

DISS. ETH NO. 19250

**5-DOF Wireless Micromanipulation Using
Soft-Magnetic Core Electromagnets**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Michael Philipp Kummer

Dipl. Masch.-Ing. ETH

Born on March 5, 1979

Citizen of Etziken, SO

accepted on the recommendation of

Prof. Bradley J. Nelson, examiner

Prof. Jake J. Abbott, co-examiner

2010

Abstract

Roughly twenty years ago minimally invasive surgery brought a paradigm shift to traditional medicine. Today microrobotics seems to hold all required building blocks to further reduce surgical invasiveness. Conceivably, functionalized microrobots could navigate the various fluid filled lumina in the human body, e.g. the blood circulatory system, to perform a new set of minimally invasive procedures. One area of interventions where the use of microrobots is feasible in the shorter term is vitreoretinal surgery, as the eye offers a direct line of sight and simplifies the problem of localizing an injected microrobot. In order to enable this vision to become reality, an appropriate control system that will allow surgeons to precisely steer micro devices inside the eye is needed.

This dissertation presents the development of a control strategy for five-degree-of-freedom wireless, electromagnetic control of fully untethered microscopic devices. The control strategy is based on the assumption that nonuniform field contributions of core-filled electromagnets in a system can be linearly superimposed, if high-performance soft-magnetic cores are used within their linear magnetization region, and the respective field contributions are calculated/calibrated *in situ*. To validate this assumption a prototype system called **OctoMag** was built. System characterization has validated the underlying assumption. In a range of open- and closed-loop experiments with soft- and hard-magnetic devices, an unprecedented level of wireless control has been demonstrated. **OctoMag** imposes no limitation on its actuated degrees-of-freedom within its workspace.

Since **OctoMag** was designed with ophthalmic surgery in mind, a recipe for an artificial vitreous humor, the substance spanning the posterior cavity of the eye, to be used as experimental testbed was developed within the scope of this dissertation. The properties of this tunable testbed were determined through the use of rheometric analysis. Experimental results of **OctoMag**'s performance in this artificial environment are presented.

To demonstrate the usefulness of the developed controller beyond the field of medicine, a second system was conceptualized within the scope of this dissertation. **MiniMag** is a scaled down version of **OctoMag** intended to be used as a micromanipulation instrument under light or fluorescence microscopes. Altered system requirements resulted in geometry and electromagnet redesign which led to a tabletop system with small footprint. **MiniMag** was characterized analogously to **OctoMag** and its open- and closed-loop performance were investigated.

Zusammenfassung

Vor rund zwanzig Jahren hat die minimal-invasive Chirurgie ein Paradigmenwechsel in der herkömmlichen Chirurgie herbeigeführt. Heutzutage scheint Bio-Mikrorobotik im Besitz der notwendigen Bausteine zu sein um das Trauma in chirurgischen Eingriffen weiter zu reduzieren. In diesem Szenario sieht man funktionalisierte Mikroroboter vor, welche durch die flüssikeisgefüllten Lumina des Körpers, z.B. dem Blutkreislauf, gesteuert werden um neue, minimal-invasive Eingriffe durchzuführen. Ein Fachgebiet mit grossem Potential für baldigen Einsatz von Mikrorobotern ist die Netzhautchirurgie. Das Auge bietet die Möglichkeit der externen Einsicht was die Lokalisierung eines eingespritzten Mikroroboters erleichtert. Um diese Vision zu verwirklichen bedarf es der Entwicklung eines Steuerungssystems, welches die präzise Steuerung des Mikroroboters im Auge ermöglicht.

Diese Doktorarbeit präsentiert die Entwicklung einer Regelstrategie für die elektromagnetische Fernsteuerung von ungebundenen Mikrorobotern in fünf Freiheitsgraden. Diese Regelstrategie beruht auf der Annahme, dass inhomogene Feldbeiträge von Elektromagneten in einem System linear überlagert werden können, falls leistungsstarke weichmagnetische Kerne in deren linearem Magnetisierungsbereich verwendet werden, und die entsprechenden Feldbeiträge *in situ* berechnet/kalibriert wurden. Zur Validierung dieser Regelstrategie wurde ein System namens **OctoMag** entwickelt. Die Systemcharakterisierung hat die getroffenen Annahmen validiert und eine Reihe von Experimenten mit und ohne Signlrückführung haben die erstmalige, uneingeschränkte Steuerung der betriebenen Rotationsfreiheitsgrade belegt.

Da **OctoMags** vorgesehener Einsatzbereich die Netzhautchirurgie ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Rezeptur entwickelt, welche das Herstellen einer Testsubstanz mit definierten rheologischen Eigenschaften ermöglicht. Die Substanz, deren Eigenschaften mit rheologischen Messungen ermittelt wurden, simuliert den Glaskörper des Auges.

Um die Vielfältigkeit der entwickelten Regelstrategie zu demonstrieren, wurde ein zweites System entworfen, dessen Einsatzgebiet ausserhalb der Medizin liegt. **MiniMag** ist eine runterskalierte Version von **OctoMag**, die zur Handhabung von mikroskopischen Objekten unter einem Licht- oder Fluoreszenzmikroskop vorgesehen ist. Veränderte Systemansprüche haben zu einer neuen Systemgeometrie und der Neukonstruktion der Elektromagnete geführt. **MiniMag** wurde analog zu **OctoMag** charakterisiert und die Funktion des Systems wurde in Experimenten mit und ohne Signlrückführung untersucht.