

# 論文内容要旨 (和文)

平成28年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 SHIBLEE MD Nahin Islam 

論文題目 Development of 3D Printable Shape Memory Hydrogels and Their Applications to Soft Robotics (3Dプリンタブルな形状記憶ヒドロゲルの開発とそのソフトロボティクスへの応用)

ヒドロゲルのようなソフト材料は、工学分野において特殊な成形方法や設計性を必要とする。形状記憶ヒドロゲル (SMG) のようなスマートなヒドロゲルは、積層造形法または3Dプリントと呼ばれるプログラムが可能な制作工程によるソフトロボット作製において、優れた材料である。本研究では、3Dプリント技術を用いて機械的特性が調整可能なSMGを作製し、ソフトロボット機能を備えたヒドロゲルアクチュエータを開発するために4Dプリントの概念を利用することを試みた。

本論文は、下記の5章より構成されており、要旨は以下の通りである。

第1章では、序論としてスマート高分子ゲル、3Dプリンティング、ソフトロボティクスについてと本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、改良した光学式3Dゲルプリンタを使用して、高強度熱応答性ポリマー (ジメチルアクリルアミド・ステアリルアクリレートおよびラウリルアクリレート) (PDMAAm-co-SAおよびLA) ベースの形状記憶ゲル (SMG) を開発した。この作製方法は、様々な形状およびサイズを有するSMGの迅速かつモールドレスな作製を可能にした。また、構成モノマーの組成を変えることによって、調整可能な機械強度、熱、光学および膨潤特性を有する多種多様なSMGが得られた。アクリレートモノマー (SAおよびLA) 含有量を変えたとき、優れた固定性と回復率をもつ3DプリントしたSMGは室温で広範囲のヤング率0.04MPa - 17.35MPaと、ひずみ612% - 2363%を示した。そしてこれらのゲルは高温では大きいひずみを持つことを示した。SMGの熱重量分析 (TGA) は、水蒸発のための初期質量損失後の組成にかかわらず、一段階の分解ピーク (407°C ~ 417°C) を示す。動的機械分析 (DMA) および示差走査熱量測定 (DSC) は、SAおよびLA含有量に対応した可変転移温度 (29°C ~ 49.5°C) を示した。SMGは、全ての組成物において、水および異なる有機溶媒中で様々な膨潤度と高い透明性を有し、眼内レンズの範囲内の屈折率値を示し、光学分野での応用が期待されることを示した。自由成形性およびその他の物性が調整可能な3DプリントしたSMGのこれらの特有の性質は、生物医学、ロボット工学およびセンシングなどの様々な分野において急速に需要を生み出すことが期待される。

第3章では、3Dプリントを使用して形状記憶ヒドロゲル (SMG) ベースの二層構造のヒドロゲル

ルを作製し、膨潤と熱に応答するソフトアクチュエータを実現するための新しい方法を提案した。二層の各層は、SMGのネットワーク内で異なる濃度の結晶性モノマーSAを有するポリマー（*N,N*-ジメチルアクリルアミド-ステアリルアクリレート）（P（DMAAm-SA））ベースのヒドロゲルからなり、特有の性質を示す。それは可逆的形狀記憶特性を有する二層の異方性膨潤によるアクチュエータの制御を可能にする物理化学的特性である。この二層構造であるアクチュエータの変形、可逆性、および応答時間は、温度に大きく依存することを示した。そして相乗的に機能が作動するように設計されたSMGの二層アクチュエータモデルを利用して、水中に浸漬することで花の形状であるSMGが膨潤することで自然に対象の物質を掴み、輸送し、放出することができる水中3Dマクロソフトグリッパーを開発した。これは生物模倣アクチュエータ、カプセル化システム、ソフトロボティクスへの応用が期待される。

第4章では、本論文の総括として、SMGの3Dプリントがソフトロボティクスのための新規材料および成形方法として優れていること述べた。

第5章では、本論文の参考文献を記述した。

# 論文内容要旨 (英文)

平成28年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 SHIBLEE MD Nahin Islam



論文題目 Development of 3D Printable Shape Memory Hydrogels and Their Applications to Soft Robotics

Soft materials like hydrogels require facile fabrication and designability for task-specific implementation in engineering field. Smart hydrogel materials like Shape memory hydrogels (SMGs) is an excellent candidate for creating soft robot through programmable fabrication processes called additive manufacturing or 3D printing.

In this study, I attempt to fabricate SMGs with tunable mechanical properties with 3D printing process and utilize 4D printing concept for developing untethered hydrogel actuators with soft robotic functions.

In chapter 2, I developed highly robust thermoresponsive poly (dimethyl acrylamide-co-stearyl acrylate and/or lauryl acrylate) (PDMAAm-co-SA and/or LA)-based shape memory gels (SMGs) using a customized optical 3D gel printer. This process enabled rapid and moldless fabrication of SMGs with a variety of shapes and sizes. By varying the compositions of the constituent monomers, a wide variety of SMGs with tunable mechanical, thermal, optical and swelling properties has been obtained. Printed SMGs with excellent fixity and recovery ratio have exhibited a wide range of Young's modulus 0.04 MPa-17.35MPa and strain 612%-2363% at room temperature when acrylate co-monomer (SA and LA) content was varied and the value of strain has been found to enhance at elevated temperature. Thermogravimetric analysis (TGA) of the SMGs shows one step peak degradation (407°C-417°C) regardless of compositions after initial mass loss for water evaporation. Dynamic mechanical analysis (DMA) and Differential scanning calorimetry (DSC) revealed variable transition temperatures (29°C-49.5°C) depending on the SA and LA content. SMGs at all the compositions possess high transparency with variable swelling degrees in water and different organic solvents and exhibits refractive index value in the range of intraocular lens making them suitable for application in the optical field. These unique properties of 3D printed SMGs with free formability and tunable properties are expected to generate rapid demand in a variety of sectors in biomedicine, robotics and sensing application.

In chapter 3, I demonstrate a novel approach to fabricating a shape memory hydrogel (SMG)-based bilayer system using three-dimensional (3D) printing to yield a soft actuator responsive to the medical application of swelling and heat. Each layer of the bilayer is composed of poly(N,N-dimethyl acrylamide-co-stearyl acrylate) (PDMAAm-co-SA)-based hydrogels with different concentrations of the crystalline monomer SA within the SMG network and exhibits distinctive physicochemical property

es that enable anisotropic swelling-induced actuation of the bilayer with reversible shape memory properties. The deformation, reversibility and response time of the bilayer actuator are extensively dependent on temperature. Utilizing the proposed SMG bilayer actuator model with synergistic functions, a nature-inspired flower architecture that changes its shape upon immersion in water and an underwater 3D macroscopic soft gripper that can grab, transport and release a guest substance are developed to demonstrate their applicability in biomimetic actuators, encapsulating systems and soft robotics. These results demonstrate that, the 3D printability of SMGs have a great application as a novel material and designability for soft robotics.

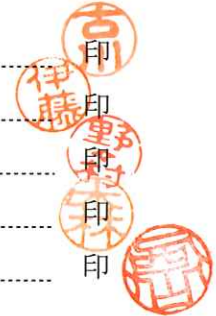
学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 元年 7月 30日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 古川 英光  
副査 伊藤 浩志  
副査 野々村 美宗  
副査 森 秀晴  
副査 西山 宏昭



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

Table with 4 columns: 論文申請者, 専攻・分野名, 氏名, 学位論文審査結果, 論文題目, 論文審査年月日, 論文公聴会, 最終試験結果, 最終試験年月日.

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

形状記憶ヒドロゲル (SMG) のようなスマートなソフト材料は、積層造形法または3Dプリントと呼ばれるプログラムが可能な製造工程を活用することで、新しいソフトロボットの開発に応用可能である。

本論文は、下記の4章より構成されており、要旨は以下の通りである。

第1章では、序論としてスマート高分子ゲル、3Dプリンティング、ソフトロボティクスについてと本研究の背景と目的が述べられている。第2章では、改良した光学式3Dゲルプリンタを使用して、高強度熱応答性ポリマー (N,N-ジメチルアクリルアミド-co-ステアリルアクリレートおよびラウリルアクリレート) (PDMAAm-co-SAおよびLA) ベースの共重合形状記憶ゲル (SMG) を開発した。

本論文に関する第一著者論文は国際論誌に2報掲載済みで、国際学会では7回の発表している。

以上、研究の新規性、学位論文の内容や体裁、内容公開状況等について本学の審査基準から総合的に判断した結果、学位論文として十分に認められるものであり、学位論文審査を合格と判断した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文の内容を要約した口頭発表および質疑応答によって英語で実施した。研究テーマおよび研究方法は、当該分野の博士論文として適切なものであり、学術的背景、実験結果、結論は関連分野の博士論文として十分なレベルに達していると判断された。