

任务空间受限的机械臂负载特性分析

王海名¹, 张 鑫¹, 姜文馨², 孙龙飞^{1*}

¹沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

²沈阳理工大学环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月4日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

本文提出并验证了一种基于剪叉机构的可弯曲伸展机械臂构型。机械臂采用半圆形连杆剪叉机构组成机械臂主体结构, 简化驱动系统并保证一定的负载能力。基于单位荷载法建立了机械臂末端位移的数学模型, 结合Ansys Workbench静力学仿真与物理样机实验, 验证了机械臂横向伸展姿态下的负载性能。研究结果证实了机械臂结构设计的可行性。

关键词

机械臂, 剪叉机构, 单位载荷法, 负载

Analysis of Load Characteristics for Robotic Arms with Restricted Task Space

Haiming Wang¹, Xin Zhang¹, Wenxin Jiang², Longfei Sun^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

²School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: November 11, 2025; accepted: December 4, 2025; published: December 11, 2025

Abstract

This paper proposes and validates a bendable and extendable robotic arm configuration based on a scissor mechanism. The robotic arm employs a semi-circular linkage scissor mechanism to form its primary structure, simplifying the drive system while ensuring adequate load-bearing capacity. A mathematical model for end-effector displacement of robotic arm was established using the unit load method. Combined with static simulations in Ansys Workbench and physical prototype experiments, the load performance of the robotic arm in lateral extension posture was validated. The research findings confirm the structural design's feasibility of robotic arm.

*通讯作者。

Keywords

Mechanical Arm, Scissor Mechanism, Unit Load Method, Load

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

机器人技术因具有高效与安全的优势，在工业、医疗及日常生活中应用广泛，特别是在航空发动机检测等狭窄高危环境中保障了人类安全。然而，现有的蛇形、绳索驱动或气动软体等适用于复杂环境的机械臂，常面临驱动复杂、控制困难或负载能力弱的挑战。

Fan 等[1]提出了一种具有刚度变化能力的新型连续体机械臂，设计灵感来源于章鱼的生理结构，整个机械臂由两部分组成，每个部分由两根绳索控制，为机器人提供了四个自由度。Bishop 等[2]提出了一种新型欠驱动连续体机械臂，通过形状记忆合金丝进行驱动，驱动装置体积小、重量轻、制造成本低。Ma 等[3]提出了一种面向远程工程作业的协作连续体机械臂。机械臂的设计灵感来源于蛇和人类的手臂，相比单臂连续体机械臂，它可以完成更复杂的工作。Russo 等[4]提出了一种协作连续体机械臂，机械臂由多个单体组成，各单体机械臂可以从不同的路径到达指定目的地，通过物理连接的方式，重新配置成并行架构，形成新的结构。Yarbasi 等[5]提出了一种由两个可伸缩气球驱动的新型连续体机械臂，机械臂由两个可伸展气球、一个尖端和一个柔性可延展的鞘组成，其中，可伸展气球可以在实现较大伸长量的同时，保持较小的直径变化，通过对可伸展气球充气可实现机械臂的弯曲和伸缩动作。Greer 等[6]设计了一种软连续体机械臂，机械臂由多个气动人造肌肉组成，这些气动肌肉沿脊柱径向排列，布置在机械臂的整个躯干上，将转向动作和伸展动作进行了分离，简化了机械臂的运动方式。Sanfilippo 等[7]提出了一种具有串联弹性动作器、立体视觉和无螺杆装配机构的高柔顺低成本蛇形机械臂。Gargiulo 等[8]提出了一种用于核反应堆勘察和维护的长距离关节型机械臂，机械臂可携带各类工具进入危险狭长的环境进行作业。

本文旨在设计一种兼具驱动简化与良好负载能力的剪叉式可弯曲伸展机械臂。通过建立机械臂末端位移与负载之间的数学模型与 Ansys Workbench 仿真分析与实体样机实验，验证理论模型的正确性。

2. 机械臂结构设计

为满足机械臂在受限任务空间作业时对紧凑体积和负载能力的要求，本文基于剪叉机构原理，设计了机械臂的整体结构，由机械臂主体、末端法兰和驱动部件三部分组成，如图 1 所示。机械臂主体由多个串联的“X”型剪叉单元构成，连杆为提升强度与美观性，采用半圆形截面设计，这在不影响运动性能的前提下有效增强了抗弯与抗拉能力。铰接处借鉴了“公母扣”思路，将转轴与一根连杆集成为一体式结构，所有铰点均采用带肩螺栓和自锁螺母进行轴向固定，以确保连接的稳固，结构如图 2 所示。

末端法兰是一种连杆滑块机构，如图 3 所示，它通过一根中心滑杆与两根短连杆实现与末端剪叉单元的联动。设计利用几何约束，使机械臂无论如何伸缩，法兰都能自动保持与末端单元相同的朝向，从而保证了其上搭载工具的姿态稳定性。

驱动基座将丝杠的旋转动力传递给机械臂，结构如图 4 所示，通过两条矩形导轨严格约束异形丝母的姿态，使异形丝母在丝杠驱动下只能进行轴向往复移动，进而带动剪叉连杆。并且基座同时集成了用于支撑丝杠的立式轴承座和便于安装固定的吊耳。

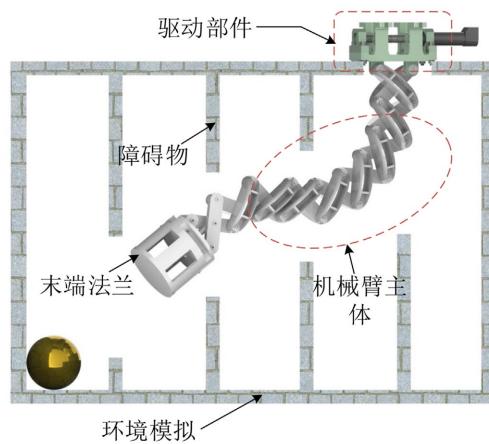


Figure 1. Overall structure of the robotic arm
图 1. 机械臂整体结构

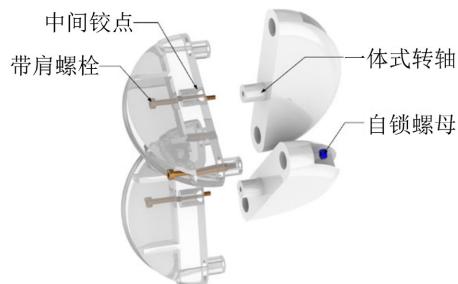


Figure 2. Scissor structure diagram of the robotic arm
图 2. 机械臂剪叉结构图

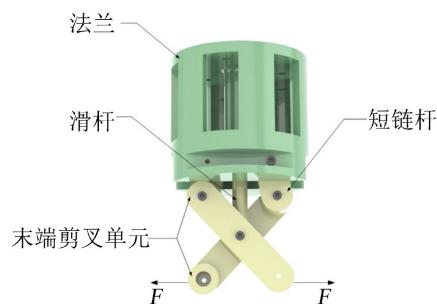


Figure 3. End flange structural diagram
图 3. 末端法兰结构图

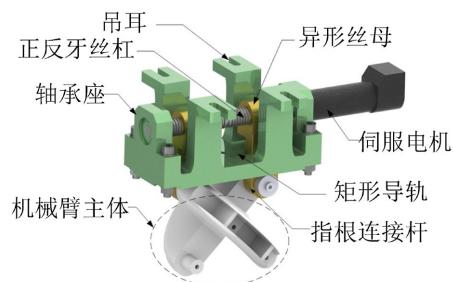


Figure 4. Driving component structural diagram
图 4. 驱动部件结构图

3. 机械臂负载末端位移建模

由于剪叉式机械臂中杆件的结构形式与受力情况基本相同，以杆 i 的计算过程为例，建立各杆的数学模型。杆 i 的受力情况如图 5 所示，由于不需要考虑轴向变形的影响，图中仅标出了杆 i 在自身垂直方向上所受到的力。根据图 5 中杆件的受力情况绘制出杆 i 的弯矩图，如图 6 所示。

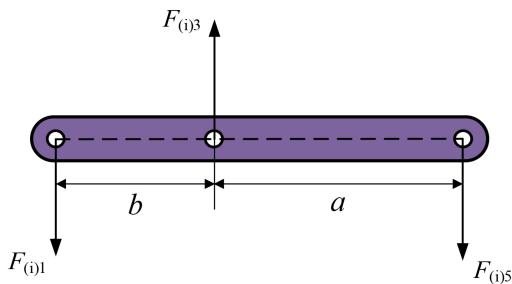


Figure 5. Analysis of forces on links
图 5. 杆件受力分析

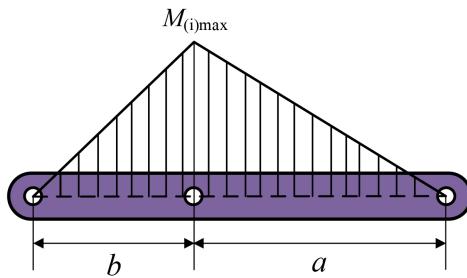


Figure 6. Link bending moment diagram
图 6. 连杆弯矩图

中间铰点处的最大弯矩 $M_{(i)max}$ 可表示为：

$$M_{(i)max} = \frac{F_{(i)3} \times a \times b}{a + b} \quad (1)$$

在求得实际载荷和单位力作用下的最大弯矩后，将其带入单位荷载法计算公式中。对于梁结构，位移计算公式为：

$$\Delta = \sum \int \frac{\bar{M} M_p}{EI} dx \quad (2)$$

式中： \bar{M} ——虚设单位力引起的弯矩，N·m； M_p ——实际载荷引起的弯矩，N·m； E ——弹性模量，MPa； I ——杆截面的惯性矩， m^4 。

为简化计算，本文使用了图乘法对弯矩的乘积进行计算，式(2)可转换为如下形式：

$$\Delta = \sum \frac{1}{EI} A y_c \quad (3)$$

式中： A ——实际载荷下弯矩图的面积，N·m²； y_c ——单位力的弯矩图在 A 的形心处弯矩，N·m； 对杆段 b ，其弯矩对于位移的影响 Δ_b 可表示为：

$$\Delta_b = \frac{1}{EI} \left(\frac{b M_{(i)max}}{2} \right) \left(\frac{2 \bar{M}_{(i)max}}{3} \right) \quad (4)$$

对杆段 a , 弯矩对于位移的影响 Δ_a 可表示为:

$$\Delta_a = \frac{1}{EI} \left(\frac{aM_{(i)\max}}{2} \right) \left(\frac{2\bar{M}_{(i)\max}}{3} \right) \quad (5)$$

将两杆段的计算结果相加, 得到杆 i 对于位移的影响 Δ_i , 可表示为:

$$\Delta_i = \frac{a+b}{EI} \left(\frac{M_{(i)\max}}{2} \right) \left(\frac{2\bar{M}_{(i)\max}}{3} \right) \quad (6)$$

将各杆产生的位移相加, 可得负载处的纵向位移 Δ 为:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (7)$$

4. 机械臂末端位移仿真分析

验证负载对末端位移影响的理论模型, 进行 Ansys Workbench 静力学仿真。需要在 SolidWorks 中创建的剪叉连杆简化装配体以 x_t 格式导入, 并将基座设为固定的刚体, 各铰链定义为刚性转动副, 并赋予连杆材料属性。在施加标准重力载荷的基础上, 向末端参考点加载了一系列不同的负载值。仿真结果如图 7 所示。

A: 静态结构
类型: 总变形
单位: mm
时间: 1s
2024/9/24 16:34

5.5449 最大
4.9288
4.3127
3.6966
3.0805
2.4644
1.8483
1.2322
0.6161
0 最小

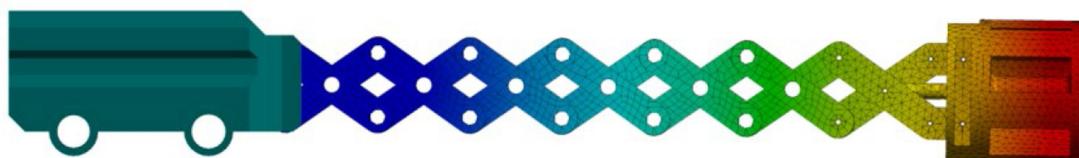


Figure 7. Static simulation of load and end displacement

图 7. 负载与末端位移的静力学仿真

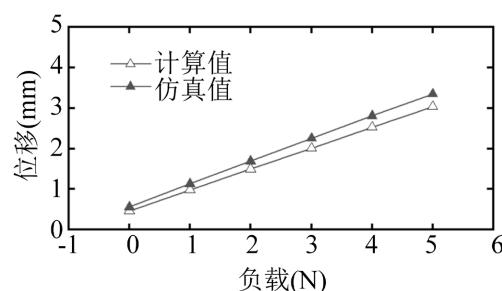


Figure 8. Comparison of results

图 8. 结果对比

仿真与计算结果对比如图 8 所示，在 5 N 以下的低负载区，两者对末端位移的预测吻合良好。仿真值略高于计算值，这归因于理论计算仅考虑了连杆的弯曲变形，属于合理误差。两条曲线一致的变化趋势，证明了此分析方法对预测末端位移的有效性。分析还表明，约 0.5 mm 的初始位移是由连杆自重造成的。当采用树脂材料时，自重影响较小，足以胜任携带摄像头等轻负载任务，且该材料还兼具成本低、易于 3D 打印的优点。对于更高负载的特殊任务，则可选用铝合金等轻质金属材料替代。

5. 机械臂样机负载能力实验

5.1. 实验

为验证剪叉机械臂的负载能力，针对最恶劣工况设计了横向直线伸展姿态的实验。由于这类长臂型串联机械臂的末端位置易受负载和自重引起的变形影响，此实验尤为关键。

将一个由 6 个剪叉单元组成的机械臂横向固定，然后向机械臂末端施加一系列变化的负载。实验样机连杆采用光敏树脂(型号：Formlabs Grey Pro)，光敏树脂弹性模量为 2.8 GPa。剪叉连杆长度为 120 mm，半圆形截面半径 8 mm、壁厚 3 mm；整机重量为 1.8 kg，其中连杆组件重量 0.6 kg。树脂连杆采用光固化 3D 打印工艺，打印精度为 ± 0.05 mm。位移测量采用接触式直线位移传感器(型号：A36YYRwa)，测量精度 ± 0.01 mm。记录末端参考点沿 Y 轴负方向的位移数据，实验如图 9 所示。

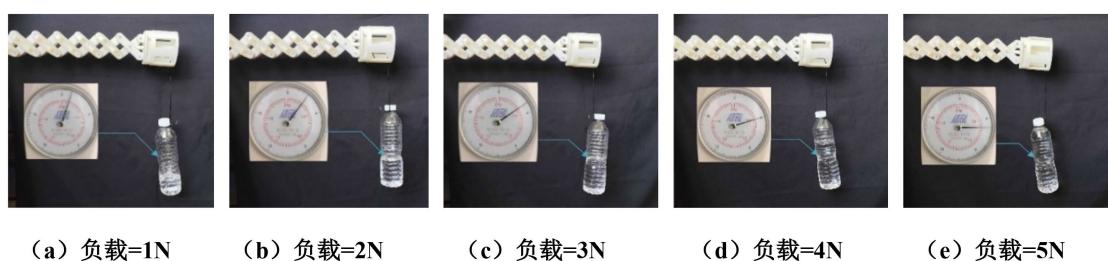


Figure 9. Load testing of robotic arm

图 9. 机械臂负载实验

将实验数据与理论与仿真结果进行汇总对比，如图 10 所示。数据显示，在 5 N 负载范围内，三者的变化趋势高度一致，数值基本吻合，验证了上述理论与仿真分析的合理性。实验数据略高于理论与仿真数据，这主要归因于各铰链制造公差的累积效应，该误差在合理范围内。

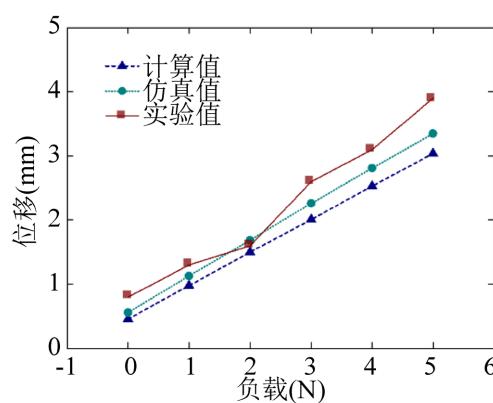


Figure 10. Comparison of end displacement results

图 10. 末端位移结果对比

5.2. 讨论分析

理论计算过程仅考虑连杆弯曲变形，未计入轴向压缩与剪切变形，而仿真中虽包含轴向变形但未考虑铰点间隙影响，导致 5 N 负载下仿真值比理论计算值高 0.15~0.20 mm；仿真中材料属性按理想均质材料设定，实际 3D 打印树脂存在微观孔隙率(约 2%)，导致实际刚度略低于仿真设定值。横向伸展姿态下，机械臂侧向弯曲刚度较低，在应用中尽可能避免低刚度方向承载。未来使用中可采用碳纤维增强树脂复合材料替代光敏树脂，进一步提升连杆刚度与强度；优化剪叉单元结构，增加斜向支撑连杆，提高侧向刚度。

6. 结论

本文针对现有应用于任务空间受限的机械臂驱动复杂、负载能力弱的挑战，设计并验证了一款基于剪叉机构的新型可弯曲伸展机械臂。为验证设计方案的可行性，采用理论建模、Ansys 仿真和物理样机实验三种方法进行交叉验证。结果表明，在 5 N 以内的负载下，三种方法测得的末端位移数据吻合良好，变化趋势基本一致。此外，机械臂能够在简化驱动的同时，满足特定的负载要求，为开发结构简单、成本低廉的新型连续体机械臂提供了有效参考。

基金项目

辽宁省大学生创新创业训练计划项目(S202410144002)。

参考文献

- [1] Fan, Y., Liu, D. and Ye, L. (2022) A Novel Continuum Robot with Stiffness Variation Capability Using Layer Jamming: Design, Modeling, and Validation. *IEEE Access*, **10**, 130253-130263. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3228775>
- [2] Bishop, C., Russo, M., Dong, X. and Axinte, D. (2022) A Novel Underactuated Continuum Robot with Shape Memory Alloy Clutches. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **27**, 5339-5350. <https://doi.org/10.1109/tmech.2022.3179812>
- [3] Ma, N., Monk, S. and Chenceler, D. (2022) Collaborative Continuum Robots for Remote Engineering Operations. *Biomimetics*, **8**, Article 4. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010004>
- [4] Russo, M., Sriratanasak, N., Ba, W., Dong, X., Mohammad, A. and Axinte, D. (2022) Cooperative Continuum Robots: Enhancing Individual Continuum Arms by Reconfiguring into a Parallel Manipulator. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **7**, 1558-1565. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3139371>
- [5] Yarbasi, E.Y. and Samur, E. (2018) Design and Evaluation of a Continuum Robot with Extendable Balloons. *Mechanical Sciences*, **9**, 51-60. <https://doi.org/10.5194/ms-9-51-2018>
- [6] Greer, J.D., Morimoto, T.K., Okamura, A.M. and Hawkes, E.W. (2019) A Soft, Steerable Continuum Robot That Grows via Tip Extension. *Soft Robotics*, **6**, 95-108. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0034>
- [7] Sanfilippo, F., Helgerud, E., Stadheim, P.A. and Aronsen, S.L. (2019) Serpens: A Highly Compliant Low-Cost Ros-Based Snake Robot with Series Elastic Actuators, Stereoscopic Vision and a Screw-Less Assembly Mechanism. *Applied Sciences*, **9**, Article 396. <https://doi.org/10.3390/app9030396>
- [8] Gargiulo, L., Bayetti, P., Bruno, V., Cordier, J., Friconneau, J., Grisolia, C., et al. (2008) Development of an ITER Relevant Inspection Robot. *Fusion Engineering and Design*, **83**, 1833-1836. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.06.039>