

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04317

研究課題名(和文) 薄型柔軟素材で被覆された多関節ロボットの力学特性の解明

研究課題名(英文) Mechanical Properties of Multi-jointed Robot Covered with Thin Flexible Material

研究代表者

柴田 瑞穂 (Shibata, Mizuho)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：70454519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、薄型柔軟素材で被覆されたシリアルリンクロボットの力学特性について検討した。本機構は、能動回転関節を樹脂袋に入れ、真空包装技術を利用することで被覆しており、この手法をロボットパッキング法と呼んでいる。構築した力学モデルより、被覆した薄型柔軟素材とリンクの間に滑りがない場合、リンクを回転させるために必要なトルクは、薄型柔軟素材を伸ばすために必要なトルクが主となることが明らかになった。また、被覆した薄型柔軟素材とリンクの間に滑りがある場合、リンクを回転させるために必要なトルクは、摩擦係数に依存することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

食品・服飾・リネンサプライなどの生活用品を扱う工業においては、扱う物体の多くが水分を含み不定形であり、扱う際に汚れが付着してはいけないという制約がある。この背景から、生活用品をハンドリングする分野では産業用ロボットの導入が進んでいない。人の作業に倣い、ロボットにもゴムや樹脂フィルムなどの薄型柔軟素材を被覆することで作業が可能になると考えられるが、ロボットと被覆した薄型柔軟素材は摺動すべきかなど、その力学構造は未知の部分が多く、設計論が確立していなかった。本研究で得られた知見は、多関節ロボットへの薄型柔軟素材の被覆方法確立の礎となる。

研究成果の概要(英文)：This study examines the dynamic characteristics of a serial link robot covered with thin, flexible material. In this mechanism, the active rotary joint is covered the plastic film bag using the vacuum packaging technology, and this technique is called the robot packaging method. The constructed mechanical model revealed that the torque required to rotate the link is briefly required to stretch the thin, flexible material when there is no slippage between the covered thin, flexible material and the link. It was also found that the torque required to rotate the link depends on the friction coefficient when there is slippage between the covered, thin, flexible material and the link.

研究分野：ロボティクス

キーワード：多関節ロボット 薄型柔軟素材 摺動特性 パッキング

## 1. 研究開始当初の背景

組立、塗装、搬送など機械要素を扱う工業においては、高精度化、高効率化の観点からロボットの導入が進んでいる。しかしながら、食品・服飾・リネンサプライなどの生活用品を扱う工業においては、いまだ多くの作業を人手で担っている。この背景には、扱う物体の多くが水分を含み不定形であり、扱う際に汚れが付着してはいけないという制約がある。多くの産業用ロボットは潤滑のためにグリスを使用する。また、人手で生活用品を扱う際には、ゴム手袋を着用することでこの問題を解決している。これに倣い、ロボットにもゴムや樹脂フィルムなどの柔軟素材を被覆することで作業が可能になると考えられるが、ロボットと被覆した薄型柔軟素材は摺動すべきか、ハンドリングする対象物体と被覆した薄型柔軟素材は摺動すべきかなど、その力学構造は未知の部分が多く、設計論が確立していなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、薄型柔軟素材で被覆された多関節ロボットの設計論を確立するために、力学モデル構築および実験を通して、その摺動特性を明らかにする。柴田(研究代表者)は、2012年度より本申請課題の基礎となる柔軟外殻水中ロボットの研究に従事している。従来、食品分野で利用されてきた真空包装技術を利用することで、外殻を樹脂フィルムとする小型軽量ロボットが製作可能であることを、世界に先駆け実証した。この、サーボモータや駆動回路等のロボットの構成要素を樹脂袋に封入する手法は他に類を見ず、我々はロボットパッキング法と呼んでいる。外殻を樹脂フィルムとし、絶縁流体を封入することで、ロボットの防水性、防塵性、防圧性を容易に高めることができる。この製作過程において、使用する樹脂フィルムの材質および封入する液量によって、ひれが動かない等、ロボットの運動特性が大きく変化するという知見を実験的に得ており、本研究は、これらの知見を、力学モデルを通して詳細に解析する。

## 3. 研究の方法

### (1) ロボットと被覆素材との摺動特性の解明

本研究では、ロボットと被覆素材との摺動特性の解明するために、ロボットと被覆素材との間に滑りがない場合およびある場合のモデルを検討した。最初に、滑りがない場合のモデルを考える。シリアルリンクロボットを柔軟素材で被覆する際に、真空包装技術を利用することで、柔軟素材をロボットの表面に密着させることができる。被覆する柔軟素材は、プラスチックフィルムを想定し、伸び、曲げは可能であるが、縮まないと仮定してモデリングを行う。図1にモデルを示す。初期状態ではフィルムは曲げも伸びもしていない。その後、シリアルリンクに接続された能動回転関節によってリンクがフィルムとともに回転する。簡単のため、能動回転関節で結合されたリンクは平面を運動すると仮定する。フィルムは梁としてモデル化する。

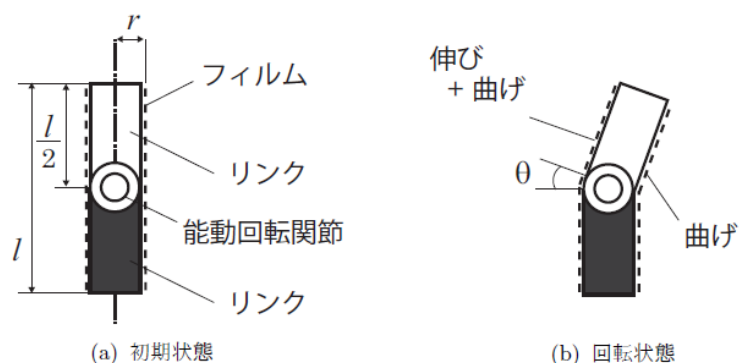


図1 柔軟樹脂素材で被覆されたシリアルリンクの運動 (滑り無し)

次に、滑りがある場合のモデルを考える。シリアルリンクロボットを柔軟素材で被覆する際に、ロボットの構成要素とともに絶縁流体を封入することで、絶縁流体が潤滑剤の役割を果たし、柔軟素材とロボットが摺動する可能性がある。被覆する柔軟素材は、プラスチックフィルムを想定する。図2にモデルを示す。初期状態から、摩擦力を受けながらリンクが回転する。本節では、使用する柔軟素材は曲げが可能であり、滑り運動している間は伸びずに縮まないと仮定してモデリングを行う。滑り運動するために十分な長さの柔軟素材があることを仮定する。

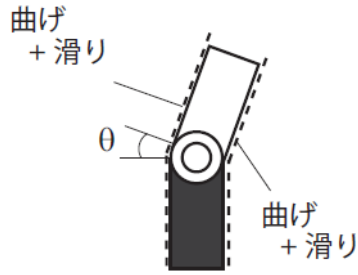


図2 柔軟樹脂素材で被覆されたシリアルリンクの運動（滑りあり）

図1, 図2で得られたモデルから回転運動させるために必要な要因を明らかにする。

#### (2) 実ロボットへの適用 1

(1)で得られた結果に基づき、実ロボットへの適用を試みる。具体的には、滑りを有する運動を実現することにより、小型モータでも薄型柔軟素材で被覆されたシリアルリンクロボットが運動可能であることを示す。

#### (3) 実ロボットへの適用 2

(2)で得られた結果が、別の被覆材料にも適用可能であることを明らかにする。具体的には、外殻をシリコン素材で製作した魚型水中ロボットの解析および実験を通して、得られた成果が広範囲に適用可能であることを示す。

#### (4) 他アプリケーションへの適用

ロボットパッキング法（電子機器などの構成要素を樹脂袋などの薄型柔軟素材でパッキングする方法）を計測機器のパッキングへも応用し、薄型柔軟素材による電子機器の被覆の可能性の一端を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) ロボットと被覆素材との摺動特性の解明

被覆する柔軟素材とリンクが密着し、滑りがない場合に能動回転関節が回転を行うために必要なトルクは、主として柔軟素材の曲げおよび伸びに必要なトルクに起因すると考えられる。これを考慮して、力学モデルを構築した。ここでは、柔軟素材の曲げに関して、柔軟素材を先端に荷重が加わる片持ち梁としてモデリングした。また、柔軟素材の伸びに関して、ある長さの柔軟素材が均一に伸びると仮定してモデル化した。柔軟素材として樹脂フィルムを利用すると、リンクの厚さに比べて被膜材料の厚さを非常に薄く設定できる。力学モデルより滑りがない場合、薄型柔軟素材で被覆されたシリアルリンクロボットを動作させるために必要なトルクは、柔軟素材を伸ばすために必要なトルクが主であることが明らかになった。

被覆する柔軟素材とリンクが滑りながら能動回転関節が回転を行うために必要なトルクは、主として柔軟素材の曲げに必要な力および摩擦力に起因すると考えられる。これを考慮して、力学モデルを構築した。ここでは、柔軟素材の曲げに関して、柔軟素材を先端に荷重が加わる片持ち梁としてモデリングした。摩擦力はリンクの面積に比例するものとした。力学モデルより滑りがある場合、薄型柔軟素材で被覆されたシリアルリンクロボットを動作させるために必要なトルクは、摩擦係数に依存することが明らかになった。

滑りがない場合および滑りがある場合において、フィルムの物性等、実際に物理量を代入し、必要なトルクがどの程度なのかを数値的に確認した。その結果、滑りがない場合は食品工業で利用されているフィルムを変形させるために数 10W 程度のモータが必要であることを確認した。また、滑りがある場合は同様のフィルムを利用して数 W 程度のモータで運動可能であることを確認した。この結果に基づき、樹脂フィルムを利用する場合には、樹脂フィルムとリンクの間に滑りを許すことで、発生するトルクが小さいモータでも回転運動が実現できることが明らかになった。

#### (2) 実ロボットへの適用 1

(1)で得られた結果に基づき、実ロボットへの適用を試みる。具体的には図3に示す外殻を樹脂フィルムとする水中ロボット（ひれ部がシリアルリンク構造となる）に図4に示すようにおもりを載せ、ロボット内部にある封入液量（液量が変わるとリンクとフィルムとの摩擦係数が変化すると考えられる）と回転角度との関係を実験的に確認した。計測結果を図5に示す。

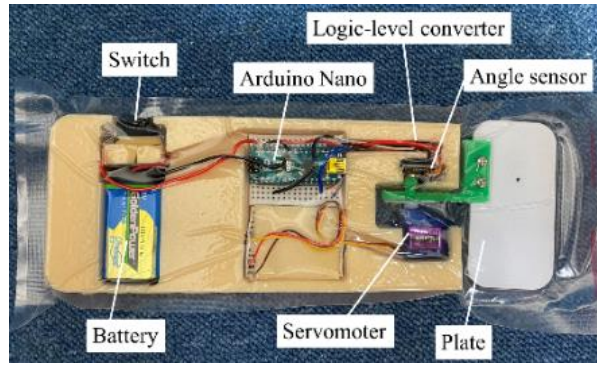
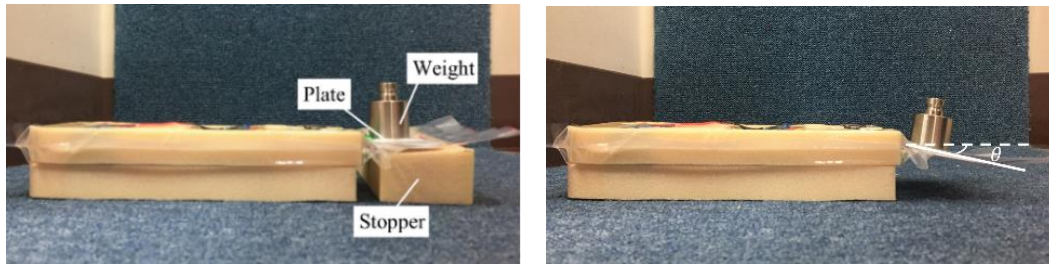


図3 外殻と樹脂フィルムとするシリアルリンクロボット



(a) 初期状態

(b) 荷重時

図4 外殻と樹脂フィルムとするシリアルリンクロボットの荷重試験

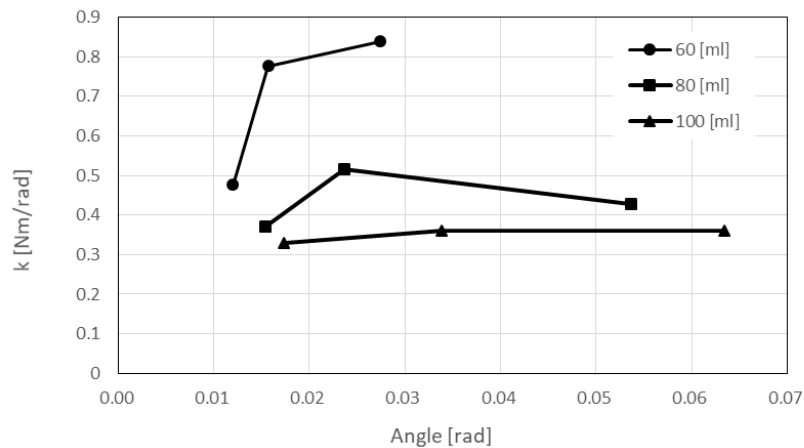
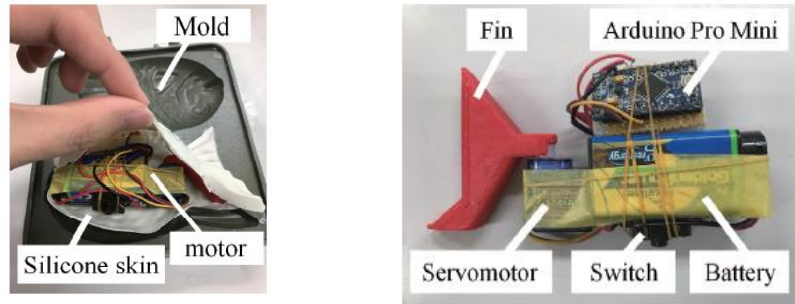


図5 荷重と回転角度の回転

本実験では、試作機を絶縁流体とともに包装袋に入れ、真空包装した状態で重りを載せ、リンクの回転角度を計測した。モータの軸から 50 [mm]の位置に重りを置いた。封入する液量は 60 [ml], 80 [ml], 100 [ml]の 3 パターンとし、重りは 20 [g], 50 [g], 100 [g]の 3 種類を用いて計測した。それぞれの計測の組み合わせにおいて、15 個のデータの平均値を示している。封入する絶縁流体として、フロリナート FC-3283 (スリーエムジャパン製) を使用した。図では、被覆されたシリアルリンクと回転ばねと考え、回転ばねのばね係数の変化と回転角度の関係として整理した。図の結果より、小さなトルクでも関節が回転可能であること、封入液量を変えることでばね定数に変化することから、回転に必要なトルクが摩擦係数に依存していることが実験的に明らかになった。

### (3) 実ロボットへの適用 2

(2) で得られた結果が、別の被覆材料にも適用可能であることを明らかにするために、外殻をシリコン素材で製作した魚型水中ロボットを解析した。力学モデルは、図 1, 図 2 で示されるものを使用した。樹脂フィルムによる数値例と同様に、滑りがない場合および滑りがある場合において、シリコンの物性等、実際に物理量を代入し、必要なトルクがどの程度なのかを数値的に確認した。その結果、樹脂フィルムの場合と同様に、シリコンを被覆材量とする場合には、シリコンとリンクの間に滑りを許すことで、発生するトルクが小さいモータでも回転運動が実現できることが明らかになった。



(a) 鋳型による外殻整形 (b) 構成要素

図6 シリコンを外殻とする魚型水中ロボット

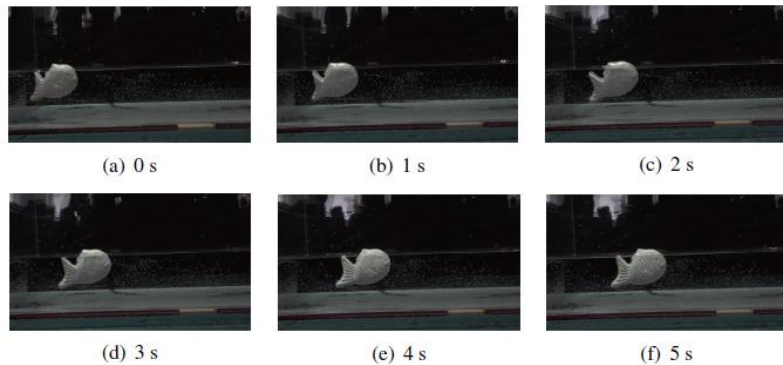


図7 シリコンを外殻とする魚型水中ロボットの動作試験

図6にシリコンを外殻とする魚型水中ロボットの試作機を示す。ここでは、外殻の整形に鋳型を利用し、シリコンとリンクは密着せず、滑り運動を許している。樹脂フィルムによるロボットパッキング法とは異なり、絶縁流体は封入していない。モータは0.1W程度の小型モータを使用した。図7に水中での動作試験の様子を示す。図に示すように、リンクと外殻の滑りを許すことで小型モータでもロボットが動作可能であることが実験的に確認された。したがって、本解析は樹脂フィルムのみならず、別の被覆材料にも適用可能であることを明らかになった。

#### (4) 他アプリケーションへの適用

ロボットパッキング法の応用例として、計測機器のパッキングを試みた。図8に圧力センサを樹脂フィルムにてパッキングした計測機器システムを示す。

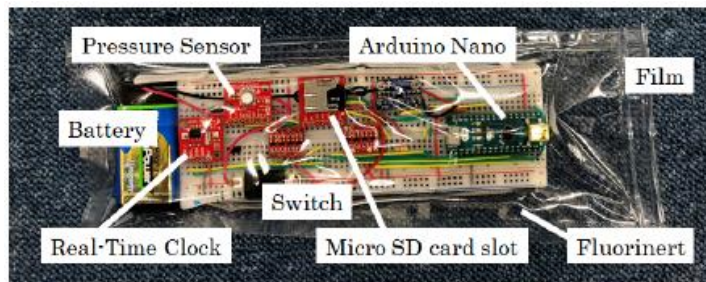


図8 樹脂フィルムで被覆した圧力計測システム

ここでは、樹脂フィルムで被覆した魚型水中ロボットと同様に、樹脂袋内に絶縁流体を封入している。圧力センサはダイヤフラム型（環境によって圧力センサが押される形式）のセンサを使用した。絶縁流体の必要性を確認するために、環境と圧力センサの関係を、(1) 絶縁流体を封入せず、圧力センサが減圧された空気を介して押される場合、(2) 絶縁流体を封入し、圧力センサが減圧された空気と絶縁流体を介して押される場合、(3) 絶縁流体を封入し、圧力センサが絶縁流体を介して押される場合、(4) 絶縁流体を封入せず、圧力センサが樹脂フィルムに直接押される場合に分類した。

この分類に基づき、それぞれ試作機を製作し環境圧（大気圧）を計測した。その結果、絶縁流体を封入し、圧力センサが絶縁流体を介して押される場合が圧力を問題なく計測できることが実験的に明らかになった。本実験より、ロボットパッキング法は、計測機器のパッキングにも適用できる可能性があることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shibata Mizuho	4. 巻 34
2. 論文標題 Fish-Like Robot with a Deformable Body Fabricated Using a Silicone Mold	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 40～46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2022.p0040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田中耀太郎, 柴田瑞穂
2. 発表標題 柔軟薄型素材で被覆されたシリアルリンクの回転角度に対する封入液量の影響
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原和樹, 小谷内範穂, 柴田瑞穂
2. 発表標題 水中ロボット搭載のための充電機能を持つ温度ロガーの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuho Shibata, Norimitsu Sakagami
2. 発表標題 Development of Pressure Measurement Equipment Fabricated by Robot Packaging Method
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中耀太郎, 柴田瑞穂
2. 発表標題 柔軟薄型素材で被覆されたシリアルリンクにおける封入液量と回転角度の関係
3. 学会等名 第29回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田瑞穂, 坂上憲光
2. 発表標題 薄型柔軟素材で被覆されたシリアルリンクロボットのモデル化
3. 学会等名 第37回 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizuho Shibata, Norimitsu Sakagami
2. 発表標題 Modeling of serial link robots covered with a thin flexible film
3. 学会等名 The 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

柔軟外殻水中ロボット  
<http://greenapple.world.coocan.jp/school/work/fish/index-j.html>

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
---------	---------