University of Groningen

Fiber Bragg Grating Sensors for Flexible Medical Instruments

Khan, Fouzia

DOI:
[10.33612/diss.167718523](https://doi.org/10.33612/diss.167718523)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2021

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
Khan, F. (2021). *Fiber Bragg Grating Sensors for Flexible Medical Instruments*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.167718523>

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Fiber Bragg Grating Sensors for Flexible Medical Instruments

Fouzia Khan

Fouzia Khan
Fiber Bragg Grating Sensors for Flexible Medical Instruments
PhD thesis, University of Groningen

Copyright ©2021 Fouzia Khan
No part of this thesis may be reproduced, stored or transmitted in any
form or by any means, without permission from the author.

Cover design: LUVANE
Printed by: Ipskamp Printing, Enschede

The publication of this thesis was financially supported by University of
Groningen.

university of
 groningen

Fiber Bragg Grating Sensors for Flexible Medical Instruments

PhD thesis

to obtain the degree of PhD at the
University of Groningen
on the authority of the
Rector Magnificus Prof. C. Wijmenga
and in accordance with
the decision by the College of Deans.

This thesis will be defended in public on

Wednesday 12 May 2021 at 11.00 hours

by

Fouzia Khan

born on 17 June 1986
in Munshiganj, Bangladesh

Supervisors

Prof. S. Misra
Prof. P.C. Jutte

Assessment Committee

Prof. E.C.J. Consten
Prof. S. Manohar
Dr. J.J. van den Dobbelaars

This thesis is part of the EDEN2020 project and has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement #688279. www.eden2020.eu

To my dear parents.

Samenvatting

Het hoofddoel van dit proefschrift is de positie en oriëntatie van flexibele medische instrumenten -zoals katheters -te verkrijgen door middel van optische sensoren. Deze sensoren worden in het engels “fiber Bragg-gratings” genoemd, afgekort tot FBG-sensoren. Flexibele instrumenten worden veelvuldig gebruikt bij minimaal invasieve chirurgie, waarbij de chirurg opereert via kleine incisies in plaats van grote. Deze minimaal invasieve operaties zijn gunstig voor patiënten omdat er geen grote wond ontstaat en de patiënt daardoor minder pijn en minder complicaties ervaart, sneller herstelt, en daarmee bijdraagt aan lagere ziekenhuiskosten.

De kleine afmeting van de incisie heeft echter tot gevolg dat de instrumenten niet direct te zien zijn. Daardoor ontbreekt informatie over de positie en oriëntatie van deze instrumenten. Dit probleem wordt momenteel in de praktijk ondervangen door gebruik te maken van beeldvorming via röntgenstralen of door laparoscopie (camera met lichtbron). Deze oplossingen kennen elk hun beperkingen. Denk aan mogelijke schadelijke effecten van straling in geval van röntgenbestraling en beperkte toepasbaarheid bij minimaal invasieve chirurgie van laparoscopie. Scopische benadering is slechts toepasbaar in holten die kunnen worden verlicht, denk aan buikholte of hersenkamers. Daarentegen heeft het gebruik van een camera met een lichtbron binnen in bloedvaten of in solide weefsels niet zo veel zin. Deze beperkingen zijn de aanleiding om onderzoek te doen naar alternatieve methoden om bij minimaal invasieve chirurgie toepassingen noodzakelijke positie en oriëntatie van de flexibel medische instrument te krijgen.

Dit proefschrift beschrijft een van deze alternatieve methodes, namelijk de technieken om met behulp van FBG-sensoren de positie en oriëntatie van een flexibel instrument te verkrijgen. Daarnaast wordt een methode gepresenteerd om op basis van de sensormetingen de krachten op de punt van het instrument te schatten. In Hoofdstuk 2 wordt een techniek gepresenteerd, waarmee de positie van de katheter in 3D-ruimte wordt gereconstrueerd met behulp van de FBG-sensoren. Dit principe wordt verder ontwikkeld in Hoofdstuk 3, door naast de positie van de punt van de katheter ook informatie over de oriëntatie te verkrijgen. Hoofdstuk 4 presenteert een vergelijkende studie tussen twee verschillende soorten multi-core vezels met FBG-sensoren. Een van de vezels heeft rechte kernen terwijl de andere spiraalvormige kernen heeft. Ten slotte worden in Hoofdstuk 5 en 6 twee toepassingsstudies beschreven. In de eerste studie worden FBG-sensoren in combinatie met echografie gebruikt om een katheter te volgen en in de

tweede studie wordt de vorm die is verkregen van de FBG-sensoren gebruikt om de kracht op de punt van een flexibel instrument te schatten.

Het onderzoek in het proefschrift laat zien dat FBG-sensoren effectieve sensoren zijn om informatie te verkrijgen over de positie en oriëntatie van medische instrumenten. Zo kunnen FBG-sensoren worden toegepast op instrumenten die worden gebruikt bij minimaal invasieve chirurgie waarbij het instrument niet direct zichtbaar is. Als onderzoek op dit gebied wordt voortgezet kan zicht worden verkregen op het volledige toepassingspectrum van deze sensoren bij minimaal invasieve chirurgie.

Summary

The main objective of this thesis is to utilize optical sensors called fiber Bragg gratings (FBG) to acquire the position and orientation of flexible medical instruments such as catheters. These instruments are frequently used in minimally invasive surgeries where small incisions are made to perform the surgery. These minimally invasive surgeries are beneficial for patients because there is no large wound therefore the patient experiences less pain, fast recovery, and fewer complications; thus it contributes to lower hospital costs.

The small size of the incision means that during a minimally invasive surgery the instrument cannot be directly seen, thus the position and orientation of the instrument are concealed. This issue is mitigated currently in practice by utilizing imaging like X-rays or laparoscopes (camera with light source); but these solutions have certain drawbacks such as harmful radiation used in X-rays and inability to use laparoscopes for all minimally invasive surgeries. A laparoscope can only be used in cavities that can be illuminated, such as the abdominal cavity or the ventricles in the brain. However, it is not possible to use a light source in a blood vessel or in solid tissues. These limitations motivate research into alternative methods of acquiring position and orientation of a flexible instrument.

This thesis is an outcome of one such research endeavor and it presents techniques of acquiring the position and orientation of a flexible instrument based on measurements from FBG sensors. Moreover, a method to estimate the forces at the instrument's tip from the sensor measurements is also presented. Chapter 2 provides a technique to get the shape of the catheter based on FBG measurements and to get the position of the catheter in 3D space. The technique is further developed in Chapter 3 to acquire the orientation in addition to the position of the catheter tip. Chapter 4 presents a comparison study between two different types of multi-core fibers that have FBG sensors. One of the fiber has straight cores while the other has helical cores. Lastly, Chapter 5 and 6 present two application studies where the first study utilizes FBG sensors in conjunction with Ultrasound to track a catheter and the second study utilizes the shape of a flexible instrument to estimate the force on its tip.

The research in the thesis shows that FBG sensors are effective as position and orientation sensors for flexible medical instruments. Thus, FBG sensors can be applied to instruments utilized in minimally invasive surgery where the instrument is not directly visible. Continuing research in this field will provide insight into the full spectrum of applications of these sensors.

Contents

Samenvatting	ix
Summary	xi
I Introduction	1
1 Thesis Overview	3
1.1 Motivation	3
1.2 Literature Review	7
1.3 Main Contributions	9
References	12
II Shape and Pose Sensing	19
2 Shape Acquisition	21
2.1 Introduction	21
2.2 Theoretical Framework	23
2.3 Experiments	30
2.4 Conclusions	35
References	37
3 Pose Measurement	41
3.1 Introduction	41
3.2 Theory	43
3.3 Experiments	49
3.4 Discussion	56
3.5 Conclusions and Future Work	58
References	59

4	Straight and Helical Core Fibers	63
4.1	Introduction	64
4.2	Theoretical Background	65
4.3	Experiments and Results	69
4.4	Conclusions	75
4.5	Appendix	76
	References	78
III	Application Studies	81
5	Catheter Tracking	83
5.1	Introduction	83
5.2	Shape Sensing Using Fiber Bragg Gratings	86
5.3	Ultrasound Tracking Algorithm	88
5.4	Sensor Fusion Algorithm	93
5.5	Experiments	97
5.6	Conclusions	101
	References	103
6	Force Estimation	107
6.1	Introduction	107
6.2	Shape Reconstruction	110
6.3	Rigid Link Model	111
6.4	Cosserat Model	115
6.5	Experiments and Results	117
6.6	Conclusions	120
	References	121
IV	Outlook	125
7	Conclusions	127
7.1	Discussion and Future Work	127
7.2	Scientific Disseminations	131
	Acknowledgments	133
	Curriculum Vitae	135

Part I

Introduction

The research presented in this thesis is focused on utilizing fiber Bragg grating (FBG) sensors to acquire shape and pose measurements of flexible medical instruments such as catheters. These sensors are well suited for medical applications due to their size, flexibility and immunity to electromagnetic interference. This part of the thesis places the research within the relevant literature and clinical practice. Moreover, it presents the motivation and contributions of the research.