

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18776

研究課題名（和文）ロボティック体内循環網：自己躯体の拡張的形態変化を可能とする基礎技術・学術の萌芽

研究課題名（英文）Robotic Circulatory Network: Germination of basic technology and science for extensional morphological modification of the self-body

研究代表者

多田 隈 建二郎（Tadakuma, Kenjiro）

東北大学・タフ・サイバーフィジカルAI研究センター・准教授

研究者番号：30508833

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：化学反応と機構の観点からの力場の変化の組合である「機・化複合型反応機構」を推進した。これは、従来では修復のみに留まっていた機能を、反応中に力学作用を与えることにより、形態の拡張的変化を行うことで、変種変様なタスクの臨機応変な遂行を可能とするものである。この形状の劇的可変機能をさらに推し進め、これまで固定されていた対偶をも可変にする方法論を整理した。具体的には、回転子によるパラフィンワックス硬化疎外方式回転磁石における同一平面上の周方向動力伝達現象の発見をし、その結果反射型駆動や可変対偶の観点からのロボット機構の設計論についても整理・展開することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この回転入力でのON・OFFや回転数の調整を行うことで、多様に自己変化させるロボット機構の構成において、アクチュエータ数を少なくしながらも複数の状態と取り得るといふ、複態・多態化の機構設計論に結び付けることが可能となる。このような入出力因果現象を確認することができた。

さらに展開された学術知識として、反射型駆動の側面において、自己形状変化させる際のトリガを、メタ入力として考え図3に示すように、物理量としての入力（物理量変化）・出力（力・変位・動作・物理量変化・形状変化・特性変化）として、内外を含めて、入出力因果メカニズムという概念に展開している。

研究成果の概要（英文）：We have promoted the “mechano- chemical complex reaction mechanism,” which is a combination of chemical reaction and force field change from the viewpoint of mechanism. This mechanism enables the flexible performance of a variety of tasks by extensively modifying the morphology through the application of mechanical action during the reaction, a function that was previously limited to restoration only. We have further advanced this dramatically variable function of shape, and have organized a methodology to make the previously fixed counterpart variable as well. Specifically, we discovered the phenomenon of circumferential power transmission in the same plane in a paraffin wax-hardened, alienated rotating magnet with a rotor, and as a result, we were able to organize and develop the design theory of robot mechanisms from the viewpoint of reflective drive and variable pairing.

研究分野：ロボット機構学

キーワード：ロボット機構 メカニズム設計 循環メカニズム 化学反応 柔剛切替え

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来の機械やロボットを含む人工物においては、その構造が破損した際に、修復機能を有していないため、機能維持が困難という問題があった。従来までに、材料の観点から、表面の小さな傷を治す自己修復性材の研究が数多く行われてきた。我々も、流れた血液が瘡蓋となることで傷口を塞ぐ生物の機能に着目し、チューブの内側にゲルを流し傷口で反応させることで、破損部の修復を行う機構の研究を続けてきた。しかしながら、その機能は修復に留まっており、現場で変容する様々な作業を効果的かつ臨機応変に成しうる身体の形態拡張はまだ未達成で難解な課題となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の研究背景を鑑み、「ロボット自身の身体において拡張的な形態改変を可能にする体内循環網メカニズムの基礎技術・学術を発芽させること」を目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究の具体的推進方法として、創案したロボティク循環網の基本原則に基づいて実機を設計・試作し、実機実験を通して、考案した原理の有効性を確認するというサイクルを研究実施期間中に複数回することで、実機の質を向上させ、学術・技術を体系立てるという方法を取った。

研究推進を主に助教である阿部一樹(学生メンバへの細かい指導)からの協力を得ながら推進し、学生メンバの卒論・修論テーマとして設定しての教育・補助という位置づけで研究を推進した。適宜、高分子材料の観点から、その専門である山形大学の古川英光教授と川上准教授と議論して化学反応の知見を組み入れた。

### 4. 研究成果

研究方法として、設定した目的達成のため、複数素材の化学反応と機構の観点からの力場の変化の組合である「機・化複合型反応機構」を推進した。これは、従来では修復のみに留まっていた機能を、反応中に力学作用(内圧、もしくは電磁場を変化させて、出来上がる形状・構造に作用させる。)を与えることにより、形態の拡張的改変を行うことで、災害現場などでの変種変様なタスクの臨機応変な遂行を可能とするものである。この形状の劇的可変機能をさらに推し進め、これまで固定されていた対偶をも可変にする方法論をまとめ、反射型駆動や可変対偶の観点からのロボット機構の設計論についても整理することができた。

具体的には、まず、初年度においては、複数素材の化学反応と機構の観点からの力場の変化の組合である「機・化複合型反応機構」における、膜構造に相当するものを2種類設定した。1つは化学式、もう1つは機構式の原理確認装置である。前者の化学式においては、酢酸ナトリウム水溶液とキサンタンガムおよび磁性粉末を混合させたもので膜構造を製作した。磁場で局所的に、内圧で全体膨張・収縮を行う変形が、また酢酸ナトリウムにおける過冷却反応により柔剛の切替えが可能であることを確認した。しかしながら、膜自体が弾性を有しているわけではないため、自身での復元力を生成することが困難であり、そのため初期状態に復元させるという変形を行う際には再度負圧を付加したり、磁場を印加する必要があるという課題も実機を通して確認できた。この復元力生成の容易さを鑑み、後者の機構式の原理確認装置においては、シリコンゴムを用いて柔剛可変膜を作製し、内圧を変えることで膨張や収縮をしている間に形状を固めるという構成とした。こちらの方式は、応答性と復元性は前者よりも格段に良くなるということが具現化した実機を用いた基礎実験により確認することができた。課題としては、局所的な変形が挙げられるが、こちらも柔剛の分布を取れるような区画化された膜構造とするというアイデアを生むに至った。さらには、当初のアイデアにあった対象物を変形させるエンドエフェクタとしてのノコギリ状の構造を作り出す方法として、貝類の歯の生成方式に関しても着目し知見を深めた。膜構成において、区画の分解能を高める方法や前者の化学反応との組み合わせ方式に関しても次年度以降の研究開発を考慮に入れてアイデア整理に取り組んだ。

また、続く次年度においては、研究方法として、柔剛切替え方式の中でも、化学反応と機構の観点からの2種類を設定した。1つは化学式、もう1つは機構式の原理確認装置である。前者の化学式においては、ワセリン・ワックスを用いた柔軟状態・高剛性状態の切り替えを行う機構システムに関して吟味した。その結果、これまで温めることで柔軟状態を作り、冷ますことで剛状態を作るという方式において、後者の冷ますことによる方式だと応答性が低く実用が困難であるという考えが主であった。しかしながら、室温よりも低い状態を融点とする相変化温度設定のワセリン・ワックスにおいて、回転子や振動子を中に含ませて、回転させている最中は柔モード

を維持し、回転を止めると固体化が始まり高剛性モードに切り替わるという通常が駆動子（回転子・振動子）による柔モードで、剛モードにおいてむしろエネルギーを必要としないという方式について原理を創案した。また、創案した原理に基づいた実機実験により、その原理の有効性を確認した。その様子を図1に示す。実機実験の結果、駆動子の周辺以外では柔モードを維持することが難しく、剛モードに変わる現象が確認された。この問題に対して、柔剛切替え要素を使用する状況をナノ・マイクロサイズの機械システムに設定することで振動伝搬性を高めて、応答性を向上させることが、応用設定の観点から生み出した解決方法となる。また、機械式柔剛切り替え方式において、従来の部品1つと見なせる粉に対して、回転や直動といった1関節もしくは複数関節の機械式構造体を1セットの粉と見なした粉体ジャミング転移機構についての原理を新たに創案した。また創案した原理に基づいて実機を具現化を進めている。

自己特性可変という観点において、パラフィンワックスの柔剛切替えは、通常モードにおいて柔軟モードが主であった従来方式からの逆転の発想で、通常モードにおいて固体である剛状態を取る方式として、新しく創案したものである。

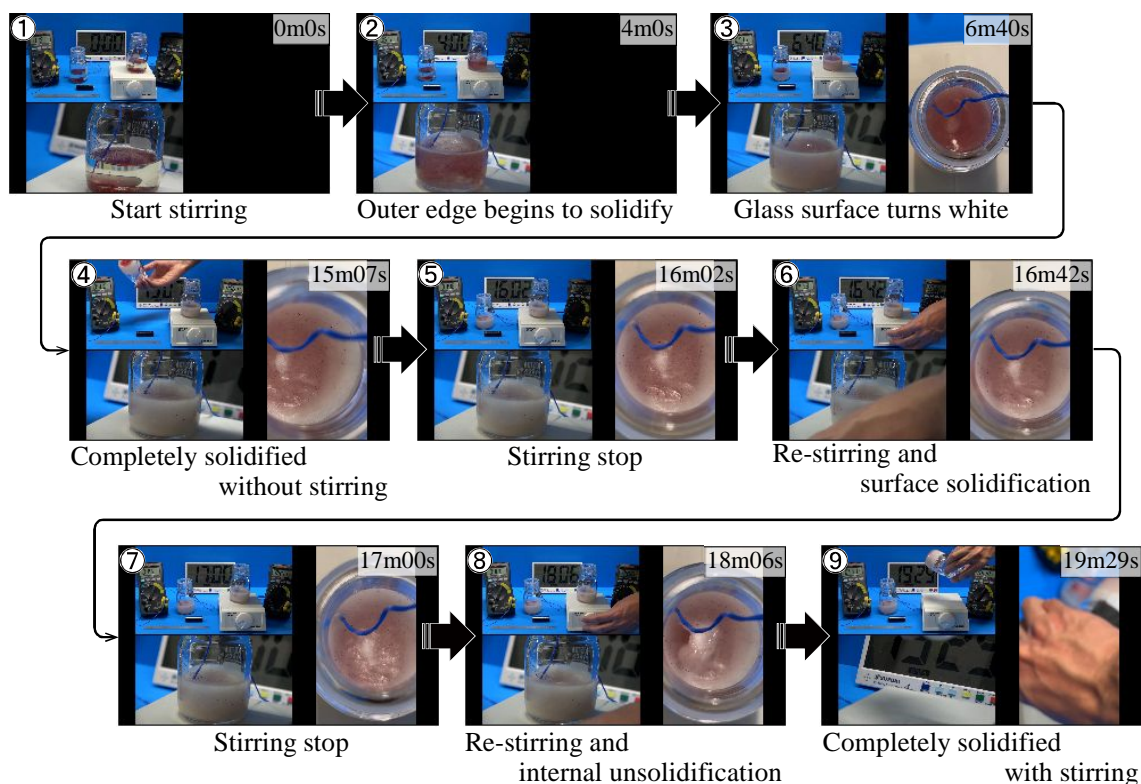


図1：回転子によるパラフィンワックス硬化疎外方式による柔剛切替え機構の実機実験の様子

さらに、磁場の変化などでは回転しに動力を与える新しい方法として、図2に示す回転磁石における同一平面状の周方向動力伝達現象を発見することができた。こちらは、N極とS極という磁化方向が径方向になっている円柱状の磁石を高速回転させると、同様に径方向に磁化された球体状もしくは円柱状の磁石が自転しながら公転し、入力側の円柱状磁石の回転を止めると、この自転・公転の運動はなくなり、入力側の磁石に引き寄せられる、という現象である。

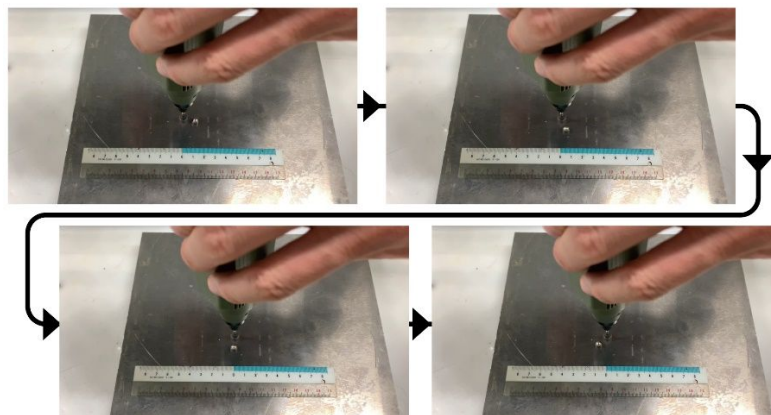
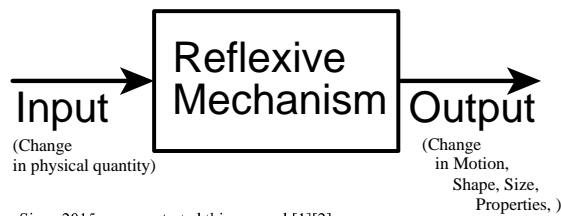


図2：磁場の変化に応用可能な、回転磁石における同一平面上の周方向動力伝達現象の発見

one of our goal is to systemize the research field of reflexive mechanisms



Since 2015 ~ , we started this research[1][2]

- [1] Eri Takane, Kenjiro Tadakuma, Tomonari Yamamoto , Kazunori Ohno , Masashi Konyo , Satoshi Tadoko, "A mechanical approach to realize reflexive omni-directional bending motion for pneumatic continuum robots" ROBOMECH Journal, Article number: 28, 2016.
- [2] Kenjiro Tadakuma, Hirone Komatsu , Masahito Fujita , Akito Nomura , Eri Takane , Satoshi Tadokoro, "Omnidirectional Expanding Torus Mechanism for Edible Robotics" Conference on Robotics and Mechatronics, Fukushima, Japan, May 10-13, 2017.

図 3 : 入出力因果メカニズムへの展開

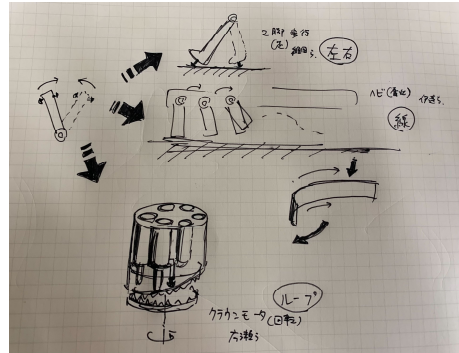


図 4 : 反射型駆動と自励振動の関連性

この回転入力 of ON・OFF や回転数の調整を行うことで、多様に自己改変させるロボット機構の構成において、アクチュエータ数を少なくしながらも複数の状態と取り得るとい、複態・多態化の機構設計論に結び付けることが可能となる。このような入出力因果現象を確認することができた。

さらに展開された学術知識として、反射型駆動の側面において、自己形状変化させる際のトリガを、メタ入力として考え図 3 に示すように、物理量としての入力 (物理量変化)・出力 (力・変位・動作・物理量変化・形状変化・特性変化) として、内外を含めて、入出力因果メカニズムという概念に展開している。さらに、図 4 に示すように、「自励振動体は反射型を内部構造化したものである。また、2 対の連動動作だとが細田らによる脚ロボット、直線状だと伊達らの蛇ロボット、ループ状にすることで、広瀬らによるクラウンモータと見なすことが可能である。」という考えまで拡張させている。2023 年 11 月 7 日-8 日第一回ソフトロボットシンポジウム、および SI2023 にて関連研究内容として発表し、2015 年からの当研究室での反射型機構の流れとして、さらにアイデアを整理している。

以上のように、当初の予定に対して概ね順調に研究推進ができ、さらに学術的知識の展開にも考えをつなげることができたと考えている。今後は、さらに上記の入出力因果メカニズムと可変対偶との関連性を考慮した、ロボット機構創案と実機具現化を自己改変の観点から進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kenjiro Tadakuma
2. 発表標題 Advanced Mechanisms Design for Robotics
3. 学会等名 Thought-leadership Series - AI and Robotics for Garment Industry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------