

令和元年6月10日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14633

研究課題名(和文) 空気圧駆動ソフトアクチュエータの設計基本原理の確立

研究課題名(英文) Establishment of basic design principle of pneumatically driven soft actuator

研究代表者

王 忠奎 (Wang, Zhongkui)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：50609873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 空気圧駆動ソフトアクチュエータの簡略モデルを提案した。最適化方法を用いて、アクチュエータのパラメータを推定した。実験検証も行った。

(2) AbaqusとIsightを用いて、ソフトアクチュエータの有限要素モデルを構築し、逆有限要素最適化プラットフォームを提案した。さらに、ソフトアクチュエータの設計パラメータ最適化を行った。提案した方法の有用性は実験で検証した。

(3) 上記の方法論に基づいて、食品把持用の数種類のソフトロボットグリッパ(プレストレスグリッパ、吸盤を有するグリッパ、包みグリッパ、シェルグリッパ)を提案、試作、実験検証を行った。現在、ソフトグリッパの実用化に向けて研究を行っている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ソフトロボティクスは新しい分野として注目されている。しかし、ソフトロボットのモデリング、設計原理、制御方法などの基礎理論は不十分である。本研究で提案した設計最適化の方法はソフトロボット設計原理の確立に向けての第一歩と考えられる。この方法をさらに発展して、対象物に対するふさわしいロボット設計を実現すると期待できる。

一方、日本では人手不足の問題が深刻化している。食品産業や農林水産業では自動化のニーズが強く求められている。これらの産業に自動化を導入する際に最も困難なのは形状・特性が多様な対象物のハンドリングである。本研究で開発したソフトグリッパは食品把持を目的とし、食産業の自動化に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：(1) A mass-spring-damper model was proposed to simulate pneumatic soft actuator. An optimization-based method was also proposed to estimate the actuator parameters. Experimental tests were conducted to validate the model and method.

(2) By utilizing Abaqus and Isight, finite element models of soft actuators were proposed and an optimization-based platform was constructed. By using this platform, optimization of actuator design parameter was performed and experimental tests were conducted to validate the proposed model and method.

(3) Based on the above-mentioned methodologies, several soft robotic grippers were proposed for handling food materials. The grippers are a prestressed soft gripper, a gripper combining actuation and suction, a wrapping gripper, and a circular hybrid shell gripper. The grippers were fabricated and experimentally tested. Currently, commercialization of the proposed soft grippers is undertaking.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ソフトロボティクス 空気圧駆動アクチュエータ ソフトグリッパ 食品把持 弁当製造自動化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ソフトロボティクスに関する研究が盛んに行なわれている。ソフトロボティクスとは、やわらかい材料で構成され、このやわらかさを積極的に利用したロボットに関する研究である。従来の「堅い」ロボットと比較すると、「しなやかな身体」と「しなやかな動き」を有するソフトロボットは人間と共同作業ができ、壊れやすいものを優しくハンドリングすることが可能であるなど様々なメリットがある一方、設計原理が不足、制御しにくい、力が弱いなどのデメリットも存在する。多くの研究は、異なるソフトアクチュエータ、やわらかいセンサ、様々な形態のソフトロボットを試作し、その機能や挙動を実験的に調べる段階である。ソフトロボティクスに関する研究の発展においては、ソフトロボットの科学(設計学、情報学、物質学)を追究することが必要と認識されている。

(2) 少子高齢化が進んでいる日本では、人手不足の問題が益々深刻化している。ほぼ人手に頼っている食品産業や農林水産業などでは自動化のニーズが強く求められている。これらの産業に自動化を導入する上で最も困難なのは形状および物理特性が多様多様である対象物のハンドリングである。ソフトロボットのメリットをうまく発揮することによって、これらの課題を解決できると考えられる。

2. 研究の目的

(1) ソフトアクチュエータの計算モデルを構築し、実験計測とデータフィッティングによって力学パラメータを推定する。さらに、実験データを用いて、モデルの有効性を検証する。

(2) 検証した計算モデルを用いて、ソフトアクチュエータの設計パラメータの影響を検討する。さらに、最適化方法を利用して、ある条件に満たすときの最適なソフトアクチュエータ設計を実現する。

(3) 上記2点の研究成果を活用して、食品把持用ソフトグリッパを開発する。

3. 研究の方法

(1) マススプリングダンパー(MSD法)を用いて、ソフトアクチュエータの簡略モデルを構築する。ソフトアクチュエータの曲げ変形を実験で計測する。計測データをフィッティングすることによってMSDモデルのパラメータを推定する。

(2) ゴム材料の力学特性(ヤング率)を引っ張り試験機で計測する。有限要素ソフトAbaqusを用いてソフトアクチュエータの有限要素モデルを構築する。引っ張り試験のデータを用いて非線形有限要素モデルのパラメータを獲得する。

(3) AbaqusとIsightを用いて、逆有限要素最適化プラットフォームを構築する。このプラットフォームを利用し、有限要素シミュレーションを繰り返し行うことによって、ソフトアクチュエータの材料最適化と設計最適化を実現する。

(4) 3Dプリンタとキャスト法を用いて、幾つかの食品把持用ソフトグリッパを開発する。様々な食材での把持実験を行い、ソフトグリッパの有用性を検証する。

4. 研究成果

(1) ゴム材料で製作したソフトアクチュエータ(図1)の変形をモデリングするため、図2に示すMSDモデルを提案した。質量(m)、ばね(k)、ダンパー(c)を用いて、ソフトアクチュエータの変形特性を表す。動力学モデルを構築し、最適化に基づくパラメータ推定法を提案した。実験で計測したアクチュエータの変形を用いて、パラメータ推定を行い、シミュレーションでアクチュエータの変形を再現した(図3)。

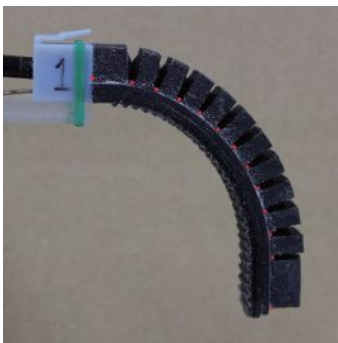


図1. ソフトアクチュエータ

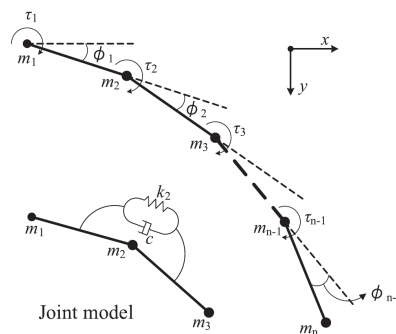


図2. MSD簡略モデル

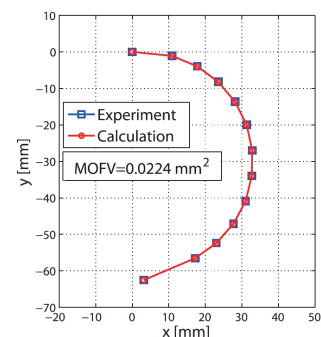


図3. モデルでの再現

(2) 引っ張り試験機(AG-10kNplus)を利用して、ゴム材料の引っ張り試験を行い、非線形モデルのパラメータを獲得した。Abaqusを用いて、ソフトアクチュエータの有限要素モデルを構築した。実験で異なる設計のソフトアクチュエータの変形(図4)を計測し、有限要素シミュレーションでアクチュエータの変形を再現した(図5)。



図 4. 異なる設計のソフトアクチュエータの変形

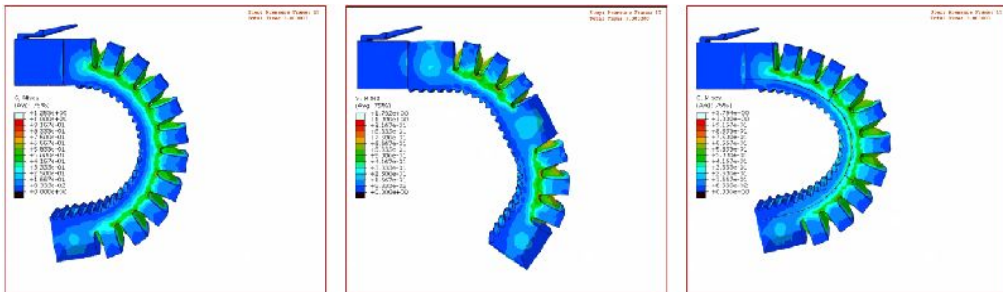


図 5. 有限要素シミュレーションでの変形再現

(3) ソフトアクチュエータの最適な設計を検討するため、Abaqus と Isight を連携させ、逆有限要素最適化プラットフォーム (図 6) を提案した。同じサイズのアクチュエータが空気チャンバーの寸法を最適化した結果、変形が約 2 倍、発生把持力が約 1.9 倍に増えたことを確認できた (図 7)。チャンバー壁の厚さが薄ければ薄いほど、チャンバー間の隙間が小さければ小さいほど、アクチュエータが曲がりやすくなり、発生把持力が増加することが分かった。

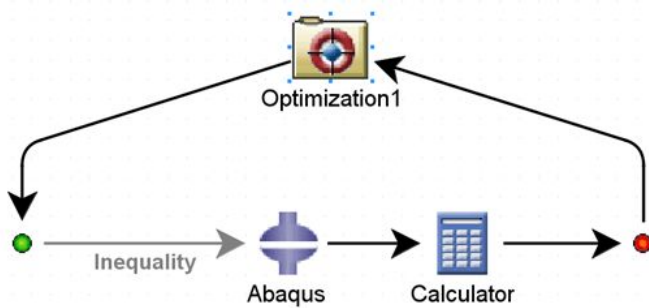


図 6. 逆有限要素最適化プラットフォーム

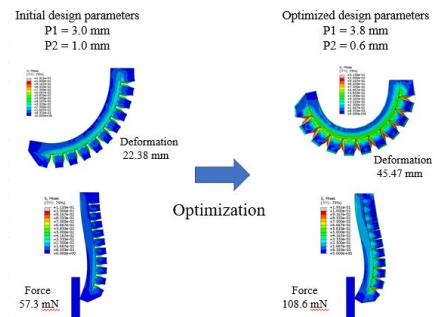


図 7. 設計最適化の結果

(4) 負圧をかけずにソフトグリッパの初期状態を広げるため、プレストレスソフトグリッパを提案した。柔軟指を製作する際 (図 8)、チャンバー部分を伸ばしてカバー部と接着することによって、残留ストレスで柔軟指がチャンバー側に曲がるようになり、グリッパ初期状態を広げる。プレストレスソフトグリッパは、対象物を把持するとき、負圧から正圧への切り替え動作が不要なので、より優しい把持ができるという特徴がある。プレストレスグリッパを用いて、様々な食品材料の把持実験を行った (図 9)。

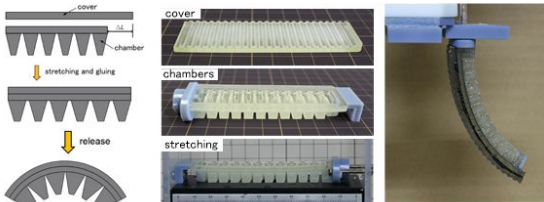


図 8. プレストレス柔軟指の製作

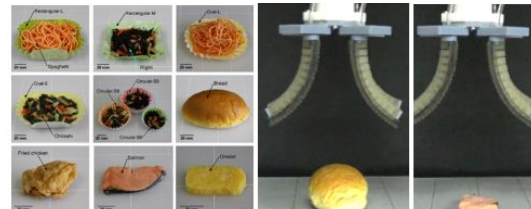


図 9. プレストレスグリッパでの食品把持

(5) 細断された食材 (ネギ, サラダ, コーン, ひじきなど) を把持するため、包みグリッパを提案した (図 10)。縦方向と横方向のチャンバーがあり、空気圧を印加すると、柔軟指が二方向に曲がり、球体のように閉じる。この特徴を活用して、細かい食材を包み込むように把持することができる。包みグリッパを用いて、千切りネギ, コーン, 塩の把持実験を行った (図 11)。現在、実用化に向けて試作品を作っている。

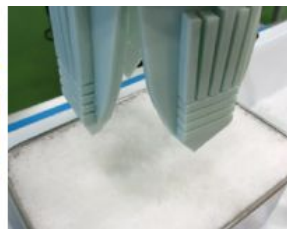
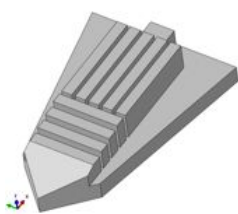


図 10. 包みグリップ

図 11. 包みグリップでコーンと塩の把持実験

(6) 吸着のメリットを発揮するため、柔軟指の先端に吸着パッドを取り付け、図 12 に示す吸盤を有する柔軟指を提案した。このグリップを用いたら、図 13 のように、掴むと吸着の二つの把持モードができ、把持できる対象物の種類はさらに広がる。

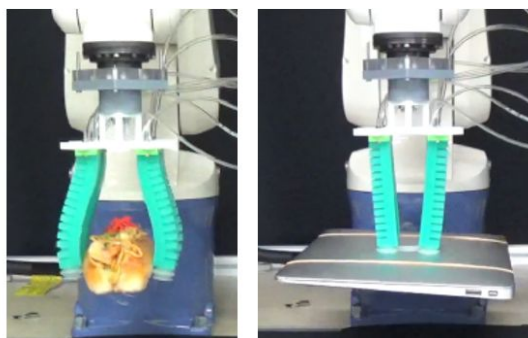
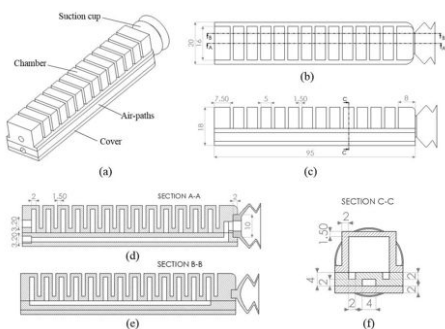


図 12. 吸盤を有する柔軟指

図 13. 掴むと吸着両方できるグリップ

(7) 重くて柔らかい対象物を安定的に把持するため、柔軟チャンバーと固い外皮を有するシェルグリップを開発した(図 14)。シェルグリップは対象物と接触面積が大きく、低い空気圧で大きい把持力を発生することができ、重くて柔らかい対象物を把持できるという特徴がある。シェルグリップを用いて、大福(100g)と缶ジュース(540g)の把持実験を行った(図 15)。

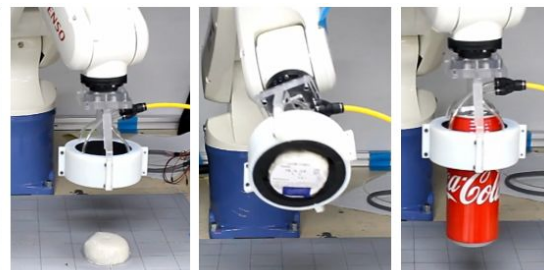
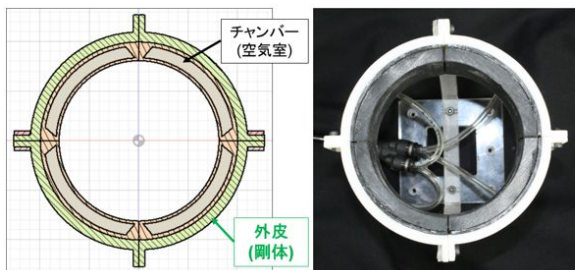


図 14. シェルグリップの断面図と実機

図 15. 大福と缶ジュースの把持実験

(8) 対象物サイズのばらつきに対応するため、剛性と有効把持エリアを調整可能な柔軟指を提案した。また、Abaqus を利用して、京都府立医科大学の外科医と連携し、扁平足のモデリングと手術シミュレーションに関する研究も行った。手術パラメータの影響を有限要素シミュレーションで検討し、患者固有な手術計画に向けて研究を行ってきた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, Kaspar Althoefer, Shinichi Hirai, Adaptive Update of Reference Capacitances in Conductive Fabric Based Robotic Skin, IEEE Robotics and Automation Letters, 査読有, Vol. 4, No. 2, 2019, pp.2212-2219. DOI: 10.1109/LRA.2019.2901991

平井慎一, 王忠奎, ホ アン ヴァン, 松野孝博, センサ技術から見たソフトロボティクス, 日本ロボット学会誌, 査読無, Vol.37, No.1, 2019, pp.22-25. DOI:10.7210/jrsj.37.22

王忠奎, 有限要素法を用いた扁平足のモデリングと手術シミュレーション 患者固有の手術に向けて, 可視化情報学会誌, 査読無, Vol.39, No.152, 2019, pp.25-30.

Takahiro Matsuno, Shinichi Hirai, and Zhongkui Wang, Vibration Analysis of Food Material for Non-contact Viscoelasticity Measurement, International Journal of Food Engineering, 査読有, Vol.4, No.4, 2018, pp.283-287. DOI:10.18178/ijfe.4.4.283-287

Zhongkui Wang, Masamitsu Kido, Kan Imai, Kazuya Ikoma, and Shinichi Hirai, Towards Patient-Specific Medializing Calcaneal Osteotomy for Adult Flatfoot: A Finite

Element Study, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 査読有, Vol. 21, No. 4, 2018, pp. 332-343. DOI 10.1080/10255842.2018.1452202

Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Grasping State Estimation of Printable Soft Gripper Using Electro-Conductive Yarn, Robotics and Biomimetics, 査読有 Vol. 4, No. 13, 2017. DOI:10.1186/s40638-017-0072-4

Zhongkui Wang, Mingzhu Zhu, Sadao Kawamura, and Shinichi Hirai, Comparison of Different Soft Grippers for Lunch Box Packaging, Robotics and Biomimetics, 査読有, Vol. 4, No. 10, 2017. DOI:10.1186/s40638-017-0067-1

Van Anh Ho, Hideyasu Yamashita, Zhongkui Wang, Shinichi Hirai, Koji Shibuya, Wrin' Tac: Tactile Sensing System with Wrinkle's Morphological Change, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 査読有, Vol. 13, No. 5, 2017, pp. 2496-2506, DOI: 10.1109/TII.2017.2718660

Zhongkui Wang, Yuuki Torigoe, and Shinichi Hirai, A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling, IEEE Robotics and Automation Letters, 査読有, Vol. 2, No. 4, 2017, pp. 1909-1916. DOI:10.1109/LRA.2017.2714141

Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Soft Gripper Dynamics Using a Line-Segment Model with an Optimization-Based Parameter Identification Method, IEEE Robotics and Automation Letters, 査読有, Vol. 2, No. 2, 2017, pp. 624-631. DOI:10.1109/LRA.2017.2650149

[学会発表](計 14 件)

Yoshiyuki Kuriyama, Yuusuke Okino, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, A Wrapping Gripper for Packaging Chopped and Granular Food Materials, 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics, 2019.

Yuki Mimori, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, A Novel Binding Hand with Closed Loop Thread Capable of Grasping Small-Diameter Objects, 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics, 2019.

Ikumi Okada, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Gripping Force Modeling of a Binding Hand, 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics, 2019.

Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Geometry and Material Optimization of a Soft Pneumatic Gripper for Handling Deformable Object, 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2018.

Muhammad Hisyam bin Rosle, Ryo Kojima, Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Soft Fingertip with Tactile Sensation for Detecting Grasping Orientation of Thin Object, 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2018.

Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, A Soft Gripper with Adjustable Stiffness and Variable Working Length for Handling Food Material, 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, 2018.

Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Chamber Dimension Optimization of a Bellow-Type Soft Actuator for Food Material Handling, The First IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics, 2018.

Takahiro Matsuno, Shinichi Hirai, and Zhongkui Wang, Vibration Analysis of Food Material for Non-contact Viscoelasticity Measurement, 2018 5th International Conference on Chemical and Food Engineering, 2018.

Mingzhu Zhu, Zhongkui Wang, Kawamura Sado, and Shichichi Hirai, Design and Fabrication of a Soft-Bodied Gripper with Integrated Curvature Sensors, IEEE 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2017.

Zhongkui Wang, Yuuki Torigoe, and Shinichi Hirai, A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017.

Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Real-time Curvature Estimation of Printable Soft Gripper using Electro-conductive Yarn, 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, 2017.

Zhongkui Wang, Mingzhu Zhu, Sadao Kawamura, and Shinichi Hirai, Fabrication and Performance Comparison of Different Soft Pneumatic Actuators for Lunch Box Packaging, 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, 2017.

Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Soft Gripper Dynamics Using a Line-Segment Model with Optimization-Based Parameter Identification Method, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017.

Van Ho, Hideyasu Yamashita, Zhongkui Wang, Shinichi Hirai, Koji Shibuya, Morphological Computation in Tactile Sensing: The Role of Wrinkle, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017.

〔図書〕(計 3 件)

Zhongkui Wang, Shouta Yamae, Masamitsu Kido, Kan Imai, Kazuya Ikoma, Shinichi Hirai. Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. pp. 248-259, vol 98. Springer, Cham. 2018.

ロボット制御学ハンドブック(第28.6節), 松野 文俊, 大須賀 公一, 松原 仁, 野田 五十樹, 稲見 昌彦(編集), 近代科学社, 第28.6節, 880-886頁, 2017年.

Zhongkui Wang, Kousuke Kadoma, Shinichi Hirai. Innovation in Medicine and Healthcare 2017. pp. 121-129, vol 71. Springer, Cham. 2017.

〔産業財産権〕

出願状況(計 3 件)

名称: 把持装置

発明者: 平井 慎一, 王 忠奎, 鐘江 峻

権利者: 学校法人 立命館

種類: 特許

番号: 特許願 2018-206158

出願年: 2018

国内外の別: 国内

名称: 粘弾性計測装置および粘弾性計測方法

発明者: 平井 慎一, 松野 孝博, 王 忠奎

権利者: 学校法人 立命館

種類: 特許

番号: 特許願 2018-062184

出願年: 2018

国内外の別: 国内

名称: 空気圧アクチュエータ及び空気圧アクチュエータを備えたグリッパ

発明者: 平井 慎一, 王 忠奎

権利者: 学校法人 立命館

種類: 特許

番号: 特許願 2017-186729

出願年: 2017

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 鳥越 祐輝, 栗山 佳之, 鐘江 峻

ローマ字氏名: Torigoe Yuuki, Kuriyama Yoshiyuki, Kanegae Ryo

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。