

Diss. ETH No. 19529

**Modeling and Analysis of the
Magnetization, Torque and Dynamics of
Untethered Soft-Magnetic Microrobots**

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences ETH

presented by
ZOLTÁN GYÖRGY NAGY
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born 16 September 1980
citizen of Luxembourg

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Bradley J. Nelson, examiner
PD. Dr. ir. habil. Remco I. Leine, co-examiner

2011

Abstract

Untethered microrobots, that is, autonomous mobile devices with principle dimensions in the sub-millimeter range, can provide a means for advanced diagnostic and therapeutic procedures inside the human body. To power and drive such microrobots wirelessly, externally applied magnetic fields are seen most promising due to their long range. Several methods have been proposed for actuation, classic pulling with magnetic field gradients, bio-inspired cork-screw type motion, or more ingenious methods involving stick/slip behavior on a surface or impact driven propulsion. This thesis investigates two types of untethered soft-magnetic microrobots. One is assembled from multiple individual planar shapes. In an applied field their magnetization may interact and produce a complex behavior, unpredictable by current methods. Here, we propose a method to compute their magnetization faster than the standard method, while still yielding precisely the same results. In addition, the proposed description allows for the semi-analytical treatment of the magnetization to gain further insight. This description is then used to investigate the resulting torque on assembled shapes, and we show that linear superposition holds well. Second, we introduce non-smooth multi-body dynamics to describe the complex motion of microrobots involving stiction, sliding and impact. Because of the low mass and, thus, high resonant frequencies, it is extremely difficult to analyze these motions experimentally, and numerical solutions are required for analysis. We apply the theory to the Wireless Resonant Magnetic Microactuator and integrate its non-smooth and non-linear equations of motion numerically using Moreau's mid-point integration scheme. Our results are qualitatively consistent with experimental results, and predict several non-intuitive phenomena, such as switching of the direction of the velocity with changing excitation frequency. This thesis provides the reader with practical knowledge on how a particular magnetic device will behave in magnetic fields and field gradients. From an engineering perspective, we provide methods and results that help develop intuition and which guide during the design and actuation of complex untethered soft-magnetic microrobots.

Zusammenfassung

Ungebundene Mikroroboter, d.h. Roboter deren Hauptmasse im Submillimeter Bereich liegen, können neuartige Möglichkeiten für medizinische Diagnose und Eingriffe im menschlichen Körper bieten. Wegen ihrer grossen Reichweite scheinen von aussen angelegte Magnetfelder sehr erfolgsversprechend um solchen Robotern kabellos Energie zuzuführen oder sie zu steuern. Mehrere Methoden für solche Antriebe wurden bereits vorgeschlagen: klassisches Ziehen mit magnetischen Feldgradienten, von biologischen Systemen inspirierte Korkenzieher-ähnliche Fortbewegung, aber auch ausgeklügeltere Methoden basierend auf Haft/Gleit Übergänge auf einer Oberfläche oder Fortbewegung basierend auf Stössen. Die vorliegende Arbeit untersucht zwei Arten von ungebundenen weichmagnetischen Mikrorobotern. Einerseits, solche die aus mehreren planaren Formen zusammengesetzt werden. Im angelegten Magnetfeld kann deren Magnetisierung interagieren und ein komplexes Verhalten erzeugen, was durch vorhandene Methoden nicht vorhersagbar ist. Hier wird zunächst eine Methode vorgeschlagen um die Magnetisierung einer einzelnen Form schneller zu berechnen als mit der Standardmethode, während gleichzeitig das gleiche Ergebnis erreicht wird. Zusätzlich erlaubt die vorgeschlagene Beschreibung lineares und gesättigtes Verhalten analytisch mit einer einzigen Formel zu betrachten. Diese Beschreibung wird dann verwendet um das magnetische Moment, das auf die zusammengesetzte Formen wirkt zu untersuchen, und wir zeigen dass die Annahme von linearer Superposition vernünftig ist. Zweitens wird die komplexe Fortbewegung von Mikrorobotern basierend auf Haften, Gleiten und Stössen mit nicht-glatte Mehrkörperdynamik beschrieben. Wegen den kleinen Massen und die daraus resultierend grossen Resonanzfrequenzen ist es praktisch unmöglich diese Bewegungen experimentell zu untersuchen, und numerische Lösungen bieten die einzige Möglichkeit für die Analyse. Die Theorie wird auf den *Wireless Resonant Magnetic Microactuator* angewandt und die nicht-glatte und nicht-lineare Bewegungsgleichungen werden basierend auf Moreau's Mittelpunkt Integrationsschema numerisch integriert. Die Resultate sind qualitativ konsistent mit experimentellen Beobachtungen und sagen mehrere nicht intuitive Verhalten, wie z.B. das Wechseln der Geschwindigkeitsrichtung mit wechselnder Anregungsfrequenz, vorher. Im Allgemeinen bietet die vorliegende Arbeit dem Leser praktisches Wissen wie sich ein magnetischer Mikroroboter in Magnetfeldern und Magnetfeldgradienten verhalten wird. Der ingenieur-mässige Ansatz bietet Verfahren und Resultate um Intuition für Auslegung und Aktuierung von komplexen ungebundenen weichmagnetischen Mikrorobotern aufzubauen.