

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21939

研究課題名(和文)数珠状の1次元ジャミング転移構造により超柔剛切替可能な織布メカニズムの創出

研究課題名(英文)Fundamental embodiment of woven fabric mechanisms that can realize a hyper variable stiffness by a beaded one-dimensional jamming transition structure

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)：自由曲面状で柔らかさと硬さを切り替えることの可能な「織布メカニズム」を創出することを目的とし、従来当研究チームが取り組んできた柔剛切替機構の1つである1次元ジャミング転移機構を「線」の構造だとみなし、それを布状に「編む」ことによって、上記の織布構造を実現した。創案原理に基づく実機を具現化し、試作実験を通じて当構造の有用性を確認した。本織布構造は、一部が破損しても柔剛切替の機能を失わないという基本性質を有するものであり、従来、極めて困難であった脆弱・軟弱対象物への受動的な包み込み保持と保持とを実現可能な構造となりえることを具現化した実機を用いた実験を通して確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義として、線状構造および布状構造という、1次元・2次元の基本構造自体の創案と、実機具現化の手法を明確にすることで、三次元構造を含めた複雑な構造を形作る際の基礎となる機構学的知見を体系化することに寄与したことが大きい。また、本機構は人や環境などの軟弱・脆弱な接触対象であっても柔剛切替機能により、接触対象に力学的ダメージを与えにくいという特徴を有する。したがって、社会的意義として、本構造を応用させたロボットハンドや移動体の足回りは、従来にない柔らかい接触性を有するものであり、人間やその住環境を含めた環境はもちろん、極限環境でのサンプル回収作業にも寄与できる重要なものである。

研究成果の概要(英文)：The aim is to create a "woven mechanism" that can switch between softness and stiffness in a free-form curved surface. The above woven structure was realized by "weaving" it into a cloth form. We realized an actual device based on the original principle and confirmed the usefulness of this structure through prototype experiments. The woven structure has the basic property that it does not lose its function of switching between flexible and rigid even if a part of it is damaged.

研究分野：ロボット機構学

キーワード：敷布構造 ロボット機構 機構設計

1. 研究開始当初の背景

ロボット工学において、柔らかいロボットの研究がさかんに行われている一方で、萌芽的な観点から、まだ1つの単位構造としての柔らかい線状構造および2次元湾曲平面構造を有する機構はこれまでに創出されていない状態であった。申請者は各種ロボット機構の研究開発(原理考案・具現化)に一貫して従事してきた。そのうちの1つの柔軟性を有するハンドの指部分に使用していた線状体の研究内容を図1、2に示す。従来までの数珠にみられる、固形ユニットの形が球状では、中央の線を引いた際に、中央線の経路が直線状に戻ろうとする復元力を生成してしまうため、やわらかい状態においてなじんでいた形を維持することが困難であるという問題を有していた(図1)。そのため、図2に示すように、この固形ユニットの形を前後で非対称の凹凸構造として、湾曲形状の維持を可能とする構造の考案への至った、というのが経緯である。これら線状体を一種の単位構造として考え、柔剛切替えをはじめさまざまな機能や特徴を持たせることにより、これら単位構造から創出されるハンドや履帯などを多数生み出しやすくするように体系化することが非常に重要になると考えられる、という研究背景にあった。

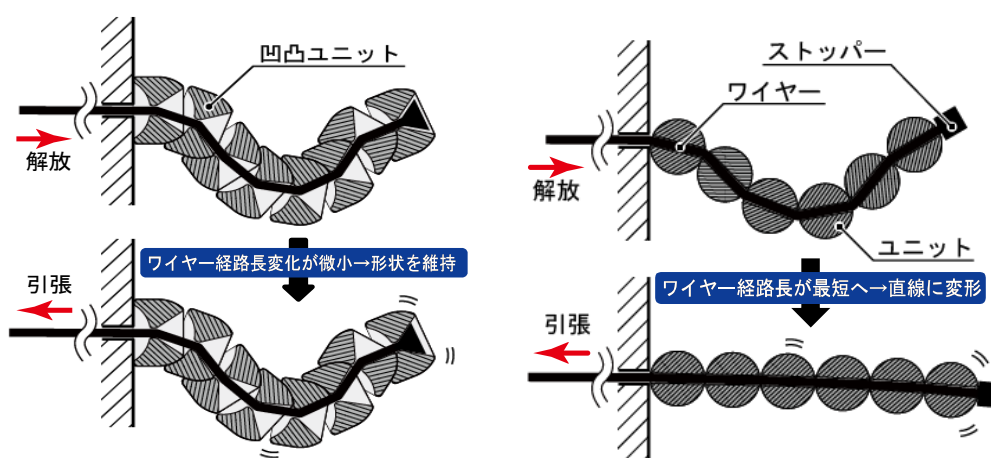


図1：初期の球状固形ユニットからなる線状体(湾曲形状を維持不可能)

図2：考案した凹凸固形ユニットからなる(中央線が湾曲により経路長変化が少ない → 湾曲形状を維持可能に。)

2. 研究の目的

柔剛可変機能を有する敷布メカニズムの創出およびその過程における1次元ジャミング転移構造の基礎的体系化を主目的として、以下のような具体的な取り組みを行った。本研究の大きな流れは、主に以下の3段階の研究活動内容であった。中でも、研究ではi)の内容に、挑戦的に取り組んだ。

- i) 1次元ジャミング転移機構の基礎的・網羅的な実機具現化による基礎知見の構成。
- ii) 「線を『基準』とした」各種構造の創出。
- iii) 可変剛性機構における新たなる学術知見の体系化への貢献。

1次元ジャミング機構は、従来にない長手方向を有する袋状構造の内部に複数の線が封入された基本構成を取り、内部媒体の量により、高剛性・低剛性モード、またその中間のモードを切り替えるという原理である。これにより、接触対象になじむ際には柔らかく、力を及ぼす際には高剛性にて接触するという剛性可変ひいては外部接触対象との力入出力を切り替える機能を実現でき、伸縮可能な構造にも発展可能となる。

3. 研究の方法

研究体制として、申請者が基本的に各種実機の考案・設計・試作・実験とした研究実施を、共同研究者として研究室所属の学生メンバ2名と共に行う。また、撚り線などの、比較的『成熟した分野の知見を活用』する方法なども考えられる。ワイヤーなど撚り方は多数存在し、それら知見の適用を各線の配置に行うこと、線の本数・材質・線径や線そのものの構造などに関しても、各種組み合わせと特性・機能を本研究では網羅的・基礎的に行う。

本研究構想においては、線の本数、材質、線径、表面形状など、様々なパラメータがある。また、これら線状体を内部に含むチューブ袋の素材や厚みに関しても実験により、適切なものを見出し、物理モデルを構築しては実機実験にフィードバックする体制を取るようにすることで、これからのロボット機構における『柔剛切替方式の基礎・規準となる構造の構築および体系化』につとめる。関節角度の制御・保持力特性も課題に盛り込む。実機を実際にCAD上で詳細に設計・製作という過程を繰り返すことで具現化し、実機実験を通じて当構造の有用性を確認する。以上のように、本研究はその遂行方法として、基礎的・網羅的に実機を具現化する過程を通してなされるものであり、内容においては挑戦的研究としての高い可能性を有するものである。

4. 研究成果

自由曲面状で柔らかさと硬さを切り替えることの可能な「織布メカニズム」を創出することを目的とし、従来当研究チームが取り組んできた柔剛切替機構の1つである1次元ジャミング転移機構を「線」の構造だとみなし、それを布状に「編む」ことによって、上記の織布構造を実現した。創案原理に基づく実機を具現化し、試作実験を通じて当構造の有用性を確認した。本織布構造は、一部が破損しても柔剛切替の機能を失わないという基本性質を有するものであり、従来、極めて困難であった脆弱・軟弱対象物への受動的な包み込み把持と保持とを実現可能な構造となりえることを具現化した実機を用いた実験を通して確認した。

学術的な意義として、線状構造および布状構造という、1次元・2次元の基本構造自体の創案と、実機具現化の手法を明確にすることで、三次元構造を含めた複雑な構造を形作る際の基礎となる機構学的知見を体系化することに寄与したことが大きい。また、本機構は人や環境などの軟弱・脆弱な接触対象であっても柔剛切替機能により、接触対象に力学的ダメージを与えにくいという特徴を有する。したがって、社会的な意義として、本構造を応用させたロボットハンドや移動体の足回りは、従来にない柔らかい接触性を有するものであり、人間やその住環境を含めた環境はもちろん、極限環境でのサンプル回収作業にも寄与できる重要なものである。

図3に創案した基本原理に基づいて具現化した一例の試作機の外観および、図4に、その受動なじみ変形動作および、柔剛切替の様子を示す。



図3：創案した基本原理に基づいて具現化した試作機の外観



図4：試作機受動なじみ変形の柔剛切替の様子

また、これら実機を創案・具現化するまでの全体の流れにおいて取り組んだ内容・成果を以下に示す。

【単位構造化】

この線状の単位構造を複数用いることで、シート状の構造が実際に実機として実現できるかどうかという根本課題に挑戦した。その際、最も基本的な縦糸・横糸の組み合わせによりシート状を構成する方式を採用した。縦糸を柔剛切り替え可能な線状構造で構成し、横糸を柔軟細糸とすることで、シート状の構造を構築することができることを確認した。また自由湾曲面において全体としてシートの柔らかさ・硬さの変化を起こすことが可能であることを実機を用いた基本実験を通して確認した。横糸にも柔剛切り替え可能な線状構造を用いることが次なる課題となるが、これには縦糸と接触する部品の構造について可動性もたせるようにするという解決のための道筋も、実機実験を通して明確にすることができた。また各構造構成法と、応答性・形状分解能などの特性とを結びつけた体系化のための項目設定も、初期実機の開発を通して確認することができた。

【縦糸横糸】

また、縦糸のみならず、横糸においても柔剛切り替え構造を適用させるにはどうするか、また適用が成功した後の全体の織布構造にはどのような特性があるのかを実機具現化および実機実験を通して明らかにした。具体的には、柔剛切り替えにおいて、柔と剛の2極状態を取りうるのみでは、編み物の伸縮特性を出すのは難しく、柔剛の中間状態をとること、もしくは縦糸と横糸の両方を柔剛切り替えにするのではなく、どちらかは単純な繊維やシートとすることが実際には有用であることが分かった。また、実機実験においては、縦糸と横糸の接触部の摩擦が最も重要で、この接触部においては滑りやすく、外環境との接触においては、摩擦が高いという構成にすることが重要であるという知見を得た。さらに、これらの裁縫技術からの切り口も導入することで、縦糸・横糸のみならず、線状の構造で織布メカニズムを全体として構成可能な編み方についても検討・具現化を試みた。その結果、内部構造における接触位置をむしろ固定してそこで流体供給を行い、接触位置以外のところでは柔剛の中間状態を取るという、カプラ内蔵型・1軸上柔剛分布配置型の要素のアイデアを生むに至った。

【異型断面化による特性可変手法の創出】

さらには、異形断面を有する線状構造、および端部線と内部線において、異なる種類の線を配置させるパターンにより、織布全体としての特性がどのように変化するかという点に関して取り組んだ。より具体的には、異形断面構造に関しては、従来のように円状断面にすることで軸方向回りにあたるロール軸の回転を許容させているものを、定断面とすることで回転を拘束させることが可能になるというのがアイデアの基である。このロール軸回り回転拘束型のセグメントのみで1本の線状構造を構成するのではなく、1本の線の中で回転拘束型・回転許容型を同在させて特性を変えるというものである。続く異種線状配置パターンにおいては、構造の直接接続・並列接続という観点のみならず、その構造からもたらされる復元力および外力により発生する変位それぞれにおいて、直接接続・並列接続を考える必要があるという知見を得るに至った。このように、当初の設定以上の学術的知見・観点やノウハウを基礎原理の創案と実機具現化・実機実験の過程から得ることができた。さらには、能動線と受動線の混在方法・構造に関しても検討し、端部と中央線部分に関しては能動駆動とし、ほかは引き連れ効果を活用して受動線とすることで織布構造を構成する方法を創案した。この機構は、織布構造の能動化において、全ての線を能動化させることなく、所望の最低限度の動きを実現させるという点で、従来の直列接続もしくは並列接続で多関節を多関節数よりも少ない数のアクチュエータで駆動させるという劣駆動方式の概念をさらに拡張させ、直列配置・並列配置が伴に含まれる織布構造ならではの新しい劣駆動方式になるものであり、本研究課題で明らかにした知見・概念をさらに発展させる位置づけのものとなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kenjiro Tadakuma
2. 発表標題 From a Deployable Soft Mechanism Inspired by a Nemertea Proboscis to a Robotic Blood Vessel Mechanism
3. 学会等名 Embodied Intelligence Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田 隈 建二郎
2. 発表標題 様々な作業を実現するロボット機構の原理考案と具現化
3. 学会等名 精密工学会 超精密位置決め専門委員会 9月度定例会 (招待講演)
4. 発表年 2021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
---------	---------