

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 104



基于光纤光栅传感的智能 内窥镜形状感知系统

- 作者：张 伦 伟
- 专业：机 械 电 子 工 程
- 导师：钱 晋 武



G643/149

上海大学出版社

001280769

2005年上海大学博士学位论文 104



基于光纤光栅传感的智能 内窥镜形状感知系统

- 作者：张 伦 伟
- 专业：机械电子工程
- 导师：钱 晋 武



贵阳学院图书馆



图书在版编目(CIP)数据

2005 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士论文编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-81118-367-2

I. 2… II. 博… III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2005 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 180878 号



2005 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 274.25 字数 7641 千

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1~400

ISBN 978-7-81118-367-2/G·490 定价: 980.00 元(49 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2005)

Novel Shape Detection Systems Based on FBG Sensor Net for Intelligent Endoscope

Candidate: Zhang Lunwei

Major: Mechatronics Engineering

Supervisor: Qian Jinwu

Shanghai University Press

• Shanghai •

答辩委员会评语

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:	程君实	教授,上海交通大学	200030
委员:	李爱平	教授,同济大学	201804
	刘 谨	教授,上海大学机自学院	200072
	陈明仪	教授,上海大学机自学院	200072
	陈辛波	教授,同济大学	201804
导师:	钱晋武	教授,上海大学	200072

评阅人名单:

程君实	教授,上海交通大学	200030
龚振邦	教授,上海大学精密机械系	200072
周常河	教授,中科院上海光机所	201800

评议人名单:

梅 涛	教授,中科院合肥智能所	230031
杨 杰	教授,中科大精仪系	230026
张玉茹	教授,北京航空航天大学	100083
赵锡芳	教授,上海交通大学机器人所	200030
陈辛波	教授,同济大学	200092
屠大维	教授,上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

张伦伟同学的博士学位论文“基于光纤光栅传感的智能内窥镜形状感知系统”是国家 863 计划和国家自然科学基金的一个研究内容,是一项崭新的多学科交叉的前沿课题。具有重要的技术意义和应用价值。

该论文以内窥镜形状感知系统的临床需求和应用为出发点,在对已有技术的调研的基础上,着重探索研究了以下几个问题:

1. 基于光纤光栅传感的原理,利用光纤光栅 Bragg 波长与应变、温度之间的关系分析和试验研究,设计并研制了新型光纤光栅大曲率传感器,构建了传感网络,进行了封装工艺、预应变及减敏等研究。

2. 利用基于离散曲率信息的曲线形状重建理论和技术,设计了形状感知系统,实现了内窥镜的形状再现。并进行仿真和在动物肠道内试验,较准确地感知出肠道中内窥镜的形状。

3. 分析了光纤光栅内窥镜形状感知系统的误差影响因素,为进一步提高系统精度提供了理论和实验依据。

论文叙述清楚,理论分析正确,实验数据翔实。主要研究成果具有创新性,对未来的发展有重要的参考价值。

论文答辩时,张伦伟同学回答问题正确。

论文工作和答辩表明作者具有坚实的理论基础和系统的专业知识,并具备了独立科研工作的能力。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过张伦伟同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席:程君实

2005年7月18日

摘 要

论文对基于光纤光栅传感的内窥镜形状感知系统进行了探索和研究,特别对微小尺寸的光纤光栅大曲率传感器及传感网络的关键技术进行了深入探讨,结合机械电子技术和计算机图形学技术,研制了全新的基于光纤光栅传感网络的实时形状感知系统以及渐进式形状感知系统,实现了内窥镜检查过程中镜体的可视化。

论文首先概述了医用内窥镜的发展历程,结合人体结肠特性,归纳了传统结肠内窥镜检查存在的问题,就内窥镜形状感知技术研究现状以及光纤光栅在智能结构中的应用现状进行了综述,通过对现有各种形状重建的方法和传感元器件的对比分析,提出了系统的总体研究方案,并讨论了各个功能模块的研究和设计技术路线。

随后,论文结合光纤光栅传感器的温度及应变传感特性实验研究,探讨了光纤光栅传感的关键技术,包括传感机理、传感网络拓扑设计以及光纤光栅解调原理选择等。针对内窥镜形状感知的具体限制与要求,对光纤光栅大曲率传感的原理、设计、封装及标定等关键技术进行了研究,研究工作主要集中在以下三个方面:① 为了实现大曲率变形检测,论文研究了光纤光栅空间曲率传感原理,选择了合适的基材,设计了传感器布置方式,并通过设计专用封装设备和工艺,研制了微小尺寸的大曲率传感器;② 针对光纤光栅在机械性能上受拉、受压的能力不均衡,通过封装时

在基材上施加预拉应变,扩大了光纤光栅的有效测量范围;③对曲率传感器在各种封装条件下的灵敏度进行了实验和分析,在较大的范围内实现了光纤光栅大曲率传感器灵敏度的可调。

在光纤光栅大曲率传感器研究的基础上,论文设计并搭建了基于光纤光栅传感网络的实时和渐进式两种内窥镜形状感知系统:①设计了网络规模为20个光纤光栅的四通道空分/波分复用形状感知网络,并按设计的几何关系封装在细长的SMA基材上,研制了微小外径尺寸的光纤光栅传感柔性杆。基于两种实时性能不同的解调仪器,利用形状重建算法及相关的数据处理、融合方法,搭建了内窥镜形状实时感知系统。②基于降低系统成本的考虑,论文研究了用两个光纤光栅组成的双通道空分复用传感网络实现对内窥镜钳道变形的逐点测量的方案。这种渐进式形状感知系统假设内窥镜介入人体后形状基本上不再发生变动,基于简单的解调仪器和空分复用传感柔性杆,利用自动推进装置,将柔性杆间歇介入到内窥镜的钳道中,渐进获得传感头经过内窥镜的手术钳道的介入轨迹,间接重建出内窥镜在人体内的形状。

在上述两种形状感知系统成功搭建的基础上,论文进行了必要的分析及实验研究,主要包括温度变化对形状感知的影响及补偿、误差分析和精度试验、形状感知系统的临床适应性试验研究等三个方面。①曲率传感器的信号中包含了温度变化的影响,论文通过试验得出了在不同曲率半径下对应的温度系数,进而获得了曲率传感器的温度与应变的耦合系数的取值范围。通过仿真研究,给出了实时形状感知系统和渐进式形状系统各自的温度响应情况,并进行了初步的温度补偿实验。②形

状感知系统的误差决定了该系统的实用性,论文研究了形状感知系统的误差定义、组成及减少误差的方法,对各种误差对系统的总误差的贡献进行了试验和仿真分析,并实验获得了两种形状感知系统的精度,为进一步提高内窥镜形状感知系统的精度提供了理论与试验依据。③ 论文研究中在玻璃硬管、动物模拟肠道两种试验平台上进行了形状感知系统适应性试验。在模型试验的基础上,对活体成年猪肠道进行了两次内窥镜检查验证,获得了活体动物肠道中内窥镜形状信息。验证了光纤光栅形状感知系统的有效性,为整个系统的实用化进行了前期试验准备工作。

总之,论文通过对微小尺寸的空间大曲率光纤光栅传感器及其网络的原理、设计、封装及相关试验研究,利用自动推进装置、数据处理与形状重建软件,研制了基于光纤光栅传感网络的实时和渐进式形状感知原理样机系统,并实验获取了活体动物体内内窥镜的形状。系统具有较高的安全性和抗电磁干扰能力,经进一步发展后,形状感知系统可望应用于临床内窥镜诊疗。据国内外文献检索,论文研究的两种新型的实验样机以及在此基础上进行的分析和动物试验等研究工作未见其他相同报道。论文部分研究成果已经在 ICRA04、ICMA05 以及其他国内外期刊和会议发表。“软性内窥镜三维曲线形状检测装置和方法”,已被受理发明专利申请。

本研究工作得到了国家自然科学基金、国家 863 计划以及教育部优秀青年教师资助计划的支持。

关键词 内窥镜, 光纤光栅, 曲率, 传感网络, 实时, 渐进式, 形状感知

Abstract

This dissertation aims to provide steady sensing systems for the shape detection of colonoscopes. The research especially deals with the key technology of Fiber Bragg Grating (FBG) large curvature sensor and sensor net, integrates the technologies of mechatronics and computer graphics, and then develops real time FBG shape sensing system and incremental shape sending system for colonoscopies.

After the analysis of state-of-the-art for the development of the endoscope and the difficulties of colonoscopy, the actualities of both endoscopic shape sensing and of FBG structure monitoring are summarized. By the analysis of the reconstruction principles and optional sensor components, integrated design of the shape sensing systems and the development roadmap of each unit are proposed respectively.

Based on the experimental research on FBG sensing response under different strain and temperature separately, the key technologies of typical FBG system are discussed. According to the limitation and requirement of the shape sensing of colonoscope, the principle design, encapsulation and calibration method of FBG large curvature sensor are discussed in detail. The research work mainly includes: ① By

the design of substrate material, encapsulation mechanism and encapsulation technology, a novel slim FBG large curvature sensor wire is developed. ② FBG sensor with pre-strain is mounted on a slim cylindrical substrate to deal with the limitation caused by unbalanced mechanical property of the optical fiber. ③ At the same time, by changing the encapsulation condition, the curvature sensitivity can be adjusted in a large range.

In the dissertation, based on the research on the large curvature sensor and the curve fitting method, real time and incremental FBG shape sensing systems have been developed respectively. ① A four-channel SDM/WDM FBG sensor net comprised 20 FBG sensors has been designed and encapsulated on a flexible slim SMA substrate. Taking advantage of multi-sensor data processing and curve fitting method, a real time shape sensing system for endoscope is built up. ② To reduce the cost of the shape sensing system, an incremental shape detection system composed by simple demodulator, single point SDM sensor wire and an automotive feed-in mechanism is developed. This system supposes a colonoscope be immobile after it is advanced into the human's body. The automotive feed-in mechanism is designed to impel the sensor wire into the surgical channel by fits. By the incremental detection of the spatial curvature information, we can get the approximate shape of colonoscope according to the track of the sensor wire.

After the successful building of the real time and

incremental shape sensing system, necessary analysis and experimental research have been done, mainly including temperature influence and compensation, error analysis and accuracy experiment, elementary adaptability experiments.

① As temperature can affect the output of FBG sensors, even through there is no strain, analysis of the temperature effect on sensing result is necessary. By experiments, temperature coefficients under different curvature are found out, thus we can get the bound of temperature and strain coupling coefficients. Several methods for temperature compensation are discussed with the elementary experimental result given.

② Subsequently, this dissertation discusses the definition and components of the reconstruction error. The contribution of every error component is found out from simulation or experiments, the methods to improve precision of shape sensing are also discussed. ③ Before clinic application, it is necessary to test the adaptability of the shape sensing systems. After experiments in a glass tube and in an intestinal model, shape sensing colonoscopy on live swine has been done successfully.

To summarize, novel shape sensing devices for intelligent colonoscope are proposed. Research work mainly deals with the key technologies of FBG large curvature sensor and sensor net, the design of the automotive feed in mechanism, data processing and shape reconstruction software and so on. These two shape sensing systems can work under electromagnetic disturbance and are hopeful to be used in

clinic after amelioration. By the literature search, these two novel FBG shape sensing systems and the relevant work have never been reported before. Some results of this dissertation have been published by ICRA04, ICMA05 and other publications. The application of the invention “3D shape detection device and method for soft endoscope” has been accepted by the National Patent Bureau after original investigation and initial examination.

This research is jointly sponsored and supported by National High-Tech R & D Program, NSFC, and the Excellent Young Teacher Program of MOE.

Key words Endoscope, FBG, Curvature, Sensor net, Real time, Incremental, Shape sensing

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 智能内窥诊疗技术研究概况	9
1.3 光纤光栅传感在智能结构中的研究应用概况	18
1.4 论文的任务及目标	23
1.5 本章小结	24
第二章 内窥镜空间形状感知总体设计及系统方案设计	25
2.1 总体方案研究	25
2.2 系统总体参数设计	29
2.3 传感单元设计方案	31
2.4 基于离散点曲率信息形状重建方法	37
2.5 本章小结	41
第三章 FBG 传感机理验证及形状感知网络拓扑设计	42
3.1 光纤光栅基本光学特性	42
3.2 光纤光栅传感机理验证	43
3.3 光纤光栅形状感知网络拓扑结构和分析	49
3.4 本章小结	55
第四章 FBG 空间大曲率传感器的研制	56
4.1 FBG 曲率传感器原理	56
4.2 FBG 曲率传感器封装研究	59
4.3 光纤光栅大曲率检测实验	66

4.4	FBG 传感器减敏研究	73
4.5	本章小结	76
第五章 基于混合复用 FBG 网络的内窥镜形状实时检测		77
5.1	实时形状感知系统组成	77
5.2	FBG 传感网络设计	78
5.3	形状感知传感网络标定	82
5.4	基于多波长计的形状感知系统	83
5.5	基于 FBG 传感网络分析仪的实时形状感知系统	90
5.6	本章小结	95
第六章 渐进式形状感知系统设计与实验		96
6.1	渐进式形状感知系统总体设计	96
6.2	传感网络的研制与标定	97
6.3	自动推进装置的研制	100
6.4	解调接口设计	104
6.5	渐进式形状检测系统控制单元	108
6.6	渐进式形状感知系统及部分实验结果	112
6.7	本章小结	114
第七章 温度变化对形状感知的影响及补偿方法		115
7.1	温度变化对应变测量的影响	115
7.2	温度变化对曲率测量的影响	117
7.3	温度变化对形状感知结果的影响	123
7.4	形状感知系统的温度补偿方法及实验	127
7.5	本章小结	131
第八章 误差分析及精度研究		132
8.1	误差的定义	132