

DISS. ETH NO. 23793

Assistive Robots for Minimally Invasive Ophthalmic Surgery

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences of ETH Zurich

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Franziska Ullrich

M.Sc. in Robotics, Systems and Control, ETH Zurich

born on March 7, 1987

Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Bradley J. Nelson, examiner,
Prof. Stephan Michels, co-examiner,
Prof. Christos Bergeles, co-examiner

2016

Abstract

Age-related visual loss and ageing demographics account for a large impact on societal health costs on a global scale. Efficient ophthalmic surgeries must be precise, safe, and fast and thus, require the surgeon to be highly dexterous and experienced as the small forces applied to the delicate structures in the eye lie below the human force perception limit. To overcome these limitations current research focuses on robotic systems to assist in minimally invasive surgery due to their high precision, stability, and dexterity. Moreover, drug delivery to the posterior segment of the eye presents further challenges and limitations due to the quick systemic absorption of drugs. Thus, drug delivery to the posterior eye requires high dosages of medication, which is commonly delivered intravenously or by intravitreal administration.

This thesis explores several robot-assisted systems for minimally invasive ophthalmic surgery. It focuses on the development of several untethered and tethered systems that can provide treatment for ocular diseases, such as cataract, age-related macular degeneration, or vitreous floaters. The treatment methods can be divided into two categories, which consist of drug delivery applications and mechanical surgical interventions inside the eye. Furthermore, the presented robotic devices are either designed for treatment in the anterior or the posterior eye segment, and thus, require different design and actuation specifications. The first robotic platform consists of magnetically guided intravitreal microrobots of different shapes for targeted drug delivery or manipulation of vitreous floaters. The second system combines magnetic and mechanical actuation to control a flexible catheter with a customised diathermy tool for capsulorhexis, an essential step in cataract surgery. A robotic system is demonstrated that pivots around a single point for manipulation of tools inside the eye with minimum shear forces applied to the sclera during surgery. The fourth robotic system automatically injects medication into the vitreous of the eye for the

safe and efficient treatment of age-related macular degeneration. The systems presented in this thesis combine the advantages and safety of minimally invasive robotic surgery with the precision of magnetically guided surgical tools for ophthalmic surgery. All of the systems can be remotely controlled and monitored by a physician, while overcoming spatial constraints and facilitating physician-patient interaction during surgery.

Zusammenfassung

Die finanzielle Belastung des Gesundheitssystems durch Sehschwächen und Sehbehinderungen sind groß. Ophthalmologische Eingriffe müssen möglichst schnell, mit hoher Sicherheit und Präzision erfolgen. Da die bei Operationen am Auge wirksamen Kräfte oft kleiner als das menschliche Wahrnehmungslimit sind, muss der Chirurg viel Erfahrung und Fingerfertigkeit mitbringen. Mit Hilfe robotischer Hilfstechnologien können mögliche Probleme vermindert beziehungsweise sogar verhindert werden und erlauben es, sichere und hochpräzise Operationen durchzuführen. Weiterhin wird die Wirkstoffabgabe aufgrund der rapiden systemischen Absorption von Arzneimitteln erschwert. Daher erfordert die Medikamentenabgabe im hinteren Augensegment eine hohe Wirkstoffdosis, welche allgemein intravenös oder intravitreal verabreicht wird.

Das Ziel dieser Dissertation ist es, verschiedene robotische Systeme für die minimal invasive Augen Chirurgie zu erkunden, und konzentriert sich auf die Entwicklung von medizinischen Robotern zur Behandlung von Augenkrankheiten, wie zum Beispiel Katarakt, altersbedingter Makuladegeneration oder Floater im Glaskörper. Die Behandlungsverfahren können in zwei Kategorien unterteilt werden, die der Arzneimittelabgabe und mechanische Eingriffe im Auginnenen. Weiterhin werden die hier vorgestellten Systeme entweder für die Behandlung in der vorderen oder der hinteren Augenkammer entwickelt und erfordern daher unterschiedliche Spezifikationen. Die erste vorgestellte Roboterplattform besteht aus magnetisch gesteuerten kabellosen Mikrorobotern zur gezielten Wirkstoffabgabe im Inneren des Auges und zur Manipulation von Floatern. Zur automatisierten Kapsulorhexis, einem essentiellen Schritt der Kataraktchirurgie, wurde ein magnetisch-mechanisch angetriebenes System mit flexiblem Körper und magnetischer Spitze entwickelt. Ein anderes Robotersystem rotiert um einen einzigen Punkt, um Werkzeuge im Auge zu bewegen und gleichzeitig die Scherkräfte, die auf die Lederhaut des Auges wirken, auf

ein Minimum reduziert. Das vierte hier vorgestellte System wurde zur automatisierten intravitrealen Injektion von Medikamenten entwickelt, um die Behandlung von altersbedingter Makuladegeneration effizient und sicher zu gestalten. Alle in dieser Dissertation vorgestellten Systeme vereinen die Vorteile und Sicherheit von minimal invasiven robotergestützten Operationen mit der Genauigkeit magnetisch gesteuerter Werkzeuge. Die dargestellten Roboter erlauben es, ophthalmische Operationen aus der Distanz fernzusteuern und zu überwachen.