


Advanced Miniature Soft Robotic Systems

Doctoral Thesis

Author(s):

Wang, Tianlu 

Publication date:

2022

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000590564>

DISS. ETH NO. 28888

ADVANCED MINIATURE SOFT ROBOTIC SYSTEMS

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Tianlu Wang

Master of Science ETH in Robotics, Systems and Control, ETH Zurich

born on 03 September 1992

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Metin Sitti, MPI-IS & ETH Zurich, supervisor & examiner

Prof. Dr. Xiaoguang Dong, Vanderbilt University, second advisor & co-examiner

Prof. Dr. Robert K. Katzschmann, ETH Zurich, co-examiner

2022

ABSTRACT

Miniature soft robots have shown unprecedented safe access in the hard-to-reach complex regions of nature, given their small dimensions and compliance by design. These machines are thus promising for novel biomedical applications, environmental stewardship, and beyond. While various miniature soft robots have been demonstrated, high-performance miniature soft robotic systems for task-oriented locomotions and functions have not been properly achieved. Particularly, the development of systems for task-oriented locomotions and functions is insufficient. Moreover, the improvement of these systems for fast and energy-efficient locomotions and multiple functions is unavailable. These challenges restrain the potential real-world translations of this unique robotic group.

To this end, task-oriented locomotions and functions were addressed by properly developing the miniature soft robotic systems, including robot bodies and relevant systems. First, we addressed the challenge of designing bistable anchoring devices in tubular structures and the corresponding reliable medical imaging-based control system. While the stable anchoring state enables the robot to withstand the peristaltic forces in tubular structures for local functions, the stable relaxation state allows the manipulation of robot locomotion. Moreover, effective robot tracking utilizing medical imaging is necessary to deploy medical devices safely. In this study, the magnetic soft millirobot and actuation system were chosen, given their wireless controllability and the realization of the bistable states. Moreover, ultrasound imaging, known for its non-ionization principle, portability, and real-time imaging capability, was integrated into the control system for the robot's robust tracking and closed-loop manipulation. The effectiveness of the system has been validated experimentally. The proposed tracking method could also be extrapolated to other miniature soft robots for potential medical functions.

While focusing on tubular structures, we further explored the design of millirobotic structures and their accompanying spatial actuation system for the regions with dynamic flow. Such a new intervention paradigm is critical given the various devastating diseases around distal neural arteries and the difficult conventional catheter-based access. The wireless soft millirobot was designed to be stent-shaped for its adaptability, low fluidic drag feature, and maneuverability in the lumen with the flow. Supported by controlled interactions with the solid boundaries, various locomotion capabilities were enabled and evaluated, such as the retrievable shape-adaptive locomotion for varying lumen diameters, self-anchoring to withstand the flow, curved route, and branch traversing. On top of the design, two potential medical functions were incorporated, i.e., flow diversion and on-demand local drug delivery by the remote heating of the SMP-based foldable structures. This new

distal intervention paradigm has been compared with the conventional approach in the phantoms emulating the distal arterial regions and showed advantages in accessibility, interaction forces, delivered drug dosage, and adjustability.

Based on the knowledge of developing task-oriented miniature soft systems, we then investigated how to further improve the performances for fast and energy-efficient locomotions and multiple functions. Fast and energy-efficient undulatory propulsion, one of the most widely spread locomotion modes, is critical for long-term operations. Although numerous studies have focused on the inertial flow regime, the intermediate flow regime was not well studied due to the lack of effective robotic tools. Therefore, we designed a class of untethered undulatory milliswimmers and magnetic actuation systems with the advantage of wireless operation without the negative effect of driving cables on hydrodynamics. By experimentally optimizing the body stiffness distributions (k) and actuation signals, we have emulated critical features of morphology, body kinematics, and wake flow patterns as larval zebrafish at both dimension and time scales using the novel robotic platform. The effect of k was systematically studied, and results revealed that combining high frequency and uniform k is energy-beneficial. On top of the knowledge, the shape memory polymer (SMP)-integrated wireless swimmer capable of adjusting k on the fly was further evaluated and confirmed the conclusions. Besides its impact on the autonomous underwater robot, this study could inspire wireless medical devices for targeted cargo delivery.

While maintaining the high-performance propulsion, we explored the mechanism for multi-functionalities, which could be beneficial for various real-world tasks, in the final part of this thesis. Inspired by jellyfish's energy-efficient locomotion and contactless object manipulation, we developed a jellyfish-like robotic platform via an optimized synergy of electrohydraulic actuators and a hybrid structure comprising both rigid and soft components. As a result, the robot could propel fast, efficiently, and silently, which could accomplish possible safe interactions with the underwater species. Moreover, multiple functions were realized, such as contact-based and contactless object manipulation, fluidic mixing, shape adaptation, and steering. On top of a single robot, multiple agents could be individually controlled and form a team to enhance object manipulation. Finally, a wireless prototype, with all control electronics and batteries onboard, was developed and tested outdoors, indicating the potential feasibility of such compact miniature robotic systems for future field operations.

ZUSAMMENFASSUNG

Miniatur-Softroboter haben angesichts ihrer geringen Abmessungen und ihrer Konformität durch Design einen beispiellosen sicheren Zugang in die schwer zugänglichen komplexen Regionen der Natur gezeigt. Diese Maschinen sind daher vielversprechend für neuartige biomedizinische Anwendungen, Umweltschutz und darüber hinaus. Während vielseitige Miniatur-Softroboter demonstriert wurden, wurden hochleistungsfähige Miniatur-Softrobotersysteme für aufgabenorientierte Fortbewegungen und Funktionen nicht richtig erreicht. Insbesondere die Entwicklung von Systemen für aufgabenorientierte Fortbewegung und Funktionen ist unzureichend. Darüber hinaus ist die Verbesserung dieser Systeme für schnelle und energieeffiziente Fortbewegung und Mehrfachfunktionen nicht verfügbar. Diese Herausforderungen schränken die potenziellen Übersetzungen dieser einzigartigen Robotergruppe in die reale Welt ein.

Zu diesem Zweck wurden aufgabenorientierte Fortbewegungen und Funktionen angegangen, indem die Miniatur-Softrobotersysteme, einschließlich Roboterkörper und relevante Systeme, richtig entwickelt wurden. Zunächst haben wir uns der Herausforderung gestellt, bistabile Verankerungsvorrichtungen in röhrenförmigen Strukturen und das entsprechende zuverlässige, auf medizinischer Bildgebung basierende Steuersystem zu entwerfen. Während der stabile Verankerungszustand es dem Roboter ermöglicht, den peristaltischen Kräften in röhrenförmigen Strukturen für lokale Funktionen zu widerstehen, ermöglicht der stabile Entspannungszustand die Manipulation der Fortbewegung des Roboters. Darüber hinaus ist eine effektive Roboterverfolgung unter Verwendung medizinischer Bildgebung erforderlich, um medizinische Geräte sicher einzusetzen. In dieser Studie wurden der magnetische Soft-Milliroboter und das Betätigungssystem aufgrund ihrer drahtlosen Steuerbarkeit und der Realisierung der bistabilen Zustände ausgewählt. Darüber hinaus wurde die Ultraschallbildgebung, die für ihr Nichtionisationsprinzip, ihre Tragbarkeit und ihre Echtzeit-Bildgebungsfähigkeit bekannt ist, in das Steuersystem für die robuste Verfolgung und Manipulation des Roboters integriert. Die Wirksamkeit des Systems wurde experimentell validiert. Das vorgeschlagene Tracking-Verfahren könnte auch auf andere Miniatur-Softroboter für potenzielle medizinische Funktionen extrapoliert werden.

Während wir uns auf röhrenförmige Strukturen konzentrierten, untersuchten wir das Design von millirobotischen Strukturen und ihrem begleitenden räumlichen Betätigungssystem für die Regionen mit dynamischem Fluss weiter. Ein solches neues Interventionsparadigma ist angesichts der verschiedenen verheerenden Erkrankungen um distale Neuralarterien und des schwierigen konventionellen kateterbasierten Zugangs von entscheidender Bedeutung. Der drahtlose Soft-Millirobot

wurde aufgrund seiner Anpassungsfähigkeit, seines geringen Flüssigkeitswiderstands und seiner Manövrierfähigkeit im Lumen mit dem Fluss stentförmig gestaltet. Unterstützt durch kontrollierte Interaktionen mit den festen Grenzen wurden verschiedene Fortbewegungsfähigkeiten aktiviert und bewertet, wie z. B. die abrufbare formadaptive Fortbewegung für unterschiedliche Lumendurchmesser, Selbstverankerung, um dem Fluss standzuhalten, gekrümmte Route und Verzweigungsüberquerung. Zusätzlich zum Design wurden zwei potenzielle medizinische Funktionen integriert, d. h. Flussumleitung und lokale Arzneimittelabgabe nach Bedarf durch die Fernheizung der SMP-basierten faltbaren Strukturen. Dieses neue Paradigma der distalen Intervention wurde mit dem konventionellen Ansatz in den Phantomen verglichen, die die distalen Arterienregionen emulieren, und zeigte Vorteile in Bezug auf Zugänglichkeit, Interaktionskräfte, verabreichte Medikamentendosierung und Einstellbarkeit.

Basierend auf dem Wissen über die Entwicklung aufgabenorientierter Miniatur-Softsysteme untersuchten wir dann, wie die Leistungen für schnelle und energieeffiziente Fortbewegungen und Mehrfachfunktionen weiter verbessert werden können. Der schnelle und energieeffiziente wellenförmige Antrieb, eine der am weitesten verbreiteten Fortbewegungsarten, ist für den langfristigen Betrieb von entscheidender Bedeutung. Obwohl sich zahlreiche Studien auf das Trägheitsströmungsregime konzentriert haben, wurde das Zwischenströmungsregime aufgrund des Mangels an effektiven Roboterwerkzeugen nicht gut untersucht. Daher haben wir eine Klasse von ungebundenen wellenförmigen Millischwimmern und magnetischen Betätigungssystemen mit dem Vorteil des drahtlosen Betriebs ohne die negativen Auswirkungen von Antriebskabeln auf die Hydrodynamik entwickelt. Durch die experimentelle Optimierung der Körpersteifigkeitsverteilungen (k) und Betätigungssignale haben wir mithilfe der neuartigen Roboterplattform kritische Merkmale der Morphologie, Körperkinematik und Nachlaufströmungsmuster als Zebrafischlarven sowohl auf Dimensions- als auch auf Zeitskalen emuliert. Die Wirkung von k wurde systematisch untersucht, und die Ergebnisse zeigten, dass die Kombination von hoher Frequenz und einheitlichem k energetisch vorteilhaft ist. Zusätzlich zu den Erkenntnissen wurde der drahtlose Schwimmer mit integriertem Formgedächtnispolymer (SMP), der in der Lage ist, k on the fly anzupassen, weiter evaluiert und die Schlussfolgerungen bestätigt. Abgesehen von ihren Auswirkungen auf den autonomen Unterwasserroboter könnte diese Studie drahtlose medizinische Geräte für die gezielte Frachtlieferung inspirieren.

Unter Beibehaltung des Hochleistungsantriebs untersuchten wir im letzten Teil dieser Arbeit den Mechanismus für Multifunktionalitäten, die für verschiedene reale Aufgaben von Vorteil sein könnten. Inspiriert von der energieeffizienten Fortbewegung und berührungslosen Objektmanipulation von Quallen haben wir eine quallenähnliche Roboterplattform über eine optimierte Synergie aus elektrohydraulischen Aktuatoren und einer Hybridstruktur aus starren und weichen Komponenten entwickelt. Infolgedessen könnte der Roboter schnell, effizient und geräuschlos

vorantreiben, was mögliche sichere Interaktionen mit den Unterwasserarten ermöglichen könnte. Darüber hinaus wurden mehrere Funktionen realisiert, wie z. B. kontaktbasierte und kontaktlose Objektmanipulation, fluidisches Mischen, Formanpassung und Steuerung. Zusätzlich zu einem einzelnen Roboter könnten mehrere Agenten individuell gesteuert werden und ein Team bilden, um die Objektmanipulation zu verbessern. Schließlich wurde ein drahtloser Prototyp mit der gesamten Steuerelektronik und den Batterien an Bord entwickelt und im Freien getestet, was die potenzielle Machbarkeit solcher kompakter Miniatur-Robotersysteme für zukünftige Feldeinsätze aufzeigt.