Untethered micro-robots integrated with stimuli-responsive hydrogel for sensing external environment

July 2021

Koki Yoshida

A Thesis for the Degree of Ph.D. in Engineering

Untethered micro-robots integrated with stimuli-responsive hydrogel for sensing external environment

July 2021

Graduate School of Science and Technology
Keio University

Koki Yoshida

別表５　(様式甲 3)
(3)

主　論　文　要　旨

No.1

報告番号	(甲) 第　　号	氏　名	吉田　光輝

主 論 文 題 名：
Untethered micro-robots integrated with stimuli-responsive hydrogel for sensing external environment
(外部環境検知のための非拘束型刺激応答性ハイドロゲルマイクロロボット)

非拘束型マイクロロボットは数ミクロンから数ミリスケールの物理的拘束のないロボットである．外部環境を検知することで環境探査や体内治療を行うことが可能なマイクロロボットの実現に向けた研究が盛んに行われている．しかしながら，従来のセンサやアクチュエータ，情報処理機能を微小なシステムに集積統合することは技術的に課題が多く困難である．そこで，新たなマイクロロボットの構成要素として刺激応答性ゲルに着目した．刺激応答性ゲルは外部刺激に応じて膨潤収縮する特性を持つため，アクチュエータやセンサとしてマイクロロボットの構成要素に利用することが期待できる．本研究では 2 種類の外部環境検知に向けた非拘束型刺激応答性ハイドロゲルマイクロロボットを提案した．具体的には，螺旋状のマイクロ構造に刺激応答性ゲルをパターニングすることで，環境温度に応じて推進速度を自律的に制御することが可能なマイクロロボットを実現した．次に，コロイド結晶構造色ハイドロゲルをマイクロロボットに統合することで，温度やエタノール濃度などの外部刺激を可視光の色変化として伝達可能なマイクロロボットを実現した．

第 1 章では，本研究の背景および研究目的について概説した．

第 2 章では，本研究で用いる刺激応答性ゲルの架橋原理および膨潤収縮原理について述べた．

第 3 章では，外部環境に応じて推進速度を自律的に制御可能な螺旋状マイクロロボットの研究背景について概説した．次に，螺旋状マイクロロボットの形状と推進速度の関係について流体力学的な理論による考察を示した．また，非対称ゲル化手法を応用してピッチ角の異なる螺旋状マイクロロボットが構築可能であることを示した．さらに，螺旋状マイクロロボットのピッチ角を変化させることによって推進速度が制御可能であることを実験的に明らかにした．

第 4 章では，有限要素法シミュレーションを用いて螺旋状ゲルの変形について解析した．実測したハイドロゲルのヤング率と熱収縮率を用いて，二層状の刺激応答性ゲルの変形特性をシミュレーションと実験により比較し，シミュレーションの妥当性を評価した．この結果をもとに，刺激応答性ゲルのパターンに基づく螺旋状マイクロロボットの変形挙動の変化を解析した．さらに解析した変形結果をもとに螺旋状マイクロロボットの推進変化を解析し，刺激応答性ゲルのパターンを決定した．

第 5 章では，螺旋状マイクロロボットの自律的な推進速度制御について述べた．刺激応答性ゲルをパターンした螺旋状マイクロロボットの外部刺激に応じた螺旋形状の変形を達成した．さらに，螺旋形状の変形によるマイクロロボットの加速および減速に成功した．

第 6 章では，コロイド結晶構造色ハイドロゲルを統合したマイクロロボットの背景，理論，実験手法および結果について述べた．マイクロロボットに統合したコロイド結晶構造色ハイドロゲルの温度およびエタノール濃度に応じた色変化に成功した．この結果より，外部環境の情報をマイクロロボットによって提示可能であることを示した．

第 7 章では，本研究の結論および今後の課題について述べた．

別表６
（３）

（様式甲 4）
Keio University

Thesis Abstract

No.

Registration Number	・ “KOU”　□ “OTSU” No.　*Office use only	Name	YOSHIDA, Koki

Thesis Title

Untethered micro-robots integrated with stimuli-responsive hydrogel for sensing external environment

Untethered micro-robots are sub-micron to centimeter scale robots without any physical restraint, and show great potential through sensing external environments for exploration of environments and *in vivo* treatment. However, there are many technical obstacles in the integration of conventional sensors, actuators, and processors into small-scale systems. Stimuli-responsive hydrogels, that can change their volume responding to external stimuli, are attractive candidates for novel components of micro-robots including actuators and sensors. In this research, two types of untethered micro-robots integrated with stimuli-responsive hydrogel were proposed for sensing the external environment. Specifically, by patterning stimuli-responsive hydrogels on the spiral-shaped microstructure, micro-robots with autonomous propulsion velocity control responding to the environmental temperature were realized. Furthermore, by integrating photonic colloidal crystal hydrogel into micro-robots, micro-robots that can convert the external temperature or the ethanol concentration into visible-light wavelength change were achieved.

Chapter 1 describes the background and the purpose of this research.

Chapter 2 describes the characteristics of stimuli-responsive hydrogels including the cross-linking mechanism and the volume change mechanism.

Chapter 3 theoretically analyzes the relationship between the geometry and the propulsion velocity based on the fluid dynamics. Then, the spiral-shaped micro-swimmers with different pitch angles were successfully fabricated by using the buoyancy-assisted anisotropic gelation methods. Furthermore, it is experimentally confirmed that the propulsion velocity of these spiral-shaped micro-swimmers were able to controlled by the pitch angle change.

Chapter 4 describes the analysis of deformation behavior of micro-swimmers by the finite element simulation. It is revealed that the deformation behavior was changed by changing the pattern of hydrogel. Based on the simulation results, the propulsion velocity change was calculated.

Chapter 5 describes the autonomous propulsion velocity control of spiral-shaped micro-swimmers. The deformation of the micro-swimmers responding to the environmental temperature was succeeded. Furthermore, the acceleration and the deceleration were also achieved.

Chapter 6 describes the micro-robots integrated with the photonic colloidal crystal hydrogel. The visible-light wavelength change responding to the environmental temperature or the ethanol concentration was achieved. Based on the results, it is showed that information about the external environment can be presented though the micro-robots.

Chapter 7 concludes this dissertation by discussing the impact of the proposed micro-robots integrated with stimuli-responsive hydrogel.