y \ z \ \gamma \ \beta \ \alpha]^T$ 与直线电机驱动力 $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5 \ \tau_6]^T$ 之间的动力学关系为

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F = J_b^T \tau \quad (7)$$

式中 $F = [F_{ext} \ M_{ext}]^T$ 为外力向量; J_b 为移动副与动平台速度的雅可比矩阵。

惯性力的系数矩阵为:

$$\begin{aligned} M(q) = & \begin{bmatrix} m_p I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & {}^0_p I \end{bmatrix} \\ & + \sum_{i=1}^6 \begin{bmatrix} Q_1 + Q_2 & Q_3 \\ \tilde{P}_i^0 (Q_1 + Q_2) & \tilde{P}_i^0 Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_i J_{li} \\ {}^0_{li} I J_{wi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $Q_1 = \frac{\delta_i e_{bi}^T}{e_{bi}^T \delta_i}$, $Q_2 = -\frac{\tilde{e}_{bi} \tilde{\delta}_i}{2 e_{bi}^T \delta_i}$, $Q_3 = -\frac{\tilde{e}_{bi}}{L e_{bi}^T \delta_i}$; $\tilde{\cdot}$ 代表向量 $\cdot$ 反对称矩阵; e_{bi} 为移动副单位矢量; J_{li} 为连杆质心加速度与动平台加速度的雅可比矩阵; J_{wi} 为连杆加速度与动平台加速度的雅可比矩阵。

向心力与科氏力的系数矩阵为:

$$\begin{aligned} C(q, \dot{q}) = & \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \tilde{\omega}_p {}^0_p I \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^6 \begin{bmatrix} Q_1 + Q_2 & Q_3 \\ \tilde{P}_i^0 Q_1 & \tilde{P}_i^0 Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_i J_{ali} \\ {}^0_{li} I J_{eli} \end{bmatrix} \\ & + \sum_{i=1}^6 [Q_4 \ \tilde{P}_i^0 Q_4] \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $Q_4 = \frac{\tilde{e}_{bi} \tilde{\omega}_{li}}{L e_{bi}^T \delta_i}$; J_{ali} 为连杆质心加速度与动平台速度的雅可

比矩阵; J_{gli} 为连杆加速度与动平台速度雅可比矩阵。

重力项矩阵为:

$$G(q) = - \begin{bmatrix} m_p g \\ 0_{5 \times 1} \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^6 \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \\ \bar{P}_i^o Q_1 & \bar{P}_i^o Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_i g \\ 0_{2 \times 1} \\ m_i g \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

完整的动力学模型可用于 6-PSS 机构的控制方法研究。若仅针对重力补偿问题,式(10)即为目标重力模型。

4 重力补偿

通过逆动力学方程(7),当机构只受到重力时,保持机构平衡所需的直线电机驱动力为

$$\tau = (J_b^T)^{-1} G(q) \quad (11)$$

由此,对移动副设计重力补偿控制器为

$$u_g = (J_b^T)^{-1} G(q) \quad (12)$$

式中 $\mu_g = [\mu_{g1} \ \mu_{g2} \ \mu_{g3} \ \mu_{g4} \ \mu_{g5} \ \mu_{g6}]^T$,重力补偿控制器作用于第 i 个直线电机的控制量为 u_{gi} 。对每个直线电机设计控制结构如图 6 所示。

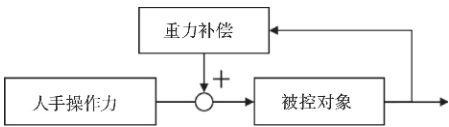


图 6 有重力补偿控制结构

得到重力补偿后的系统动力学模型为

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F = J_b^T \tau + J_b^T u_g \quad (13)$$

当动力学模型准确时,存在重力估计值

$$\tilde{G}(q) = J_b^T u_g \approx G(q) \quad (14)$$

理想补偿后的动力学模型变为

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F = J_b^T \tau \quad (15)$$

因此,在机构操作与控制器设计中,可近似忽略机构横置条件下重力的影响。

5 仿真验证

5.1 动力学模型验证

为了验证机构的动力学,特别是重力模型的正确性,采用 Matlab 与 Simulink 对动力学进行验证。在 Simulink/Sim-Mechanics 工具箱中可以搭建受重力影响的三维机构模型。当给定动平台运动轨迹时,通过逆运动学模型可以得到移动副所需的位移。当移动副模块工作在位置输入、力输出模式下,可解算出移动副到达指定位置时的驱动力。采用上文建立的动力学方程,同样可以计算驱动力。通过对比模型结果与 SimMechanics 计算结果,即可验证动力学方程的正确性。图 7 为动力学仿真结构的基本流程图。

仿真系统中的参数设置如表 1 所示。动平台中心运动轨迹如式(16)所示。

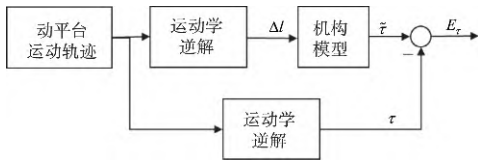


图 7 动力学仿真结构

$$\begin{cases} P_x = 0.006 \sin(2\pi t) \\ P_y = 0 \\ P_z = 0.20406 \\ \gamma = 0.05 \sin(2\pi t) \\ \beta = 0 \\ \alpha = 0 \end{cases} \quad (16)$$

表 1 机构的结构参数

名称	参数	数值
动平台	m_p / kg	0.1812
	$I_p / 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$\text{diag}(187.09, 187.09, 187.09)$
	c / m	0.09817
	d / m	0.04207
连杆	m_l / kg	0.0086
	$I_{li} / 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$\text{diag}(18.6, 18.6, 0.09)$
移动副	L / m	0.11436
	m_b / kg	0.129
基座	e / m	0.13747
	f / m	0.03895

为了量化评价模型误差,本文采用相对误差作为动力学模型误差评价标准。相对误差 E_i 计算如式(17)所示。动平台运动过程中,六个驱动电机的相对误差曲线如图 8 所示。

$$E_i = \frac{\tau - \hat{\tau}}{\hat{\tau}} \times 100\% \quad (17)$$

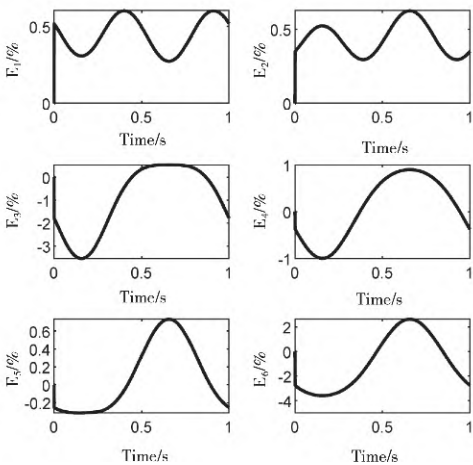


图 8 各驱动电机出力相对误差

实中把握音乐节奏的人能更快的学会一首歌;一些周期与音乐长度互质的同级节点在起步阶段和长期训练后也能提高预测准确率,就好像许多人明明会唱一首歌却总是不合节拍。本文的预测方法偏向于对大脑思维模式的模拟和探索,与深度神经网络不同在于每个神经元不仅仅持有简单的乘加计算,而是一个独立的虚拟计算机。本文不足之处在于遇到节点数量不足时,预测率会低于预期且不稳定,需要在多智能体节点协调过程中添加新的机制以完善预测功能。

参考文献:

- [1] 董浩洋,张东戈,齐宁,禹明刚,牛彦杰. 基于关注势的战场态势热力图构建方法[J/OL]. 系统工程与电子技术: 2020-09-02: 1-11.
- [2] 罗阳. 基于区块链的全维抗毁卫星通信系统初探[C]. 第十六届卫星通信学术年会论文集 2020: 272-276.
- [3] 唐胜景,史松伟,张尧,周亮. 智能化分布式协同作战体系发展综述[J]. 空天防御 2019 2(1): 6-13.
- [4] L Feng ,F Liu and Y Shi. City Brain ,a New Architecture of Smart City Based on the Internet Brain [C]. 2018 IEEE 22nd International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD) ,Nanjing 2018: 624-629.
- [5] 杨海民,潘志松,白玮. 时间序列预测方法综述[J]. 计算机科学 2019 46(1): 21-28.
- [6] Box G ,Jenkins G. Time Series Analysis ,Forecasting and Control [M]. Holden-Day ,1990.

- [7] Anava O ,Hazan E ,Mannor S ,et al. Online Learning for Time Series Prediction [J]. Journal of Machine Learning Research. 2013 30: 172-184.
- [8] 冯霞,赵立强. 基于时间序列分析的航站楼安检旅客流量预测[J]. 计算机工程与设计 2020 41(4): 1181-1187.
- [9] Le-kai Zhang ,Shou-qian Sun ,Bai-xi Xing ,Rui-ming Luo ,Ke-jun Zhang. 基于心理生理信号的个人音乐情感体验识别(英文)[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering 2019 20(7): 964-975.
- [10] 邓玉婧,武志昊,林友芳. 基于多粒度时间注意力RNN的航班客座率预测[J]. 计算机工程 2020 46(1): 294-301.
- [11] 张维明,刘俊先,陈涛,罗爱民. 一种复杂体系架构设计新范式[J]. 科技导报 2018 36(20): 27-31.
- [12] 王勇,杨静思,韩兴龙,胡士军,殷为民,雷伟. 干细胞引领生物医学革命[J]. 自然杂志 2020 42(2): 84-90.

[作者简介]



桂 剑(1989.6-),男(汉族),安徽省黄山市人,工程师,主要研究领域为复杂体系自组织理论。

马 斌(1975.1-),男(汉族),陕西省周至县人,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为人工智能。

陈小刚(1976.5-),男(汉族),湖北省孝感市人,副研究员,博士,主要研究领域为存算一体硬件架构。

董济铭(1990.2-),男(汉族),吉林省吉林市人,工程师,硕士,主要研究领域为机器人智能算法。

(上接第 331 页)

- [9] 项程远,唐晓强,崔志伟,等. Stewart 并联机器人力敏感性分析及实验验证[J]. 机器人 2018 40(6): 942-949.
- [10] 徐伊岑,曹小兵. 一种基于机器视觉的并联机器人实训设备设计[J]. 机电信息 2020 (2): 114-115,117.
- [11] 吴孟丽. 一种新型三自由度并联机构的设计理论与方法[D]. 天津大学 2007.
- [12] 余昆. 并联手控器运动学分析及重力补偿研究[D]. 华中科技大学 2014.
- [13] Shuo Wang ,Zhiyuan Yan ,Zhengxin Yang ,Zhijiang Du. A Gravity -Compensation Algorithm for the Haptic Device Based on the Principle of Virtual Work and BP Neural Network [C]. Proceedings of 3rd International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2018) .

Chongqing China: International Conference on Humanities and Social Science Research 2018: 596-602.

[作者简介]



乔 丹(1995-),女(汉族),内蒙古赤峰市人,硕士研究生,主要研究领域为并联机构的动力学建模及控制。

高 阳(1992-),男(汉族),吉林省榆树市人,博士研究生,主要研究领域为非线性控制。

倪仕全(1994-),男(汉族),山东省枣庄市人,博士研究生,主要研究领域为并联机构控制。

田大鹏(1984-),男(汉族),辽宁省铁岭市人,研究员,博士研究生导师,主要研究领域为机电系统控制(通讯作者)。