

杠杆式应变暴露的 L 型本体接触力感知

舒然, 褚志刚, 舒红宇

(重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044)

Email: ranshu@cqu.edu.cn

摘要: 接触力传感对机器人实现更可靠的抓取行为和提高移动性能具有重要意义。受机器手指和足尖的连杆式结构启发, 本文通过杠杆式应变暴露方法重建结构实现了 L 型本体接触力感知, 无需额外力传感器。杠杆式应变暴露方法可降低三维力测量中的耦合问题, 并改善灵敏度和刚度之间的权衡, 提高力传感性能。仿真和实验结果验证了 L 型结构的力感知和刚度性能, 验证了杠杆式应变暴露方法在三维力测量的可行性。所提出的力感知方法在连杆形状的机器人手指、腿和探针中具有潜在应用前景。

关键词: 耦合; 本体接触力传感; 机器人末端执行器; 应变暴露; 权衡

1、研究背景

接触是机器人执行取放操作、移动和家务任务的基本交互。接触力传感是机器人在行走过程中实现安全抓握、灵巧操作和避免碰撞的必要条件之一^[1]。感知接触力的方法分为本体感知^[2]和外部感知^[3]。外部感知通过将力传感器集成到机器人关节中, 如手腕或手臂力传感器, 或将传感器阵列布置在机器人外表面或指尖称为电子皮肤^[4], 能够识别抓取部件, 感知接触状态, 间接估计被抓物体的重力和惯性。但集成外部传感器需求更加紧凑的空间, 受商用传感器结构限制, 增加了结构设计的复杂性且成本高昂。本文基于本体接触力传感, 首先对结构进行重建, 并利用重建结构的应变暴露进行力感知。结构重建需考虑支撑和力传感双重性能。例如通过重建机器人手指和腿, 在本体上获取较大的均匀且与被测力呈强线性映射关系的应变暴露, 无需额外力传感器实现接触力感知。应变获取方式不仅限于传统的应变片。随着印刷电子器件和碳纳米材料的发展, 应变片可以在制造过程中直接印刷在机器人末端执行器表面, 这将进一步提升其应变暴露的利用效率。

结构重建需要解决以下两个难题。增加力传感灵敏度需求较大的应变暴露, 其结构应设计小而薄, 但对实现可靠抓取和移动行为, 需提升机器人手指和腿的刚度, 即灵敏度与刚度存在权衡问题。接触力传感属于多维力传感范畴, 还需解决耦合问题。为此, 本文基于机器人末端执行器的连杆式结构特征, 通过杠杆式应变暴露提出一种 L 型本体接触力感知方法。

2、研究内容

2.1 杠杆式应变暴露方法 (LTMSE)

如图 1(a) 所示, 支点的底部固定, 杠杆臂远端受力, 两个支点处展现拉压变形模式。支点 A 和 B 为应变测点并暴露正负应变对, 通过 ANSYS™ 分析其应变暴露特性。图 1(b) 显示等效应变云图, 两个支点的等效应变值几乎相同。图 1(c) 显示 y 轴应变云图, 黄色表示沿 y 轴的正应变, 蓝色表示负应变, 即两个支点呈现拉伸压缩变形模式。杠杆式应变暴露方法通过减小支点区域 (应变测点) 增加应变暴露程度, 通过杠杆臂保证刚度, 运用拉压模式其暴露的应变仍可保持良好的均匀性。后续通过差分测量提升力传感灵敏度, 被测力与测点应变呈强线性映射关系。

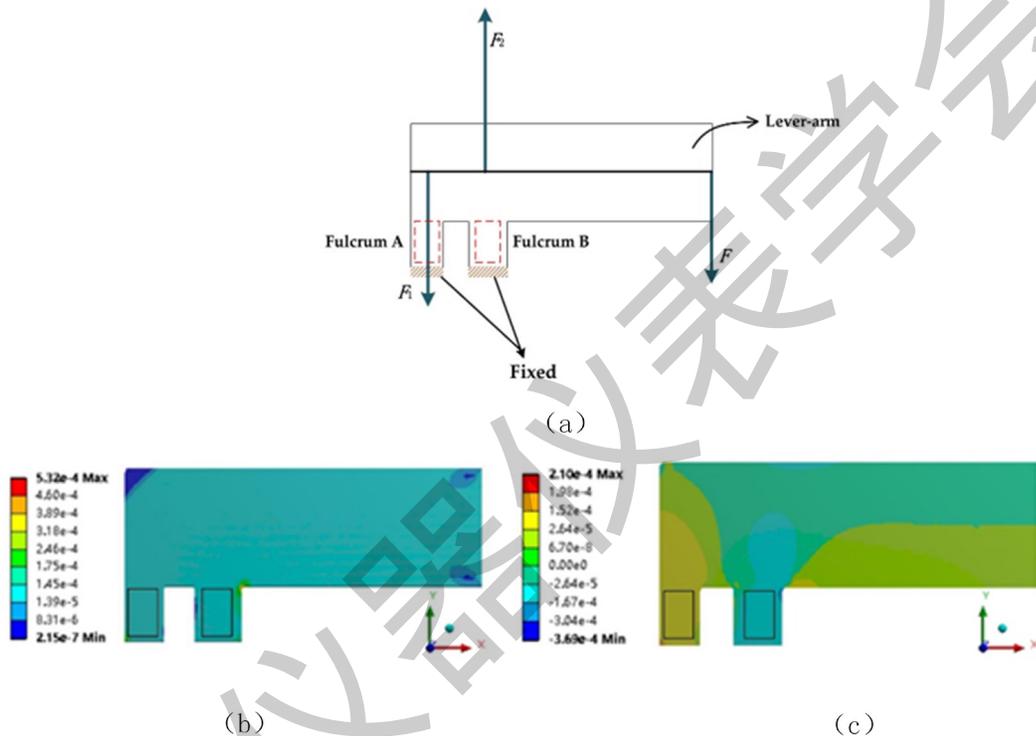


图 1 杠杆式应变暴露^[5]

2.2 L 型本体接触力感知

基于杠杆式应变暴露法, 图 2 为 L 型本体接触力感知的形成。当机器人执行移动、操纵和探测任务时, 来自末端执行器尖端的接触力可以分解为三维力 F_x , F_y 和 F_z 。机器人的手指和足尖具有连杆结构特征。启发如下。运用 LTMSE 进行单轴力传感基于双支点 (应变测量区域) 的力矩效应。随着杆臂长度增加, 力矩效应放大, 可进一步提高灵敏度。三维力传感实现需对拉伸压缩变形模式下暴露的单维正负应变进行扩展。单个杆臂只能产生两个力矩效应 (即双支点沿正交方向排列), 沿杠杆臂的轴向方向的力感知无法实现。受机器人手指 / 脚的连杆式结构的启发, 在该杠杆臂上垂直串联第二个杠杆臂 (L 型结构形成)。

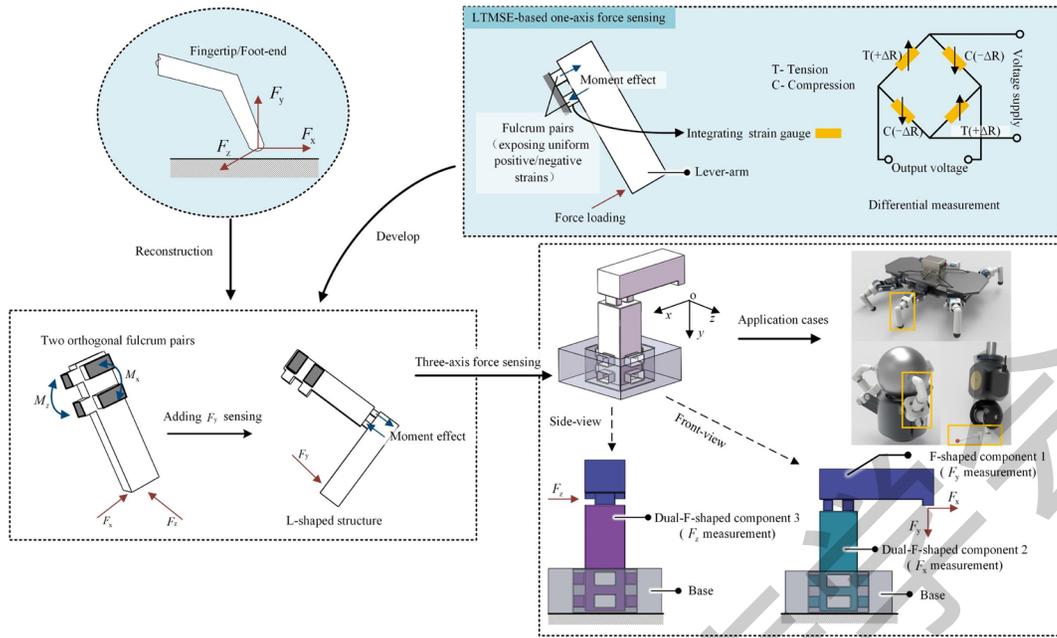


图 2 L 型三维力感知形成 [6]

①耦合与权衡问题改进。

低耦合要求主轴灵敏度高于其他轴向力的交叉灵敏度。权衡问题和耦合问题相互关联。解决方案为提高主灵敏度和保证刚度，以实现可靠的抓取 / 行走能力和较低的交叉灵敏度。在本文中，基于 LTMSE 将机器人手指 / 足尖重建为 L 型结构。L 型结构包含三个正交排布的 F 型部件，分别用于感应 F_x , F_y 和 F_z 。当接触发生，LTMSE 使相应的 F 型模块执行单轴拉伸和压缩变形模式。F 型模块由双支点和杠杆臂组成。双支点可设计更薄而小，以放大应变暴露效应，并保持良好应变均匀性。通过差分测量，提高三维力的主轴灵敏度。通过后续应变测点选取和静态解耦算法可进一步降低耦合。增加杠杆臂厚度和宽度，提升刚度，可抵抗因其他轴向力产生引入的变形，从而实现低交叉灵敏度。杠杆臂保证刚度和双支点提升灵敏度，改善权衡问题。

②实验结果

图 3 (a) 中的实验结果表明， F_x , F_y 和 F_z 的平均相对误差分别为 0.35%F.S.，0.14%F.S. 和 0.28%F.S.，最大误差分别为 1.71%F.S.，1.88%F.S. 和 3.31%F.S.。图 3 (b) 为 L 型结构应用于机器人手指的刚度性能对比。结果显示，LTMSE 式 L 型机器人手指采用双支点拉压变形模式对比基于传统悬臂梁式 L 型机器人手指具有更高的刚度。

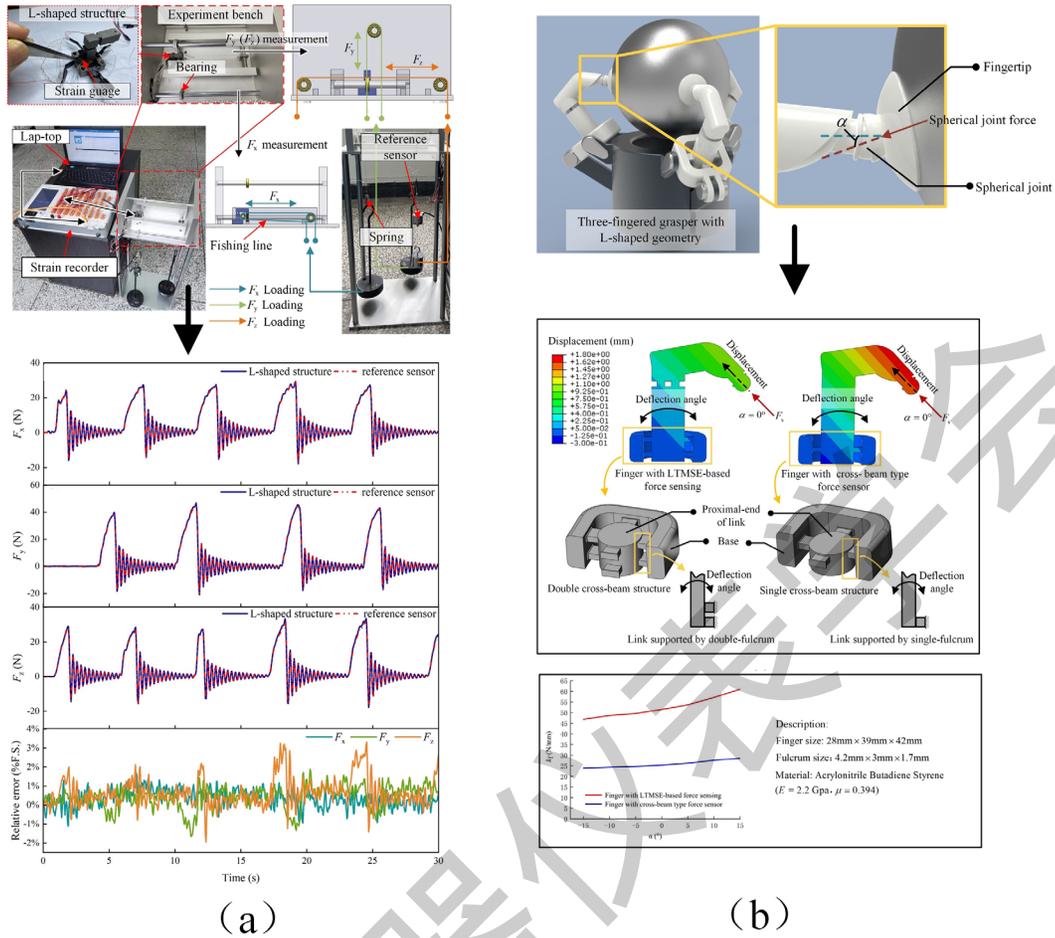


图 3 实验仿真结果

3、结论

本文通过杠杆式应变暴露方法实现了在 L 型结构上的本体接触力感知。在结构重建中，并考虑了三维力传感的实现和末端执行器的手指 / 足见的结构特征。杠杆式应变暴露方法能够降低三维力传感中耦合问题，并改善灵敏度和刚度之间的权衡。所提出的力传感方法在连杆结构特征的机器人 / 腿和探针中具有潜在应用前景。

参考文献

- [1] Ba K X, Song Y H, Shi, Y P, et al. A Novel One-Dimensional Force Sensor Calibration Method to Improve the Contact Force Solution Accuracy for Legged Robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022,169.
- [2] Abdeetetal M, Kermani, M R. Grasp and Stress Analysis of an Underactuated Finger for Proprioceptive Tactile Sensing[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4):1619-

1629.

- [3] Kim Y B, Kim U, Seok D Y, et al. Torque Sensor Embedded Actuator Module for Robotic Applications[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4): 1662–1672.
- [4] Yang J C, Mun J, Kwon S Y, et al. Electronic Skin: Recent Progress and Future Prospects for Skin-Attachable Devices for Health Monitoring, Robotics, and Prosthetics[J]. Advanced Materials, 2019, 31(48).
- [5] Shu R, Chu Z G, Shu H Y. A Lever-Type Method of Strain Exposure for Disk F-Shaped Torque Sensor Design[J]. Sensors, 2020, 20(2): 541-556.
- [6] Shu R, Chu Z G, Jiao H C, et al. Contact Force Sensing of L-Shaped Structure for Robotic End-Effectors[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2024, 29(1): 455-465.

中国仪器仪表学报