

柔性吞咽机器人本体感知技术研究进展

高 强 程培林 张鑫磊 杨 琼
浙江工商职业技术学院 浙江宁波 315012

摘 要：柔性吞咽机器人是解决易损类球零件自动搬运的有效解决方法，传统刚性传感器容易阻碍柔性材料的变形，难以直接应用于柔性吞咽机器人。材料科学和制造技术的进步推动了柔性传感技术的发展，为柔性吞咽机器人赋予了本体感知功能。本文综述了柔性传感器的种类以及研究进展。此外，本文还深入讨论了柔性传感技术面临的挑战和机遇。尽管目前大多数柔性传感器仍处于实验阶段，但本文旨在为柔性传感器在柔性吞咽机器人的应用提供启示，并推动未来的研究方向。

关键词：柔性吞咽机器人；柔性传感技术；柔性传感器；本体感知

前言

柔性吞咽机器人是安全搬运易损类球零件的主要方法，尽管如此，易损类球零件在搬运过程中容易滑脱，砸落地面受损，因此，实现柔性吞咽机器人在搬运过程中的本体感知对于确保操作过程中目标的安全至关重要，尤其是当环境或任务存在不确定性时，例如当柔性吞咽机器人需要搬运不同大小、形状的物体时。柔性吞咽机器人的本体感知主要依赖于柔性传感器来提供关于机器人的变形状态及其与目标和周围环境的接触状态。^[1, 2]

与刚性传感器安装在刚性机械系统上持续工作不同，集成在柔性吞咽机器人上的柔性传感器不能影响机器人的柔顺变形，因此，柔性传感器采用与柔性吞咽机器人制作材料相同的弹性体，尽管这加大了柔性传感器的制作难度，但这意味这柔性传感器具有千变万化的结构和较强的可定制化特点。为增强柔性吞咽机器人的生物智能性，受人类皮肤的感知启发，柔性传感器的感知信息主要包括本体感知、接近感知、接触感知、力感知和环境因素感知。^[3]通过使用多个柔性传感器，柔性吞咽机器人可以获得各种信息来源。来自这些柔性传感器的反馈信号使柔性吞咽机器人能够执行变形感应、触摸感应、纹理辨别、物体识别、和目标分类等功能。因此，柔性

传感器是旨在为柔性吞咽机器人搬运易损类球零件时提供生物智能信息，确保柔性吞咽机器人的精细操作。

本文重点介绍了柔性传感器的种类、结构和功能，以及多种柔性传感器在实际应用中的限制。随后，在材料科学、机械设计和计算技术进步的推动下，该领域的新兴趋势旨在开发具有多环境因素感知的柔性传感技术，设计感知信息多样化的柔性传感器。因此，“新兴方向”部分讨论了开发先进感知技术的新方法。最后，本文总结了柔性传感器的应用发展。

一、柔性传感器

(一) 柔性传感器特性

刚性传感器直接安装在刚性机械系统中获取系统内部或外部信息，不会对刚性机械系统本体的功能产生影响，相反，刚性传感器集成在柔性吞咽机器人上将会影响机器人的本体柔顺性，降低机器人与环境的交互安全性。为不影响柔性吞咽机器人的柔软变形，与其匹配的柔性传感器需要被研发。考虑到柔性吞咽机器人即是驱动单元又是执行单元，柔性传感器除需具备刚性传感器具有的精度、准确度、分辨率、灵敏度和可重复性，还应具备以下三个特性：

1. 合规性/灵活性

传感器不应降低柔性机器人的柔顺性，且与机器人的连接不会对机器人的变形产生阻抗。因此，柔性传感器本体的硬度应与柔性机器人相似，多以粘贴的方式集成在柔性机器人上。

2. 本体可拉伸性

基金项目：浙江工商职业技术学院2024年学校科研年度项目（编号：KYND202413和KYND202412）

作者简介：高强（1990—），男，汉族，山东济宁人，浙江工商职业技术学院助教，主要从事柔性吞咽机器人研究方向。

通常情况下，柔性传感器集成在柔性机器人上并与机器人同步变形采集目标数据，因此，制作柔性传感器的材料应具备一定的可拉伸性。考虑到预期的循环载荷，材料应具有足够的疲劳极限。考虑到以上因素和低制作成本，聚二甲基硅氧烷（PDMS）弹性体和各种硅弹性体是制作柔性传感器的常用材料。

3. 功能多样化

柔性传感器集成在柔性机器人上工作，机器人有限的体积和表面积限制柔性传感器的集成数量，因此，模仿人类皮肤感知多种环境参数，柔性传感器需具备多种感知功能。

随着柔性传感技术的发展，多种多样的柔性传感器基于以上特性被开发，如磁性传感器、电感传感器、电容传感器、应变传感器、涡流传感器和光学传感器。这些传感器的感知参数和适用场合也不尽相同。

（二）柔性传感器种类

1. 磁性传感器

磁性传感器是利用霍尔效应制作的传感器。一般情况下，由于磁性传感器内需配置霍尔传感器感知永磁体的磁场强度，磁性传感器往往在霍尔传感器感知永磁体的外部包裹软材料以集成在柔性机器人，因此，磁性传感器为刚柔结合传感器。磁性传感器往往作为触觉传感器或力传感器集成在柔性机器人上使用。能够监测柔性机器人与物体的接触情况，或感知施加在机器人上的作用力。将多个磁性传感器放置在机器人的多个位置，可在操作目标物时感知物体的形状。不仅应用于柔性机器人感知，将六个磁性传感器集成在一起，三轴力传感器被开发，将其集成在柔性机器人上，可为该机器人实现避障功能。由于霍尔传感器感知永磁体不需要连接线，磁性传感器具有较高寿命。尽管如此，磁性传感器的输出容易受到外部磁场变化的影响，不能在铁磁性环境中操作；此外，非全柔性结构限制了该传感器在柔性机器人上的应用。

2. 电感传感器

电感传感器对灰尘、湿度、油液等环境因素非常敏感，因此，电感传感器可应用的场景较多。电感传感器主要依靠环境因素变化导致线圈的自感或互感发生改变实现检测，这也导致了电感传感器在测量某个环境因素时，其他环境因素影响传感器的精度。此外，电感传感器的线圈体积较大，难以直接与柔性机器人结合。目前提出的感知弯曲变形、伸缩变形和微小运动的电感传感

器均具有较大的改进空间。然而，考虑到电感传感器的动态范围较高、具有线性输出、成本低等优点，研究人员认为随着材料技术和制造技术的提升，电感传感器未来将会在柔性机器人领域有广阔的应用前景。

3. 电容传感器

电容传感器由两块电极以及他们之间的介质构成。得益于简单的结构，电容传感器的应用非常广泛，用来感知液面变化、物体接近或接触等。当电容传感器应用于触觉感知时，外部力施加在任一电极上时，电介质的导电率随电极之间的距离或重叠率发生变化，电容随之改变。当电容传感器应用于接近感知时，两个电极被区分为发射电极和接收电极，向发射电极施加交流电压并且接收电极保持尽可能靠近地面时，在它们之间产生负责电路中流动的位移电流的电场。电流可以在接收端电极被测量。当物体接近接收端电极时，电极之间的电场强度减小，引起位移电流发生变化。因此，电容传感器可集成在柔性机器人表面，以检测物体的接近。

4. 应变传感器

应变传感器也被成为电阻传感器，刚性应变传感器在工业领域的应用已非常成熟，如振动测量、疲劳测试、接触力测量等。被广泛用来测量微小变形的应变片是应变传感器的一种。随着柔性机器人的发展，得益于应变传感器利用外界刺激下发生容易测量的电阻变化的优势，自1977年Eventoff提出柔性应变传感器的概念后，研究者对其进行了深入研究。结果发现应变传感器具有较好的传感特性，如不受电磁干扰、易于制造、成本效益高等。但上述应变传感器的局限性在于弹性体具有相对较长的恢复时间和明显的滞后现象，这严重限制柔性应变传感器的应用。

5. 涡流传感器

得益于涡流传感器的低滞后、高可重复性、对环境污染的鲁棒性和高灵敏度等优点，涡流传感器在工业领域被广泛应用于接近检测、限位开关、力测量等。使用交流电流激励传感线圈，进而在其周围产生交变磁场。这在相邻的导电膜（目标）中感应出涡电流。这会产生与感测/初级线圈的原始/发射磁场相反的磁场。线圈和导电膜之间的这种耦合也减少了与线圈相连的磁通量和有效电感。当外力施加到导电膜上时，它会更靠近感测线圈。这增加了薄膜中的感应涡流和相反磁场的大小。结果，线圈的电感减小。涡流传感器的基本结构包括平面线圈（传感层）、可变形弹性体层和导电膜（传感目

标)。基于该结构, Wang等人增加线圈数量, 以放大电感, 尽管该传感器具有良好的分辨率, 但其需要电磁屏蔽, 以免影响测量结果。Xie等人在基本结构基础上添加设计初级和次级线圈, 并将铁磁片嵌入硅弹性体, 创新设计柔性涡流传感器用于软体抓手本体触觉感应。与电感传感器相似, 电磁屏蔽的限制阻碍了该传感器在柔性机器人领域的广泛开发和使用, 因此, 结构简单、成本低、抗干扰能力强的柔性涡流传感器有待深入研究。

6. 光学传感器

光学传感器是高效、空间有限设备中最复杂、最受欢迎的传感器之一。随着LED灯、二极管等光学元器件向小型化、精密化进步, 以及新一代柔性光纤的发展, 使光学传感器应用在空间有限的柔性机器人上成为可能。光学传感器被用来感应表面触觉、表面偏转、弯曲或拉伸、表面压力等信息。光学传感器在结构上的变形能力强, 能够适应不同的应用场景。并且光学传感器的准确度和精确度很高, 几乎没有滞后, 实时性较强, 这对反馈和控制非常有益。在柔性机器人的应用上, Dobrzynski等人将软光波导集成在软体驱动器内部, 软驱动器的内部涂有银反射层, 发光二极管(LED)和光电二极管放置在致动器内部, 将光传递到气室中, 光电二极管检测到发出的光的强度。当致动器弯曲, 银层上会产生微小的微裂纹, 使光能够从气腔中逃逸。这降低了室内的光强度。通过监测光强测量驱动器的弯曲角度。此外, Chiara等人通过将光纤布拉格光栅集成在驱动器内部实施监测软驱动器的弯曲曲率。为了同时监测多个信息, Escobedo等人开发一种嵌入在软弹性基板上的具有自能量产生和传感特性的eSkin, 它能够同时监测对象位置、接近度、边缘检测和触觉等信息。虽然光学传感有很多优点, 但传感器和相关元件很精致, 通常需要复杂的测量系统, 总体成本相对较高。

二、发展方向

柔性传感器的发展为柔性机器人的智能化奠定了基础。目前, 磁性传感器、电感传感器、电容传感器、应变传感器、电涡流传感器和光学传感器的发展已经为柔性机器人提供了接近、触觉、力、变形等方面的感知。利用这些感知信息, 多种新型控制方法被开发以实现智能功能, 如形状识别、对象分类、精确调整力输出等。

随着柔性机器人应用场景的扩大, 更多能够感知本体和环境信息的柔性传感器需要被开发, 这些传感器与先进的控制算法配合以使柔性机器人对复杂环境做出反应, 在现实世界场景中智能高效地运行。未来柔性传感器在材料科学这个关键领域仍有较大研究潜力。

柔性传感器的功能在很大程度上依赖于先进材料, 力、速度和形状等输出变量的感知深受所采用材料特性的影响。例如, 不同硬度弹性体材料的使用能够改变柔性传感器的响应特性; 自愈合材料的使用使柔性传感器在被刺穿后能够持续保持工作; 温控相变材料的使用不仅能够控制柔性传感器的响应带宽, 还可以实现柔性传感器的变刚度感知功能, 极大增加柔性传感器的感知功能。因此, 材料科学的进步对柔性传感器的发展至关重要。

总结

柔性传感器为柔性吞咽机器人提供本体感知, 是实现易损类球零件安全搬运的有效方法。本文在总结柔性传感器特性的基础上, 介绍了适用于柔性吞咽机器人的六种柔性传感器: 磁性传感器、电感传感器、电容传感器、应变传感器、电涡流传感器和光学传感器。这些传感器能够感知柔性吞咽机器人的本体和环境信息, 确保柔性吞咽机器人能够在真实环境中持续操作, 是柔性吞咽机器人实现闭环控制的重要环节。受材料技术和制造技术的限制, 柔性传感器的应用仍存在一些挑战, 如柔性本体、柔软连接以及成本等。因此, 高柔软度、强拉伸性、高寿命和低成本是柔性传感器的发展方向。

参考文献

- [1]Li H, Yao J, Liu C, et al. A Bioinspired Soft Swallowing Robot Based on Compliant Guiding Structure. *Soft Robotics*. 2020, 7(4): 491-9.
- [2]Chen F, Dirven S, Xu W, et al. Soft Actuator Mimicking Human Esophageal Peristalsis for a Swallowing Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2014, 19(4): 1300-8.
- [3]Sundaram V, Ly K, Johnson BK, et al. Embedded Magnetic Sensing for Feedback Control of Soft HASEL Actuators. *IEEE Transactions on Robotics*. 2022: 1-15.