

光纤光栅形状感知赋能智能机械手研究综述

王思文, 孙浩然, 赵春园

(吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130012)

摘要 智能机械手在狭小封闭场景中开展实时形态监测时, 光纤光栅形状感知技术可提供全新的解决路径。本文围绕传感原理、重构算法与系统集成三个方向, 梳理了该领域的现有研究进展。在原理维度上, 针对FBG阵列、多芯光纤、OFDR三类技术, 对比了三者在精度、实时性与集成度上的优劣; 在算法维度上, 整理了相关技术方案从微分几何经典框架过渡到机器学习驱动方法的发展路径; 在集成维度上, 分析了表面贴附、嵌入式封装等布设方式对机械手性能的实际影响。最后探讨了扭转分离、环境补偿等核心挑战及未来发展方向, 以期智能机械手的工程应用提供理论参考。

关键词 光纤光栅; 形状感知; 智能机械手

基金项目 吉林省教育厅科学技术研究项目《智能光纤光栅嵌入式人形机械手的形状感知研究》(项目编号: JJKH 20251783KJ)。

中图分类号: TH741; TN247

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.002

0 引言

智能机械手在微创手术、精密制造等领域的应用日益广泛, 但其在狭小、封闭场景中的空间形态难以实时获取, 成为制约智能化水平的关键瓶颈。光纤光栅传感技术凭借体积小、抗电磁干扰、可分布式测量等优势, 为解决机械手实时形状感知提供了新路径。近年来, 国内外学者围绕该技术开展了大量研究, 但各类方法的适用条件与性能优劣尚缺乏系统梳理。本文通过对FBG阵列、多芯光纤、OFDR等传感技术及微分几何、机器学习等重构策略的系统比较, 厘清不同方法在精度、实时性、鲁棒性等方面的优劣权衡。构建“传感原理—重构算法—系统集成”三维分析框架, 帮助工程技术人员快速匹配最优方案, 缩短研发周期; 同时推动智能机械手从“被动执行”向“主动感知”转型, 加快智能装备产业化进程。

1 形状感知的传感原理与方法

1.1 基本原理: 波长漂移—应变—曲率映射

光纤光栅形状感知的基本原理建立在波长漂移—应变—曲率映射关系之上。当光纤布拉格光栅(FBG)受到机械应变时, 其栅格周期和有效折射率发生变化, 导致反射中心波长发生偏移, 这一偏移量与轴向应变成正比。通过将FBG偏心布置于机械结构表面或内部, 轴向应变可转化为弯曲曲率信息, 从而建立“波长漂

移—应变—曲率”的定量映射关系。郭永兴等^[1]提出的双层正交FBG阵列结构, 通过两层 4×4 光栅阵列实现了曲率与弯曲方向的解耦测量, 实验表明波长漂移量与曲率之间呈现良好的线性递增关系。

1.2 传感结构设计: 单芯阵列、多芯光纤与光纤束

不同传感结构的设计方法各具特色。单芯多光栅阵列是最常见的结构形式, 通过在单根光纤上串联多个FBG, 实现准分布式测量; 多芯光纤则将多个纤芯集成于同一根光纤中, 通过测量各纤芯的应变差异解算弯曲曲率和方向^[2]; 光纤束结构由多根独立的FBG光纤组合而成, 通过刚性或柔性基体固定形成传感单元。

1.3 应变测量方式: 准分布式与分布式对比

应变测量方式可分为准分布式和分布式两大类。准分布式测量以FBG阵列为代表, 在光纤上预设离散传感点, 通过波分复用技术实现多路复用。分布式测量以光频域反射计(OFDR)为代表, 利用光纤中的瑞利散射实现连续应变测量, 具有极高的空间分辨率。莫内等^[3]对FBG和OFDR两种技术在连续体机械手上的应用进行了比较研究, 结果表明, 在自由弯曲、障碍物交互和S形弯曲场景下, OFDR的末端定位误差显著优于FBG, 展示了分布式测量在复杂形状感知中的优势。

不同传感方法的性能各有侧重, 主要体现在精度、空间分辨率、实时性、集成难度四个维度, FBG阵列技术成熟, 解调速度快, 成本相对较低, 本身体积小易

作者简介: 王思文(1993-), 女, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 光纤传感。

封装,在机械手中的集成度比较高,适合对实时性要求较高的控制场景^[4]。

2 形状重构算法与实现策略

2.1 经典算法:微分几何重构框架

形状感知的核心理论基础是依托微分几何的重构算法,主要包含Frenet-Serret框架与曲率积分法两类,Frenet-Serret框架先搭建空间曲线的切向、法向和副法向向量,结合曲率和挠率参数递推,得到重构曲线形态,曲率积分法以离散曲率数据为基础,选用坐标变换或空间点递推,完成曲线重构。

2.2 算法演进:面向复杂工况的改进策略

研究人员处理扭转、大变形、多关节等复杂工况时,已提出多种算法改进策略。阿米尔哈尼等^[5]提出的速度依赖形状重构模型,引入了传感单元在机械手通道内滑动引发的速度相关曲率偏差,在0.2~1.4 mm/s的不同运动速度下,形状和末端跟踪精度较传统模型提升22%~65%,动态环境下的重构准确性有所提升。

2.3 前沿方法:机器学习驱动的数据重构

机器学习方法在形状重构中的应用是近年来的研究热点,形成了数据驱动、混合模型等多种技术路径。何晓田等^[6]提出基于人工神经网络(ANN)的连续体机器人形状感知方法,采用单根多芯光纤偏心布置,避免了传统方法对光纤位置精确标定的依赖,在自由空间和约束环境中的平均形状感知误差分别为0.24 mm和0.49 mm,展示了数据驱动方法的优越性。鲁德萨里等^[7]采用深度学习方法从边缘FBG的完整光谱中提取形状信息,利用Hyperband算法优化网络超参数,对30 cm长传感器在1.4~35.3 m⁻¹曲率范围内的形状预测中位末端误差为3.11 mm。施瓦茨等^[8]引入不确定性估计机制,通过深度神经网络直接估计连续体机械手的形状,同时量化模型预测的置信度,为手术机器人的安全应用提供了重要保障。

重构算法的精度评价方法与误差分析是验证算法有效性的关键环节。研究者通常通过分析传感光纤关键参数误差、信号解调误差、传感方程与重构算法误差、环境温度变化等,建立测量系统关键参数标定与误差校正方法,提高测量精度。

当前用于重构任务各类算法,在重构精度、计算效率,以及对动态运动的适配能力这三个评价维度上,不同算法的实际表现存在明显区别。依托微分几何理论的传统算法,理论体系成熟,物理含义清晰,不过这类算法受传感器精度、标定参数的影响大,还存在误差不断累积的缺陷。经过改进的重构算法,采

用误差校正、速度补偿等处理策略,适配复杂工况的能力有所提升,只是运算过程的复杂程度也会随之上升。基于机器学习的重构方法,可直接搭建传感数据和目标形状的非线性映射关系,绕开传统方法里误差累积、参数标定的难点,精度和鲁棒性的表现相对更好。针对动态运动的适配需求,纳入速度效应、不确定性估计的重构模型,对动态重构精度、系统整体可靠性的提升效果较为明显。

3 机械手集成方法与系统性能

3.1 集成方式与系统设计:从封装工艺到工程实现

形状感知系统的实用性,由传感单元与机械手结构的集成方式决定,结合机械手的特殊需求开展系统设计,能为技术落地提供工程支撑。这两部分组合起来,就构成了从传感器到实用系统的完整技术链条。

在集成方式方面,目前主流的方案包括表面贴附、嵌入式封装和柔性基底集成。表面贴附方式将FBG传感器直接粘贴于机械手表面,具有实施简单、易于更换的优点,但易受外界环境影响。嵌入式封装将FBG传感器埋入机械手本体材料内部,实现传感与结构的一体化,具有保护好、测量准确的优点,但对封装工艺要求较高。柔性基底集成方式将FBG传感器预先封装于柔性材料中,形成独立的柔性传感单元,再与机械手本体结合,兼顾了传感性能与结构柔性。在系统设计层面,多节点同步、实时解调与小型化是核心工程需求。在多节点同步方面,研究者通过波分复用、空分复用等技术实现多测点数据的同步采集。在实时解调方面,高速光纤光栅解调仪的发展为实时形状感知提供了硬件基础。在小型化方面,光纤传感器本身的微型化特性使其易于集成于小型机械手中。

3.2 应用验证:连续体机器人、软体机械手

典型应用场景的验证研究展示了形状感知技术在各类机械手上的适用性。连续体机器人是应用最广泛的场景,研究者开展了大量验证实验。何晓田等^[9]的基于深度学习的形状感知方法在双自由度流体驱动导管系统上验证,40 mm长的连续体机器人在3D自由空间和2D约束环境中的平均形状感知误差分别为0.24 mm和0.49 mm。软体机械手是另一重要应用领域,研究者针对软体材料的大变形、非线性等特点开展了专门研究。郝建雄等^[10]针对气动软体手指提出了基于两种传感模态的2D形状估计方法,实现了弯曲角度达320°的大变形软体手指的形状估计。

3.3 系统性能与集成效果的综合评估

要综合评估系统性能,就需要从精度、响应速度、鲁棒性和温漂抑制等多个方面切入,不同集成方案给

机械手原有性能带来的改变,是判断技术有效性的最终依据。

系统性能的评估可分为四个核心方向:一是精度校验环节,现有研究多采用末端位置误差、形状重构误差、曲率测量误差三类指标,完成系统性能的量化统计。二是在响应速度考核上,机械手控制必须满足实时性要求,目前已落地的系统普遍能达到毫秒级到秒级的响应速度。三是在鲁棒性测试中,研究者会引入冗余设计、机器学习和不确定性估计等手段,增强系统的抗干扰表现。四是在温漂抑制效果验证上,现有多项研究结果都能验证温度补偿技术的有效性。

不同集成方案作用于机械手后,最终呈现的性能存在一定差异。嵌入式封装方案将机械手与传感系统整合为一体,对外界干扰的防护能力最优,不过封装工序可能改变机械手的力学性能,需开展精细化设计。柔性基底方案可同时满足传感性能与结构柔性的要求,是现阶段软体机械手集成的主流方案,不过多层结构容易使应变传递出现损耗,需搭建精度足够的应变传递模型。实际抓取操作的有效性层面,李天龙等^[11]依托平行双FBG阵列,完成了不规则截面软体机械手的分布式曲率感知与形状重构,恒温和变温环境下的形状重构误差均小于1 mm,静态和动态抓取实验证实形状跟踪具备可行性,轴向驱动力的抑制目标也顺利达成。

4 光纤光栅形状感知赋能智能机械手面临的挑战与发展方向

4.1 核心挑战:扭转分离、环境补偿与实时瓶颈

当前研究面临三大核心挑战。扭转与应变分离是首要难题,光纤传感器对轴向应变和扭转均敏感,信号解耦复杂,多芯光纤虽具潜力但制备精度要求严格,实际应用中误差较大。在极端环境补偿方面,温度变化与应变信号混叠,传统参考光栅法在温度梯度场中效果有限,振动干扰和生物组织接触带来的非线性形变也对系统稳定性提出更高要求。实时处理瓶颈突出,OFDR技术空间分辨率高但解调速度慢,难以满足高速运动控制需求;FBG阵列虽解调快但离散测点难以捕捉复杂形状细节,精度与实时性难以兼得。

4.2 融合趋势:新材料、先进封装与智能算法

跨学科融合正重塑技术边界。在新型材料方面,将FBG与形状记忆合金、磁敏材料结合,可实现传感—驱动一体化,自修复柔性基底可提升传感器在复杂环境中的存活率。先进封装技术如真空注胶、3D打印一体化集成,有效解决了手工封装残余应变和一致性差的问题,微纳制造将推动传感器向更微小柔性方向发

展。智能算法使系统具备学习能力,机器学习可规避传统算法对精确标定的依赖,在精度和鲁棒性上优势显著;不确定性估计机制为医疗级应用提供安全屏障,物理-informed网络有望进一步提升可解释性。

4.3 未来展望:从感知到认知的系统演进

未来研究可从三个方面推进:其一,发展多模态融合的混合传感系统。FBG与OFDR融合、光纤与电流感感互补、视觉—光纤多模态协同,可在精度与速度间取得平衡。其二,构建物理模型与数据驱动深度融合的重构算法。将微分几何约束引入神经网络训练,利用物理模型生成仿真数据,是突破泛化能力和可解释性瓶颈的有效路径。其三,实现传感—驱动—控制一体化的智能机械手系统。将形状信息融入运动规划和自主避障,真正实现从“被动执行”向“主动感知与决策”的范式跃迁。

参考文献:

- [1] 郭永兴,杨跃辉,熊丽.双层正交的光纤布拉格光栅柔性形状传感技术[J].光学精密工程,2021,29(10):2306-2315.
- [2] 孙广开,张兴硕,何彦霖,等.面向连续体机器人精密操作的多芯光纤三维形状与位置测量误差研究[J].机械工程学报,2024,60(03):68-82.
- [3] 莫内,塞法蒂,洛尔,等.连续体机器人高分辨率光纤形状感知的比较研究[C]//2020年IEEE国际机器人与自动化大会(ICRA).IEEE,2020.
- [4] 王彦,徐浩雨,汪俊亮,等.环形布设光纤布拉格光栅的三维曲面形状重构[J].中国光学(中英文),2024,17(02):398-408.
- [5] 阿米尔哈尼,古德里奇,埃斯凡迪亚里,等.用于连续体机械臂形状重构的光纤布拉格光栅形状传感器的设计与制造[J].IEEE传感器杂志,2023,23(12):12915-12929.
- [6] 何晓田,吴迪,欧拉克,等.基于深度学习的柔性机器人形状感知[J].IEEE机器人学汇刊,2023,39(02):1580-1593.
- [7] 鲁德萨里,胡克-霍瓦特,弗罗因德,等.基于深度学习的光纤布拉格光栅形状感知[J].机器学习:科学与技术,2023,04(02):25037.
- [8] 施瓦茨,梅尔法德,阿米尔哈尼,等.基于光纤布拉格光栅传感器的受限环境下手术连续体机械臂不确定性感知形状估计[C]//2024年IEEE国际机器人与自动化大会(ICRA).IEEE,2024.
- [9] 同[6].
- [10] 郝建雄,张志强,王硕,等.基于两种传感模态学习的气动驱动大弯曲角度软体手指2D形状估计[J].先进智能系统,2023,05(10):2300324.
- [11] 李天龙,邱雷,任洪亮.基于并行双FBG阵列的不规则截面软体机械臂分布式曲率感知与形状重构[J].IEEE/ASME机电一体化汇刊,2020,25(01):406-417.