

接触位置を考慮したソフトハンドのプリグラスプ変形推定

Pre-grasp Deformation Estimation of Soft Robotic Hand Considering Contact Position

○ 甲斐 亮吾 (中央大学) 正 磯邊 柚香 (中央大学)
Sarathak Pathak (中央大学) 正 梅田 和昇 (中央大学)

Ryogo KAI, Chuo University, kai@sensor.chuo-u.ac.jp

Yuzuka ISOBE, Chuo University

Sarathak PATHAK, Chuo University

Kazunori UMEDA, Chuo University

This paper proposes a vision-based method for estimating the deformation of a soft robotic hand before grasping an object. Due to the softness of a soft robotic hand, it can adapt and fit to the shape of objects, which enables stable grasping of various objects. However, because of the grasping position and object shape, the hand may not grasp an object in a stable manner. Therefore, it is important to calculate whether the hand can adapt to the object shape prior to grasp, which requires estimating the deformation of the hand. In our method, the deformation model of the hand is introduced. Then, calibration is performed using the image to obtain specific parameter of the hand. Finally, based on the deformation model and predicted contact points, the deformation of the entire hand is estimated. An experiment was conducted to evaluate the accuracy of the proposed method.

Key Words: Robot vision, Soft Robot hand, Manipulation, Image Processing

1 序論

工場における人手不足解決のために、ロボットの導入による自動化が進んでいる。自動化において、機械部品や食品など、多品種の物体を把持することが求められている。そこで注目されているのがソフトハンドである [1]。ソフトハンドは、従来の剛体リンクによって構成されたロボットハンドとは異なり、柔軟な素材や機構によって構成されたハンドである。その柔軟さゆえに、物体形状になじみながら変形することができるため、様々な物体を把持することができる。また、物体形状になじむことで、ハンドと物体間での接触領域が大きくなる。これによって、摩擦力の増大によって物体を安定的に把持できるようになる。加えて、局所的な力の発生を防ぐことで食品などの傷つきやすい物体も把持することが可能となる。

しかし、ソフトハンドの把持時の姿勢によっては、物体形状になじむように把持できない場合がある [2, 3]。ゆえに、不安定な把持状態となり、物体を落下させてしまうおそれがある。このとき、把持力を増大することや、物体を再把持することでの対策が考えられる [3, 4, 5]。しかし、これらの対処法では物体と接触するために、食品をはじめとする柔軟物体などでは傷をつけてしまう可能性がある。

物体を傷つけないようにするため、プリグラスプ動作が注目されている。プリグラスプ動作とは、物体把持前にハンドと物体の相対位置や姿勢を推定し、安定把持が可能となるハンドの位置に修正する動作のことを指す。この動作で重要なのが、ハンドと物体の接触を推定することである。それは、接触の仕方によっては安定的な把持ができないことがあるためだ。そこで、剛体ハンドにてプリグラスプ動作を行う際は、ハンドにセンサを取り付けることで物体形状を取得し、最適な接触位置となるように修正している [6, 7]。しかし、ソフトハンドでプリグラスプ動作を行う際、剛体ハンドと異なりハンド自体の変形を考慮した接触位置の推定が必要になる。ここでソフトハンドは、図 1 のように、接触位置や物体形状によって変形の仕方が異なる。そこで、ソフトハンドでプリグラスプ動作を行うためには、ソフトハンドの変形を把持前に推定する、プリグラスプな変形推定が必要になる。

ソフトハンドの変形推定の方法は大きく 2 種類ある。1 つ目は、内界センサを用いた方法である [8, 9]。これは、ソフトハンド内に搭載したセンサの値変化から、ソフトハンド全体の変形を推定するものである。しかし、実際にハンドが変形しないと、変形を推定できないという課題がある。2 つ目は、外界センサを用いた方法である [10, 11]。しかし、これらの研究においても、実際に変形した後の状態取得が主目的となっている。加えて、物体を把

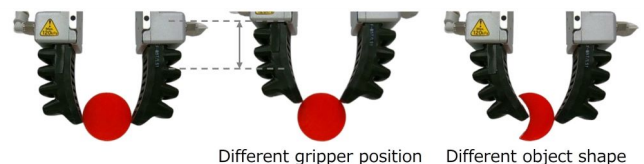


Fig.1 The differences in the deformation of a soft robotic hand

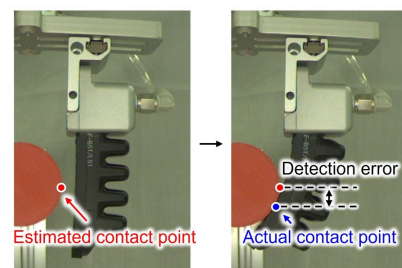


Fig.2 Difference between estimated and actual contact points

持した際の変形までは考慮されていない。

本論文では、画像を用いて、ソフトハンドの変形を把持前に推定する手法を提案する。ハンド位置と物体形状から、ハンドと物体の接触位置を高精度に予測することで、物体把持時のハンドの変形を把持する前に推定する。

2 先行研究の課題

先行研究 [12] では、物体形状から接触点の推定を行うことで、ハンドの変形推定を行っていた。このとき、ハンドは画像の水平方向に変形するという前提を設けていた。そのため、図 2 の赤点のように、物体形状の水平方向の最端点のうちハンドに近い点を把持後に接触する点として推定していた。しかし、実際の接触点は図 2 の青点となっており、推定した接触点と実際の接触点で誤差があった。図 1 において接触点によってハンドの変形の仕方が変わるように、接触検出の誤差が変形推定の結果に影響する。そこで、物体形状のみならず、ハンドの変形を考慮した接触位置の推定を行うことで、高精度に変形推定を行う。

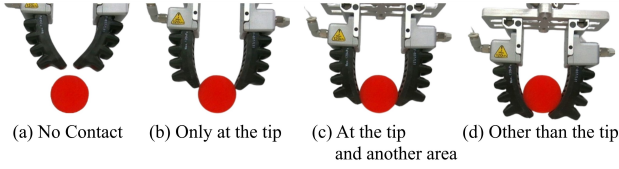


Fig.3 Deformation cases

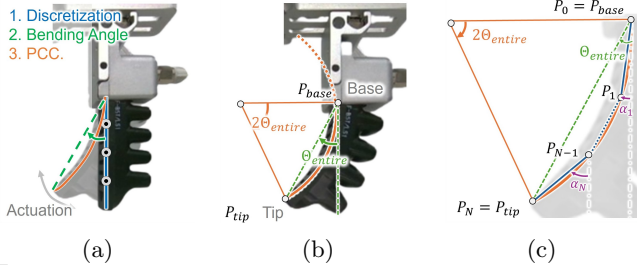


Fig.4 Deformation model of the soft robotic hand. (a) Approaches used for the model, (b) Bending angle and PCC, (c) Bending angle α_i

3 提案手法

第1章で述べたように、ハンドと物体の接触の有無、また物体の形状や接触位置によってハンドの変形の仕方は異なる。変形の仕方は、図3の4種類に大別できる。図3(a)は物体とハンドが接触しない場合を示している。物体と接触する場合は、接触位置がハンドの指先のみ(図3(b))、指先とその周辺領域(図3(c))、指先以外の領域(図3(d))となる。同じ物体を把持する場合でも、接触位置によってハンドの変形は異なる。ここで、本研究では接触位置の推定に着眼する。算出した接触位置をもとに、先行研究[12]の手法を用いてハンドの変形推定を行う。

3.1 ハンドのモデル化

接触点を推定するために、ハンドと物体の両方の輪郭を利用する。このとき、ハンドがどのように変形しながら物体に接触するかを推定する。そこで、先行研究[12]にて導出したソフトハンドの変形モデルを利用する(図4(a))。この変形モデルでは、ハンド全体を剛体-バネ関節直列モデル[13]によって離散化し、離散化したリンクの挙動からハンド全体の変形を推定する。離散化したリンクの挙動は、ハンド全体の曲がりやすさを表す曲げ角度[14]および一区分的に一定曲率で変形するPiecewise Constant Curvature (PCC) モデル[15]に従う。このとき、各リンクの長さ L_{link} と角度を用いることで、リンクの挙動を表現できる。

ハンド全体の長さは、変形中も一定であると仮定し[13]、 L_{hand} と定義する。ハンド全体は N 個の剛体リンクに離散化され、これらのリンクはすべて長さが等しく、個々のリンク自体は変形しないとする。このとき、各リンクの長さ L_{link} は次式によって求まる。

$$L_{link} = \frac{L_{hand}}{N}. \quad (1)$$

続いて、曲げ角度を算出する。ハンド全体の曲げ角度は、図4(b)の緑色の矢印で示すように Θ_{entire} で一定とする。ここでPCCモデル[15]を適用すると、ハンドは図4(b)のオレンジ色の円弧で示す、ハンドの根元点 P_{base} と指先点 P_{tip} を通る、中心角 $2\Theta_{entire}$ の円弧とみなすことができる。離散化された N 個のリンクは、図4(c)の青線のように、リンクの各関節位置 P_{i-1} ($i \in \{1, 2, \dots, N\}$) が円弧上に分布する。このとき、鉛直軸と i 番目のリンクとの間の角度として求まる、各リンクの局所的な曲げ角度 α_i (図4(c)中の紫色の矢印)は、次式によって求まる。

$$\alpha_i = \frac{2\Theta_{entire}}{N}(2i-1). \quad (2)$$

以上より、式1と式2を用いて各リンクの挙動を算出することで、ハンド全体の変形を推定することができる。

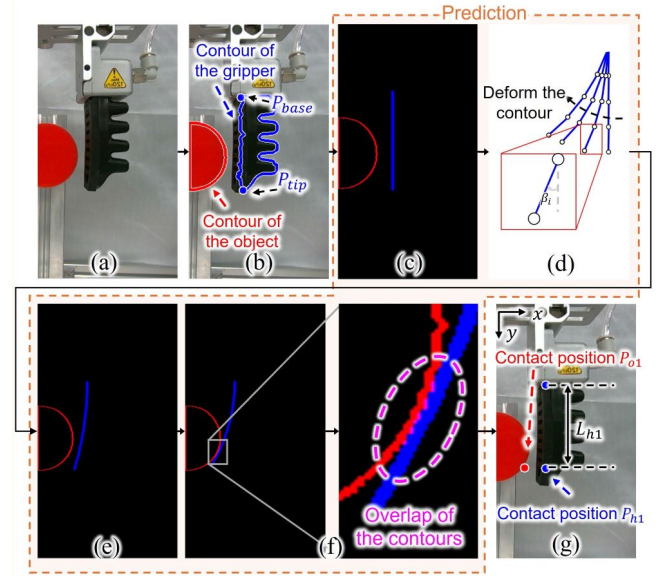


Fig.5 Method for estimating first contact point. (a) Input image, (b) Obtained regions of the hand and the object, (c) Drawing of the contours on the black image, (d) Rotating of the discretized links, (e) Overlapping of the contours, (f) Estimated first contact point for the hand and the object.

3.2 接触位置の推定

接触点を推定するために、ハンドと物体の両方の輪郭を利用する。まず図5(a)に示す入力画像をHSV画像に変換する。その後、閾値処理を行うことで、図5(b)中の青線と赤線のように、ハンドと物体の領域をそれぞれ抽出する。得られたハンド領域において、鉛直方向の最端点を算出することで、根元点 $P_{base} = (x_{base}, y_{base})$ および指先点 $P_{tip} = (x_{tip}, y_{tip})$ を算出する。2点 P_{base} と P_{tip} を用いることで、ハンド全体の長さ L_{hand} は次式によって求めることができる。

$$L_{hand} = \sqrt{(x_{base} - x_{tip})^2 + (y_{base} - y_{tip})^2}. \quad (3)$$

ソフトハンドの場合、輪郭の一部のみが物体に接触する可能性がある。そこで物体に接触し得る部分を抽出し、図5(c)の青い線で示すように、 P_{base} と P_{tip} の間の線分として近似する。また物体の輪郭は図中の赤線で示されている。続いて、図5(c)の青線で示す P_{base} と P_{tip} を結ぶ線を N 個の剛体リンクに離散化する。そして、各リンクの関節を中心に同じ角度だけ徐々に回転させる。具体的には、図5(d)および(e)のように、鉛直軸と i 番目の線との間の角度 β_i が徐々に増加するように回転させる。なお、 β_i は i 番目のリンクごとに同じ値であり、式2中の曲げ角度の値を0から Θ_{entire} の範囲内で変化させることで求めている。この回転を続けると、あるリンクに対応する画素と物体の輪郭が画像上で重なることがある。図5(f)において、輪郭の重なりがマゼンタ色の画素によって表現されている。重なり合う画素のうち、 P_{base} に最も近い x 座標位置を持つ画素が、最初の接触点であると推定する。図5(g)において、青点で示される P_{h1} と P_{o1} は、それぞれハンドと物体上の最初の接触点の推定位置を示す。

続いて、ハンド上の推定された接触点 P_{h1} に基づき、図3のどの場合の接触が生じるかを求める。図5(g)の黒矢印で示す、接触点 $P_{h1} = (x_{h1}, y_{h1})$ と根元点 P_{base} との距離 L_{h1} は次式により算出される。

$$L_{h1} = \sqrt{(x_{base} - x_{h1})^2 + (y_{base} - y_{h1})^2} \quad (4)$$

このとき、ハンド上の全リンク N のうち、接触するリンク N_{h1} は次式によって求まる。

$$N_{h1} = \frac{L_{h1}}{L_{hand}} N \quad (5)$$

ここで、 P_{h1} が検出されず、 N_{h1} が計算されない場合、ハンドは物体と接触しないことを示す(図3(a))。 $N_{h1} = N$ の場合、ハン

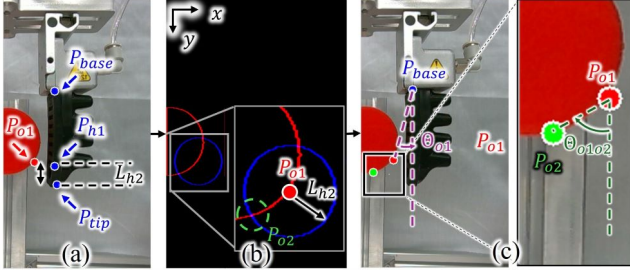


Fig.6 Method for estimating another contact point. (a) Distance L_{h2} between P_{h1} and P_{tip} , (b) Drawing of a circle for this prediction point P_{o2} , (c) Definition of the angles Θ_{o1} and Θ_{o1o2}

ドは指先のみで接触することを示す(図 3(b)). $N_{h1} < N$ の場合, ハンドは指先とその周辺領域(図 3(c)), あるいは指先以外の領域(図 3(d))となる. なお $N_{h1} < N$ の場合, P_{h1} で対象物に接触した後もハンドは閉じる方向に変形し続ける可能性がある. そのためこの変形を予測し, ハンドは指先とその周辺領域(図 3(c))か, 指先以外の領域(図 3(d))を求める必要がある.

もう一つの接触点は, ハンドの長さや曲げ角度によって算出される. まず, 図 6(a) の黒矢印で示す, ハンド上の最初の接触点 P_{h1} と指先点 P_{tip} 間の距離 L_{h2} を算出する. 次に, 図 6(b) のように, 物体の輪郭と, 物体上の接触点 P_{o1} を中心とした半径 L_{h2} の円を, それぞれ赤色と青色で黒背景の画像上に描画する, この 2 本の線の重なる画素のうち, y 座標位置が最も大きい点 P_{o2} が, 図 6(b) 緑色の丸のように算出される. 次に, ハンド全体の曲げ角度を考慮して, ハンドの指先が算出した接触点 P_{o2} まで変形できるかを算出する. ここで, Θ_{o1o2} と Θ_{remain} の 2 つの角度を用いる. Θ_{o1o2} は, 図 6(c) の緑矢印で示すように, 最初の接触点 P_{o1} から次の接触点 P_{o2} に変形するまでに必要な角度である. Θ_{remain} は, 最初の接触点 P_{h1} で物体に接触した後, ハンドが残りどの程度曲がることを表す角度である. Θ_{remain} を求めるため, 図 6(c) の紫色の矢印で示すように, 最初の接触点 P_{o1} と根元点 P_{base} のなす角度 Θ_{o1} を取得する. 全体の曲げ角度 Θ_{entire} と取得した角度 Θ_{o1} を用いれば, Θ_{remain} は次式によって求められる.

$$\Theta_{remain} = \Theta_{entire} - \Theta_{o1} \quad (6)$$

$\Theta_{remain} \geq \Theta_{o1o2}$ の場合, ハンドは Θ_{o1o2} だけ変形することができる. ゆえにハンドの指先は P_{o2} と接触することになり, 接触位置は指先と周辺領域となることがわかる(図 3(c)). 一方で, $\Theta_{remain} < \Theta_{o1o2}$ であれば, ハンドの指先以外の領域が接触することになる(図 3(d)).

以上によって算出された接触位置および変形パターンをもとに, 先行研究 [12] によってハンド全体の変形を推定する.

4 実験

提案手法の有効性を検証するために, 先行研究 [12] と提案手法による変形推定精度の比較実験を行った.

4.1 評価方法

本実験では, 先行研究 [12] と提案手法においてそれぞれ, 1. 変形推定値の誤差, 2. 変形推定の再現性を評価する. ここで, 先行研究 [12] および提案手法により得られた推定値と実際の観測値の誤差の平均と標準偏差を算出し, 評価する. 推定値は, 提案手法によるハンドの変形推定後の, 離散化された N 個の剛体リンクの関節の位置を指す. なお変形推定は, ハンドがブリグラスプな状態, すなわち物体把持前の指が開いた状態で実施する. 一方で観測値は, 実際にハンドを閉じるように動かし, その時のハンドの輪郭を N 分割した輪郭上の点とする. 推定値を $p_{i,est} = (x_{i,est}, y_{i,est})$, 観測値を $p_{i,obs} = (x_{i,obs}, y_{i,obs})$ としたとき, 推定値と観測値の誤差 ϵ_i は, 次式で求まる.

$$\epsilon_i = \sqrt{(x_{i,est} - x_{i,obs})^2 + (y_{i,est} - y_{i,obs})^2} \quad (7)$$

本論文では, ハンド全体の真ん中のリンクにあたる $i = N/2$, 指先にあたる $i = N$ の 2 箇所について, 誤差 ϵ_i を評価する.

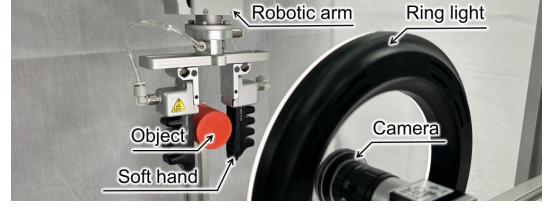
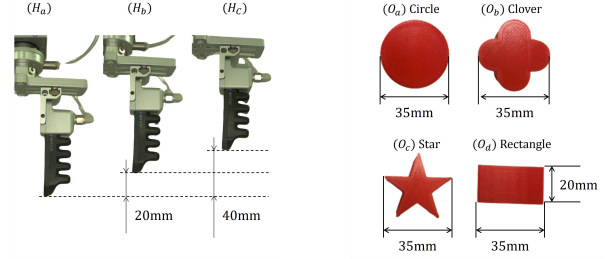


Fig.7 Experimental environment



(a) Position of the hand (b) Object
Fig.8 Experimental conditions

4.2 実験環境

実験環境を図 7 に示す. 本実験では, ソフトハンドに Shenzhen Yuejiang Technology 社の DOBOT MG400 Soft Gripper Kit, カメラに Basler 社の acA1300-200uc, レンズに Edmund Optics 社の UC シリーズ固定焦点距離レンズ 4mm を用いた. なおハンドの長さは 52mm であり, カメラからハンドまでの距離は 14mm とした.

4.3 実験条件

接触位置を変えるために, 図 8(a) に示す 3 段階の高さで, 先行研究 [12] および提案手法による推定と, 観測値取得のためのハンドの開閉動作を各 5 回行った. 把持物体は, 先行研究 [12] で扱った, 図 8(b) に示す 3D プリンタで作成した 4 種類の物体を扱った. また本実験では, ハンドの離散数を $N = 10$ とした.

4.4 実験結果

実験結果を表 1 に示す. これらの値は, カメラからハンドまでの距離 14mm, カメラの焦点距離 4mm を用いて算出した. また高さ H_a における, 各物体を把持したときの変形推定例を図 9 に示す. 図中の青点は推定値, 緑点は観測値を重ね書きしたものである. 図 9 の上部が先行研究 [12] で, 下部が提案手法で推定値と観測値を比較したものとなっている.

推定誤差の平均は, 先行研究 [12] では 1.0 ~ 2.5 mm であるのに対し, 提案手法では 0.7 ~ 1.7 mm となった. これより, 推定誤差が小さくなったことが確認された. またすべての物体および接触位置において先行研究よりも誤差が小さくなった. これは提案手法によって接触位置が精度高く推定されることで, 図 9 上部に示す指先付近の推定値と観測値の誤差を減少できたことが影響していると考えられる. これより, 接触位置の推定精度向上による, ハンド全体の変形推定精度の向上が確認された. ハンドの離散数を大きくすることにより, 接触位置をより高精度に推定でき, それによる変形推定精度の向上が期待できる.

5 結論

本論文では, 画像を用いて, 物体把持時のソフトハンドの変形を把持前に推定する手法を提案した. その際, ソフトハンドの位置と物体形状を画像から取得し, ハンドの変形モデルを用いることで, ハンドの変形を考慮した接触位置推定を行った. 実験では, 先行研究と提案手法とでハンドの変形推定の誤差を比較した. 先行研究では, 推定誤差が 1.0 ~ 2.5 mm であったのに対し, 提案手法では 0.7 ~ 1.7 mm となった. これにより, 接触位置の推定精度の向上による, ハンドの変形推定の精度向上が確認された.

今後は, 提案手法を用いた把持安定性の評価を行うことを目指す. 変形推定と把持安定性の評価を組み合わせることで, ブリグラスプ動作の実現を目指す.

Table 1 Estimation errors in previous research and proposed method

Object	i	Previous research [12]		Proposed method	
		Mean [mm]	Standard deviation [mm]	Mean [mm]	Standard deviation [mm]
Circle	5	1.7	1.0	1.7	1.1
	10	2.3	0.9	1.2	0.8
Clover	5	1.4	0.8	1.3	1.0
	10	2.4	1.0	1.6	0.6
Rectangle	5	1.5	1.0	1.5	0.9
	10	2.5	1.7	1.6	0.5
Star	5	1.0	0.2	0.7	0.4
	10	1.2	0.4	1.2	0.4

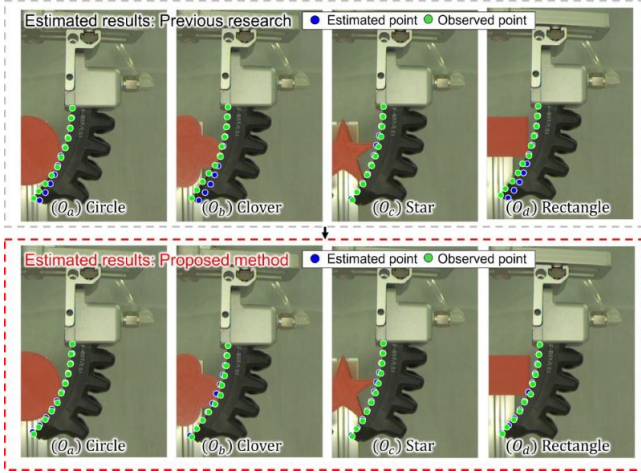


Fig.9 Examples of the results of previous research and proposed method.

参考文献

- [1] J. Shintake *et al.*, “Soft Robotic Grippers”, *Advanced Materials*, Vol. 30, No. 29, pp. 170735, 2018.
- [2] H. Jang *et al.*, “Soft finger dynamic stability and slip by Coulomb friction and bulk stiffness”, *arXiv:2310.04846*, 2023.
- [3] W. Park *et al.*, “A Sensorized Hybrid Gripper to Evaluate a Grasping Quality Based on a Largest Minimum Wrench,” in *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 3243–3250, 2020.
- [4] K. Harada *et al.*, “Stability of soft-finger grasp under gravity,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 883–888, 2014.
- [5] P. M. Khin *et al.*, “Development and Grasp Stability Estimation of Sensorized Soft Robotic Hand,” *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 8, 2021.
- [6] M. V. Liarakapis and A. M. Dollar, “Post-Contact, In-Hand Object Motion Compensation With Adaptive Hands,” in *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 456–467, 2018.
- [7] M. Bowman and X. Zhang, “Dynamic Pre-Grasp Planning when Tracing a Moving Object Through a Multi-Agent Perspective,” *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 9408–9414, 2021.
- [8] Yan, L *et al.*, “Curvature Estimation of Soft Grippers Based on a Novel High-Stretchable Strain Sensor with WormSurface-like Microstructures,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 24, No. 4, 2024.
- [9] T. Matsuno *et al.*, “Real-time curvature estimation of printable soft gripper using electro-conductive yarn,” *IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics*, pp. 5–10, 2017.
- [10] Yan, L *et al.*, “Curvature Estimation of Soft Grippers Based on a Novel High-Stretchable Strain Sensor with WormSurface-like Microstructures,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 24, No. 4, 2024.
- [11] H. N. Le *et al.*, “Behavior Analysis of Soft Pneumatic Actuator Gripper by using Image Processing Technology,” *IEEE Int. Conf. on Mech. and Automation (ICMA)*, pp. 1798–1802, 2020.
- [12] 甲斐亮吾ら, “画像を用いたソフトハンドの変形推定,” 第 29 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 6D2, pp. 344–349, 2024.
- [13] 鈴森康一ら, “ソフトロボット学入門 -基本構成と柔軟物体の数理”, オーム社, pp.47–51, 2023.
- [14] Q. Jiang and F. Xu, “Design and Motion Analysis of Adjustable Pneumatic Soft Manipulator for Grasping Objects,” in *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 191920–191929, 2020.
- [15] R. Webster III *et al.*, “Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review”, *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 13, pp. 1661–1683, 2010.