

画像を用いたソフトハンドの変形推定

甲斐 亮吾^{*1}, 磯邊 柚香^{*1}, PATHAK Sarthak^{*2}, 梅田 和昇^{*2}

Deformation Estimation of a Soft Robotic Hand based on Camera Images

Ryogo KAI^{*1}, Yuzuka ISOBE^{*1}, Sarthak PATHAK^{*2} and Kazunori UMEDA^{*2}

^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*2} Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

This paper presents a novel method to estimate the deformation of a soft robotic hand based on camera images. A soft robotic hand is widely used because it can grasp a variety of objects with different shapes and sizes. One of the characteristics of a soft robotic hand is its adaptability. It enables increasing the contact area which causes secure grasping of objects. Thus, it is important to grasp an object in a way that the hand adapts to the object's shape. However, the deformation of the hand depends on the shape of the object and the grasping position. Therefore, it is necessary to estimate how the hand deforms for each grasp. In this paper, the deformation of a soft robotic hand is predicted from camera images. First, the image of whole the hand is used to calculate the bending angle of the soft hand. Then, the hand is discretized into multiple links. Constraints are given for the discretized links by bending angle and deformation at constant curvature. The deformation of the entire hand is estimated by predicting the contact position and calculating the behavior of each link according to the constraint conditions.

Key Words : Robot Vision, Soft Robot, Soft Hand, Image Processing

1. 緒 言

人手を必要としている組み立て工場や食品工場では、ロボットアームやロボットハンドの導入による自動化が進んでいる。工場において様々な種類や形状の物体を把持するため、従来の硬い素材によって構成されたロボットハンドとは異なり、柔らかい素材によって構成されたソフトハンド⁽¹⁾が注目を集めている。

ソフトハンドの特徴の1つに、物体形状になじむことが挙げられる。ソフトハンドが物体形状に沿って変形することで、ハンドと物体の接触領域が大きくなる。ゆえに、摩擦力の向上や物体の幾何的拘束の増加が期待でき、物体を落とさずに把持することが可能となる。加えて、局所領域に把持力が加わることを防げるため、物体を傷つけずに把持することも可能となる。

しかしながら、把持位置によっては、ソフトハンドが物体形状に沿って変形せず、接触領域が大きくならないことも考えられる。これは、ハンド表面および物体表面上、それぞれどの位置で接触するかにより、ハンドの変形量が変化するためである。ゆえに、より大

きな領域で物体と接触し把持するためには、物体形状や把持位置毎にハンドがどのように変形するかを推定する必要がある。

変形推定のために、ソフトハンドやロボットに内蔵したセンサ情報を活用する研究が行われている。Matsunoら⁽²⁾は、電気伝導性の糸を腱として用いることで、抵抗値の変化からソフトハンドの変形を推定している。Abbasら⁽³⁾は、コイルの伸縮と抵抗値の変化の関係をを用いたセンサを使用している。Wrightら⁽⁴⁾は、魚型ロボットの尾びれに曲げセンサを取り付けることで、尾びれの変形を推定している。しかしながら、物体把持時のハンドの変形についての議論には至っていない。外界センサとしてカメラを用いた研究も行われている。DeLoreyら⁽⁵⁾は、エンドエフェクタに付けたARマーカーの位置関係をもとに変形推定を行っている。萩原ら⁽⁶⁾は、ハンド先端につけたマーカーと物体を画像から検出し、先端が物体に接触するまでハンドを変形させる制御を行っている。しかし、これらの研究においても、把持物体の形状や把持位置は考慮されていない。

本論文では、画像情報をもとに、物体把持時におけるソフトハンドの変形を推定する手法を提案する。変形推定のため、ソフトハンド全体を剛体-バネ関節直列モデルによって離散化⁽⁷⁾する。離散化した1つ1つの

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) { kai, isobe }@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

^{*2} 中央大学理工学部精密機械工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) { pathak, umeda }@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

リンクに、曲げ角度および区分的に曲率一定 (Piecewise Constant Curvature, PCC) ⁽⁸⁾ とする拘束条件を与えることで、リンクの挙動からハンド全体の変形を推定する。推定には、まず、物体が存在しない状況でソフトハンドを駆動し、ハンド全体の曲げ角度を取得する。この作業は、推定の前準備として一度のみ行う。その後、物体が存在する状況における、ハンドと物体との接触位置を予測する。その位置で接触した場合の各リンクの挙動を前述の拘束条件に基づいて算出し、ハンド全体の変形を推定する。4 種類の物体形状および 3 段階の把持位置に対して、それぞれソフトハンドの変形を推定する実験を行う。実際に物体を把持した際の変形と推定結果を比較し、提案手法の有用性を検証する。

2. ソフトハンドの変形モデル

2.1 変形推定のためのアプローチ ソフトハンドの変形推定を行うために、3つのアプローチを用いる。1つめは、剛体-バネ関節直列モデルによるソフトハンドの離散化⁽⁷⁾である。これは、ソフトハンド全体を、図 1(a)の青線で示す有限個の同じ長さの剛体棒で近似するものである。リンク自体は変形せず、灰色で示す関節部分で変形する。2つめは、曲げ角度の導入である。これは、ハンド駆動後のハンドの先端のたわみ角度のことで、離散化したリンクが変形する角度の総和が一定になるという性質がある⁽⁹⁾。図 1(b)の緑矢印のように、ハンドの根元を通る鉛直線と、根元と指先を結ぶ線分とのなす角度で定義される。3つめは、区分的に一定曲率でハンドが変形する Piecewise Constant Curvature(PCC)⁽⁸⁾に従った、ハンドの変形のモデル化である。本論文では、図 1(c)の橙色の円弧のように、ハンド全体が一定曲率にしたがって変形すると考える。

2.2 離散化したリンクの挙動の算出 曲げ角度および PCC モデルを拘束条件として用いて、離散化した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。各リンクの挙動を算出するために、それぞれの長さおよび角度の定義を行う。

ハンドを N 分割したときのリンクの番号を $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 、関節の位置を P_{i-1} として表現する。ハンド全体の長さを L_{hand} とし、ハンド全体の長さは変わらないものとする。分割したリンクはすべて長さが等しく、変形しないものとするれば、各リンクの長さ l は、

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

となる。

次に、各リンクの曲げ角度について考える。ハンド

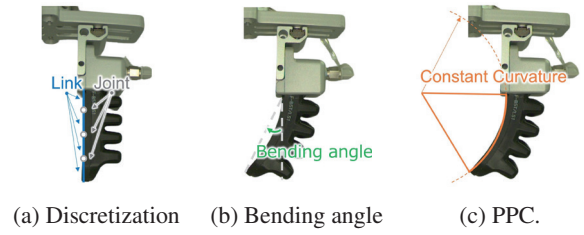


Fig. 1 Approaches for deformation estimation

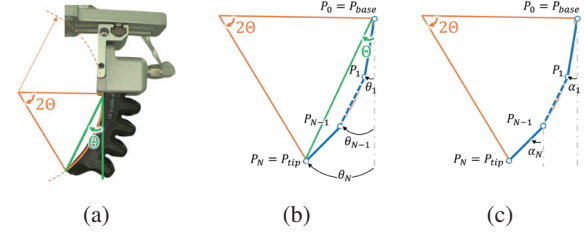


Fig. 2 Constraint conditions

全体の曲げ角度は Θ で一定とする。PCC モデルに従って変形するという拘束条件下では、図 2(a) に示すように、ハンドの変形は橙色の曲線で示す、中心角が 2Θ の円弧にあたるとみなすことができる。図 2(b) のように離散化した青線のリンクが円弧上に分布する時、各リンクの関節 P_i での曲げ角度 θ_i は

$$\theta_i = \frac{\Theta}{N} i \quad (2)$$

と求まる。

実装においては、式 (2) の代わりに、図 2(c) に示すように、注目するリンクの先端に近い関節点 P_i と、根元に近い関節点 P_{i-1} の相対位置を利用する。 P_{i-1} を通る鉛直軸と、線分 $P_{i-1}P_i$ のなす角度 α_i は

$$\alpha_i = \frac{2\Theta}{N} (2i - 1) \quad (3)$$

と算出できる。式 (1)、式 (3) 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。

3. モデルを用いた変形推定

3.1 想定するケース ハンドの変形は、変形を引き起こす要因により 2 種類に分けることができる。1つ目は、物体と接触しない場合に生じる変形である。ハンドがどのように変形するかの特性により、変形の仕方は一意に決まる。2つ目は、物体と接触する場合の変形である。この場合は、物体の形状や把持位置により、変形の仕方が異なる。ただし、いずれの場合においても、ハンド全体は曲げ角度を満たすように変形する。この拘束条件を用いて、両者のケースに適用可能な手法を構築する。

3.2 ハンド全体の曲げ角度の算出

まず、ハンド全体の曲げ角度 Θ を求める処理を行う。なおこの処理は変形推定の前準備として一度のみ行う。この処理では、外部に固定したカメラから取得した、物体を把持していない状態の画像を用いる。図 3(a) にカメラ画像の一例を示す。ここでハンドの位置は変化しないため、図 3(b) のように決まった画像領域を抽出し、入力画像として使用する。その後、色情報を基にしきい値処理を行い、図 3(c) に示すマスク画像を生成する。ここでマスク画像内で領域が最大のものがソフトハンドであるとし、ハンドの輪郭を抽出する。抽出した輪郭から、図 3(d) のように、青点で示す鉛直方向の端点をハンドの根元点 $P_{base} = (x_{base}, y_{base})$ 、赤点で示す水平方向の端点をハンドの指先点 $P_{tip} = (x_{tip}, y_{tip})$ とする。算出した値をもとに、図 3(d) の緑線で囲われるハンドの曲げ角度 Θ を

$$\Theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_{tip} - x_{base}}{y_{base} - y_{tip}} \right) \quad (4)$$

として算出する。以後、取得した曲げ角度 Θ を用いて変形推定を行う。

3.3 接触位置の推定

3.1 節で述べたように、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り、ハンドの変形の仕方は異なる。変形の仕方は、図 4 の 4 種類に大別される。図 4(a) は物体とハンドが接触しない場合を表す。接触する場合は、接触位置が、指先のみ (図 4(b))、指先とその周辺 (図 4(c))、または指先以外 (図 4(d)) のいずれに該当するかで変形の仕方を分類することができる。変形を推定するために、まず接触位置を画像から検出する。本節では、接触位置の検出処理について述べ、次節で接触位置毎の変形推定処理を詳述する。

まず、3.2 節と同様に、入力画像として図 5(a) を取得する。提出手法は、ハンドを動かす前にその変形を推定する手法であるため、図 5(a) ではハンドは物体把持を開始していない状態である。ここで、図 5(a) の赤枠は、ハンドの可動域を基に設定した関心領域である。ハンドは赤枠の範囲で変形するため、物体と接触する場合、その接触位置はこの領域内に絞ることができる。この枠内で、図 5(a) のマスク画像のように、物体の色情報を基に物体領域の抽出を行う。この処理により、ハンドと接触し得る物体領域のみが抽出される。この領域において、ソフトハンドは画像の水平方向に変形するという前提のもと、物体上のどこで接触するか、接触候補点 P_1 を算出する。物体領域の水平方向の最端点のうち、ハンドに近い点を接触候補点 P_1 とする。図 5(b) では、ハンドの根元点と指先点を青色で、算出した接触候補点を赤色で示している。

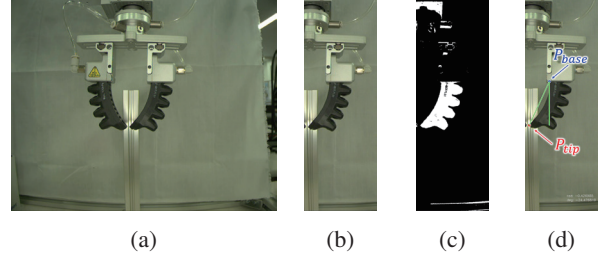
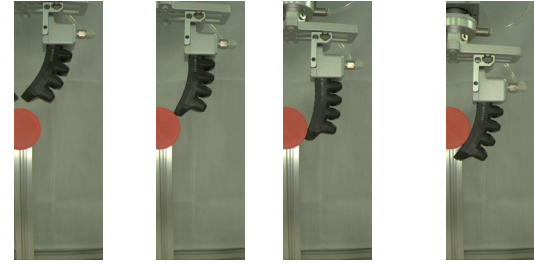


Fig. 3 Calculation of bending angle. (a) Original image captured from a monocular camera, (b) Example of input image, (c) Created mask image, (d) Calculated bending angle.



(a) No contact (b) Only tip (c) Pad (d) Other than tip

Fig. 4 Contact position and deformation.

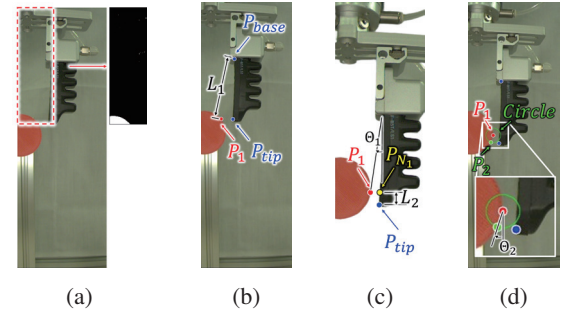


Fig. 5 Calculation of contact point. (a) Input image and extracted area, (b) Calculated P_1 , (c) Calculation method for P_2 , (d) Calculated P_2 .

次に、ハンドを動かして物体を把持したときに、離散化したハンドのどのリンクと P_1 が接触するかを求める。根元点 P_{base} と、接触点候補 P_1 の 2 点間のユークリッド距離を L_1 とする。 L_1 は、ハンドと物体が接触したときの、根元から接触候補点までのハンド上の長さの近似値を表す。ゆえに、 P_1 で接触するリンク N_1 は、

$$N_1 = \frac{L_1}{L_{hand}} N \quad (5)$$

により求まる。 N_1 がリンク総数 N と等しければ指先のみ (図 4(b)) で、 N より小さければ指先以外で接触し、 N より大きければ接触しないことになる。 P_1 で物体と接触した後も、ソフトハンドは変形を続けることが考えられる。その場合に変形するのは、リンク N_1 よ

りも指先に近い部位と予想される．そこで，その変形により指先に近いリンクでも物体と接触することを考慮し，残りのリンクが接触する別の接触候補点 P_2 を求める．まず，図 5(d) のように， N_1 番目のリンク位置 P_{N_1} (図中の黄色点) とハンドの指先点 P_{tip} (青点) の間のユークリッド距離を L_2 (黒線) として求める． L_2 は，ハンド上の N_1 番目のリンクが物体と接触したときの，接触したリンクから指先までのハンド上の長さを表す．これは， P_1 との接触後に変形し得る部位の長さを表す．次に， P_1 を中心とした半径 L_2 の円を描く．このとき，物体形状の輪郭と描画した円の交点のうち，画像中で下方にあるものを接触点 P_2 とする．図 5(d) では，描画した円を緑線で，算出した P_2 を緑点で示している．

ここで， P_2 はリンクの長さを基準に算出した点であるが，実際にその点までハンドが変形できるかどうかは，ハンド全体の曲げ角度 Θ の条件により決定される．もし P_2 まで変形できる場合は，指先とその周辺で，変形できない場合は，指先以外で接触することになり，接触位置が異なる．ハンドの根元から N_1 番目のリンクまでの曲げ角度を Θ_1 としたとき，そのリンクから指先までの部位が変形し得る角度 Θ_{remain} は，

$$\Theta_{remain} = \Theta - \Theta_1 \quad (6)$$

となる．また，点 P_1 と P_2 を結んだ線と鉛直軸がなす角を Θ_2 とする．これは，ハンドが P_2 まで曲がる場合の， N_1 番目以降のリンクの曲げ角度を表す．もし， Θ_2 が Θ_{remain} よりも小さい場合，ハンドの指先は P_2 で接触することができるため，接触位置は指先およびその周辺となる (図 4(c))．一方で， Θ_2 が Θ_{remain} よりも大きい場合，指先は物体に接触せず，指先以外が接触位置となる (図 4(d))．

3.4 変形の推定 まず，物体とハンドが接触しない場合 (図 4(a)) を考える．この場合は，ハンド指先までのすべてのリンクに対して式 (1)(2) が算出されるために，変形を推定することができる．

次に，指先のみで接触する場合 (図 4(b)) について考える．指先で接触するとき，ハンドは物体になじむことができず，実際はハンドが物体とは反対側に変形することがある．これは，ハンド全体の曲げ角度 Θ の条件を満たすようにハンドは変形するが，指先が物体に接触してしまうと，物体側には変形することができなくなるためである．図 6(a) では，曲げ角度 Θ 分を緑色の曲線で， Θ の分だけ変形するときのハンド輪郭を橙色の曲線で示している．赤色の点は，物体と接触した際の指先位置を示しており，接触時の曲げ角度は黒色の線と鉛直軸がなす角 Θ_1 により表される．このとき，

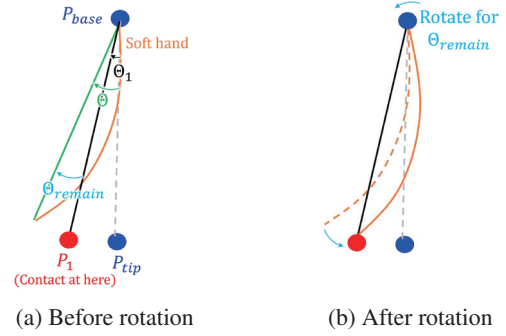


Fig. 6 Deformation in case of contact only at the tip.

ハンド全体の曲げ角度の条件から，ハンドは水色で示す Θ_{remain} の分だけ変形し得る．なお，この Θ_{remain} は式 (6) と同様に算出される．そこで，橙色で示すハンド輪郭を，図 6(b) のように， P_{base} を中心に角度 Θ_{remain} だけ反対方向に回転させることで，ハンド全体の曲げ角度 Θ ，および P_1 で接触するという条件の両方を満たすことができる．

次に，指先とその周辺で接触する場合 (図 4(c)) を考える．このとき，指先での接触が生じているため，ハンドは物体と反対側にも変形する． P_2 まで接触したときの角度 Θ_{remain} は，

$$\Theta_{remain} = \Theta - \Theta_1 - \Theta_2 \quad (7)$$

により求まる．まず，3.3 節で求めたように，ハンド根元から N_1 番目までのリンクが Θ_1 を満たすように変形する．次に， N_1 番目から指先までのリンクが Θ_2 を満たすように変形する．最後に，ハンド全体を， P_{base} を中心に角度 Θ_{remain} だけ反対方向に回転させる．これにより，物体になじむ方向への変形と，指先と物体の接触により生じる反対側への変形の両方を推定することができる．

最後に，指先以外で接触する場合 (図 4(d)) について考える．このとき，まずハンド根元から N_1 番目のリンクは Θ_1 を満たすように変形する． N_1 番目から指先までのリンクは式 (6) の Θ_{remain} を満たすように変形する．

以上により，接触位置に応じた異なる変形を推定することが可能になる．

4. 実験

提案手法の有用性を検証するために，(A) 物体と接触しない場合のソフトハンドの変形推定と，(B) 複数の物体形状および接触位置の条件下での変形推定の，2 種類の実験を行った．

4.1 評価方法 本実験では，1. 変形推定値の誤差，2. 変形推定の再現性を評価する．それぞれについて

て、提案手法による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、提案手法による変形推定後の N 個の関節の位置を指す。なお、提案手法による変形推定は、ハンドを動かす前の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た際の、ハンドの輪郭を N 分割したときの輪郭上の点とする。推定値を $p_{est_i} = (x_{est_i}, y_{est_i})$ 、真値を $p_{true_i} = (x_{true_i}, y_{true_i})$ 、としたとき、推定値と真値の誤差 ε_i は

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_{est_i} - x_{true_i})^2 + (y_{est_i} - y_{true_i})^2} \quad (8)$$

となる。

なお本論文では、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 箇所の点について、誤差 ε_i を評価する。

4.2 実験環境 実験は図 7 に示す環境で行った。本実験では、ソフトハンドに DOBOT 社の 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 である。カメラからハンドまでの距離は 14 mm の環境下で実験を行った。

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、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。実験 (A) では、ハンドの可動域内に物体を配置せずに、推定および観測を行った。また、ハンドの分割数 $N = 2, 10, 20$ としたときの実験結果を取得した。実験 (B) では、図 8(b) に示す 3D プリンタで作成した 4 種類の物体を把持した。なお物体は、参考文献⁽¹⁰⁾を参考にした。

4.4 (A) 物体と接触しない場合のソフトハンドの変形推定 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 14 mm、カメラの焦点距離 4 mm を用いて算出した。また高さ H_a における、リンク $N = 2, 10, 20$ における推定例を図 9 に示す。青点は推定値、緑点は真値を重ね書きしたものである。

推定誤差の平均は 0.5 ~ 1.2 mm となった。指の中央 ($i = N/2$) および指先 ($i = N$) のそれぞれの点について、 $N = 10$ で最も誤差の平均が小さくなった。これは、 $N = 2$ では分割数が少なく、近似の精度が落ちたためであると考えられる。一方の $N = 20$ は、分割数が大きくなることにより、各リンクの長さ l や曲げ角度 θ_i の算出結果による累積誤差が生じたと考えられる。2.2 節で述べたように、実装の際には注目するリンクの先端に近い関節点 P_i と、根元に近い関節点 P_{i-1} との相対位置を算出することで推定している。分

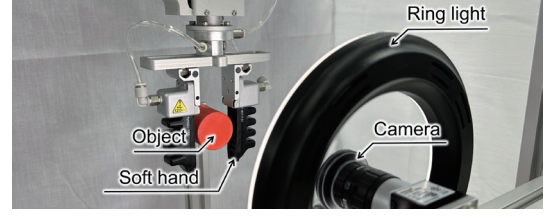
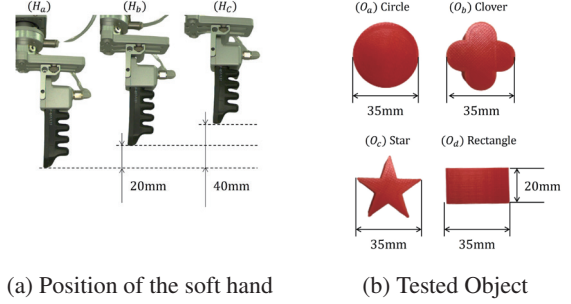


Fig. 7 Experimental environment.



(a) Position of the soft hand

(b) Tested Object

Fig. 8 Experimental conditions.

割数が増えることで、各リンクの長さや曲げ角度に誤差が生じ、その誤差が分割数の数だけ累積したと考えられる。一方、いずれの分割数において、同程度の標準偏差となった。以上の結果を参考にし、実験 (B) は $N = 10$ の条件下で実験を行った。

4.5 (B) 複数の物体形状および接触位置 実験結果を表 2 に示す。これらの値も表 1 と同様に算出した。また高さ H_b における、各物体を把持したときの推定例を図 10 に示す。

実験 (A) と比較すると、全ての物体において誤差の平均値が大きくなり、最大で 2.0 mm 大きくなった。これは、実験 (A) では考慮されていなかった、接触位置の検出誤差および離散化誤差によるものと考えられる。物体に接触する場合では、接触点を基準として変形を算出しているため、接触点の検出精度がハンド全体の変形推定にも影響を及ぼす。Star が、他の物体の結果に比べて誤差の平均および標準偏差が小さいのは、物体形状が鋭角であり、最端点の検出誤差が小さくなったためだと考えられる。また、ハンドの変形は連続した曲線ではなく、複数の直線をつなぎ合わせた線分としてモデル化したことも影響していると考えられる。Circle や Clover では、接触点と指先点の間のリンク部で、観測値に対して推定値の曲げが足りていない様子が確認された。このことから、変形時のモデルの連続性や拘束条件を考慮することが必要であると考えられる。

今後は、物体との接触点の算出方法の改善や、接触点を変形の拘束条件に含むことで、変形推定の精度向上を図る。

Table 1 Estimation error in experiment A

N	i	Mean [mm]	Standard deviation [mm]
2	1	1.2	0.2
	2	0.7	0.3
10	5	1.1	0.2
	10	0.5	0.3
20	10	1.2	0.2
	20	0.7	0.3

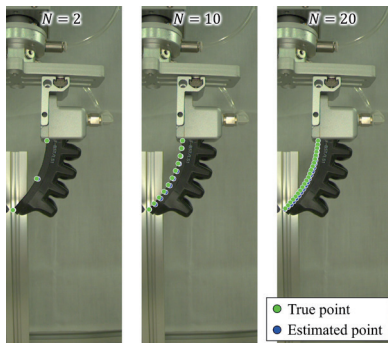


Fig. 9 Results of Experiment A.

Table 2 Estimation error in experiment B

Object	i	Mean [mm]	Standard deviation [mm]
Circle	5	1.7	1.0
	10	2.3	0.9
Clover	5	1.4	0.8
	10	2.4	1.0
Rectangle	5	1.5	1.0
	10	2.5	1.7
Star	5	1.0	0.2
	10	1.2	0.4

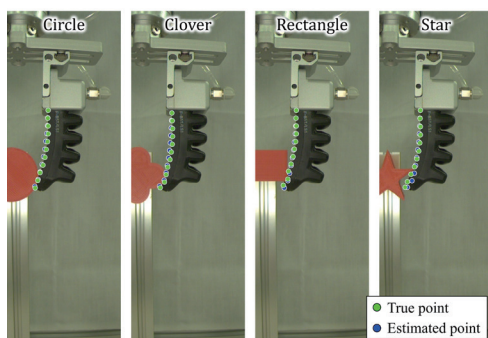


Fig. 10 Results of Experiment B.

5. 結 言

本論文では、画像を用いたソフトハンドの変形推定手法を提案した。まず、物体が存在しない状況下でハ

ンドを動かした際に取得された画像から、ハンドの曲げ角度を取得した。次に、剛体-バネ関節直列モデルを基にハンドを複数リンクに分割した。全体の曲げ角度が常に一定であり、ハンドは一定の曲率に従って変形する拘束条件を与えた。また、接触位置を予測し、拘束条件に従っ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した。実験では、物体とハンドが接触しない条件下と、複数の物体形状および接触位置で物体を把持する条件下でのハンドの変形を推定し、推定精度を検証した。物体と接触しない場合の推定誤差の平均は 0.5 ~ 1.2 mm、物体と接触する場合は 1.0 ~ 2.5 mm となった。これは物体との接触有無に関わらず生じる離散化誤差や、物体との接触点の推定誤差によるものと考えられる。

今後は、接触点の算出方法や離散化モデルの拘束条件を改善し、推定精度の向上を目指す。

参 考 文 献

- (1) J. Shintake *et al.*, “Soft Robotic Grippers”, *Advanced Materials*, Vol.30, No.29(2018), pp.170735.
- (2) 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*, (2017), pp.5–10.
- (3) A. Abbas and J. Zhao, “Twisted and coiled sensor for shape estimation of soft robots,” *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2017), pp.482–487.
- (4) B. Wright *et al.*, “Soft Sensors for Curvature Estimation under Water in a Soft Robotic Fish,” *IEEE Int. Conf. on Soft Robotics*, (2019), pp.367–371.
- (5) C. DeLorey *et al.*, “A cable-driven soft robotic end-effector actuator for probe-based confocal laser endomicroscopy: Development and preclinical validation,” *Translational Biophotonics*, Vol.5, No.2(2023).
- (6) 萩原啓介ら, “油圧駆動ソフトハンドの開発と視覚サーボによる制御,” 第 26 回ロボティクスシンポジウム, (2021), pp.231–236.
- (7) 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, (2023), pp.47–51.
- (8) R. Webster III *et al.*, “Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.29, No.13(2010), pp.1661–1683.
- (9) Q. Jiang and F. Xu, “Design and Motion Analysis of Adjustable Pneumatic Soft Manipulator for Grasping Objects,” in *IEEE Access*, Vol.8(2020), pp.191920–191929.
- (10) Y. Isobe *et al.*, “Vision-Based In-Hand Manipulation of Various Shaped Objects via Contact Point Prediction,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2023), pp. 8727–8734.