ソフトハンドのプリグラスプ変形予測に基づく接触力推定

○甲斐 亮吾（中央大学）　磯邉 柚香（中央大学）
Pathak Sarthak（中央大学）　梅田 和昇（中央大学）

様々な物体を把持するため，物体形状に対して適応的に変形できる性質をもつソフトハンドの利用が注目されている．本論文では，画像より物体把持前に予測したソフトハンドの変形に基づいて，物体に生じる接触力を推定する手法を提案する．まず，ソフトハンドを剛体-バネ直列モデルと曲率一定変形モデルに基づいてモデル化する．その後，画像から観測されたハンドの変形情報に応じて，バネ関節部分で生じるトルクを算出することで，接触力を推定する．検証実験の結果，推定値と観測値の誤差平均が $-0.01 \sim 0.02$N，標準偏差が $0.04 \sim 0.08$N となった．

1. 序論

工場における人手不足問題の解決および生産性の向上を図るため，ロボットアームやロボットハンドを用いた自動化が進んでいる．工場では多種多様な形状や硬さの物体を扱う必要がある．そこでソフトハンドの利用が注目されている [1]．ソフトハンドとは，柔軟な素材と機構によって構成されたロボットハンドであり，柔軟性を有しているため，物体形状になじんで変形することができる．なじむことでハンドと物体の接触領域が大きくなり，摩擦力の向上や物体の幾何的な拘束の増大が期待できる．また，接触領域が大きくなることで局所領域に把持力が加わることを防ぐことができる．これにより，様々な形状や硬さの物体を落とさず，かつ傷つけずに把持することが可能となる．

物体を安定的に，また傷つけないように把持するためには，物体を把持するときの力を制御する必要がある．しかし，ソフトハンドが柔軟に変形するために，力のセンシングが困難という課題がある [2]．

本研究では，画像情報をもとに，ソフトハンドを用いて物体把持した際に生じる接触力を推定する手法を提案する．先行研究では，プリグラスプ，すなわち物体を把持する前に，ソフトハンドがどのように変形するかを予測していた [3]．そこで物体把持前の変形予測結果を用い，離散化したリンクのバネ関節の角度変化を算出することで，ハンドの上の任意の一点での接触力を物体把持前に推定する．

ハンドの任意の位置で物体を把持する実験を行い，実際の接触力と推定された接触力を比較することで，提案手法の有用性を検証する．

2. 関連研究

物体とハンドの接触力を推定するために，ハンドの表面や内部に搭載したセンサ情報を活用する研究が行われている [4, 5, 6]．これらの研究では，柔軟性をもつ素材にハンドにセンサを取り付ける必要があるため，ソフトハンドの物体形状の適応性を減少させてしまう，あるいはソフトハンドの特性を変化させてしまうおそれがある．また，センサを搭載しなければならないため，商業利用されているハンドへの利用が難しく，搭載時のキャリブレーションも困難となる．加えて，指先部分で生じる接触力の計測が主であり，物体になじんだ面で生じる力分布までは考慮されていない．

ハンドに直接センサを取り付けるのではなく，ハンドの外部にカメラを用いて力推定する研究も行われている．D. D. Barrie らは，ハンドの変形状態の画像を入力とし，深層学習を用いることで，物体把持時の接触部分における力分布を求めている [7]．E. Rho らは，ハンドの関節位置の画像と印可圧力を入力とし，深層学習を用いることで，物体を把持時の指先力を算出している [8]．しかしこれらの研究では，深層学習モデルを利用するためにデータセットが必要となるという課題がある．またハンドに依存したデータセットになるため，利用できるハンドが制限されてしまうおそれがある．本研究では，ソフトハンドをモデル化することで，学習には必要な大量のデータセットを用意せずとも接触力を推定できる手法を提案する．

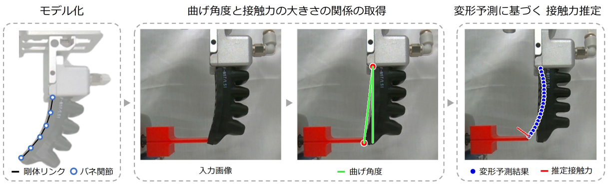


図 1　手法概要

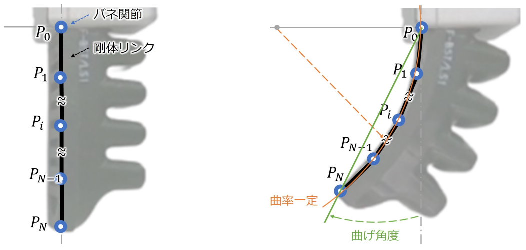
3. 提案手法

3.1 概要

手法概要を図 1に示す．力推定を行うため，ソフトハンド全体を剛体-バネ関節リンクで離散化しモデル化する [9]．ここで，離散化した各リンクが曲げ角度の範囲内で曲率一定に変形する (Piecewise Constant Curvature, PCC) とする拘束条件を設ける [10]．これにより，物体接触に伴い発生するハンド全体の変形から，各バネ関節の角度変化が算出できる．推定では，まず，フォースゲージを用いて曲げ角度と接触力の関係を取得することでバネ関節のバネ定数を算出する．この作業は，推定のためのキャリブレーション作業として一度のみ行う．その後，先行研究を用いて，ソフトハンドの変形推定を行う [3]．変形推定より接触による曲げ角度を求め，キャリブレーションにて取得したバネ定数を用いることで，接触力を推定する．離散化したハンドのバネ関節の角度変化を算出することにより，ハンド上の任意の位置での接触力が推定可能となる．

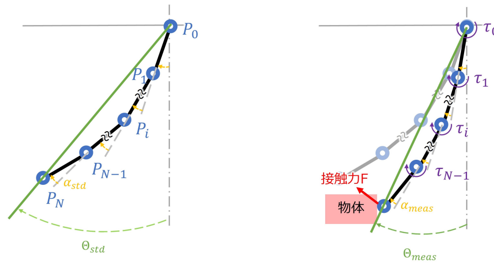
3.2 ソフトハンドの離散モデル

ソフトハンドを離散モデルで近似することで，変形による接触力を算出する．まず，ソフトハンド全体を剛体-バネ関節モデルで離散化する [9]．これは図 2(a) のように，青色で示すバネ関節と，黒線で示す有限個の等



(a) 駆動前　　(b) 駆動後

図 2　ソフトハンドのモデル化



(a) 接触前　　(b) 接触後

図 3　離散モデルを用いた接触力の算出

しい長さの剛体リンクで近似するものである．ここで図 2(b) のオレンジ色の円弧で示すように，ソフトハンドは区分的に曲率一定で変形するという PCC モデルを用いれば，離散化リンクの各バネ関節は同じバネ定数であるとして考えることができる [10]．また曲げ角度という指標を用いる．これは，ハンド駆動後のハンドの先端のたわみ角度を表すもので，各リンクの変形角度の総和は一定になるという性質がある [11]．以上の条件でモデル化することで，ハンドが変形したときの接触力を算出することができる．

3.3　指先での接触力の算出

ハンド全体を N 個のリンクで近似するときを考える．離散化したリンクの番号を $i \in \{1, 2, ..., N\}$，関節の位置を P_{i-1} として表現する．ハンドが物体と接触しないとき，図 3の緑色の実線のようにハンド全体が曲げ角度 Θ_{std} だけ曲がるとする．また図 3の緑色の点線で示す，関節 P_{i-1} を基準とし，リンク i の延長線と線分 $P_{i-1}P_i$ のなす角度を α_{std} とする．3.2節で述べた PCC モデルを考慮すれば，すべての関節においてなす角度は α_{std} と表せる．ここで図 3のように，ハンドが物体に接触する場合を考える．接触によってハンド全体が変形するとき，図 3の紫色の矢印のように，バネ関節では回転角に応じてトルクが発生する．各関節のバネ定数を k，関節 P_{i-1} で発生するトルクを τ_{i-1} と表現する．ここで，ハンドのリンク $N = i$ にて物体と接触し，関節のなす角度が α_{meas} へと変化したとき，関節 P_{i-1} で生じるトルク τ_{i-1} は次式のように求めることができる．

$$\tau_{i-1} = k(\alpha_{std} - \alpha_{meas}) \tag{1}$$

指先で接触するとすれば，ハンドの根元関節に生じるトルク τ_0 は，各関節で生じるトルクの総和によって求めることができる．

$$\tau_0 = \sum_{j=1}^{N} \tau_i = Nk(\alpha_{std} - \alpha_{meas}) \tag{2}$$

ここでハンドの根元関節 P_0 から接触した位置までの距離は，接触位置までのリンク数 N と各リンクの長さ l の積により算出できる．ゆえに，式 (2) を用いることで，トルクから力を算出することができる．

$$F = \frac{\tau_0}{Nl} = \frac{k(\alpha_{std} - \alpha_{meas})}{l} \tag{3}$$

PCC モデルであることを考慮すれば，関節のなす角度 α_{std} はハンド全体の曲げ角度を用いて次式のように表すことができる．

$$\alpha_{std} = \frac{\Theta_{std}}{N} \tag{4}$$

式 (3) に対して式 (4) の関係を用いれば，接触力 F は次式により求めることができる．

$$F = \frac{k(\Theta_{std} - \Theta_{meas})}{Nl} \tag{5}$$

式 (5) より接触力は，接触点までのハンドの長さ Nl と，接触点での曲げ角度 $\Theta_{std}, \Theta_{meas}$ によって算出できることがわかる．離散数 N は定数であり，リンク長さ l および物体との接触がないときの曲げ角度 Θ_{std} は一度だけ算出すれば良い定数である．ゆえに，キャリブレーションによってバネ定数 k を求め，物体接触によるハンドの曲げ角度 Θ_{meas} を算出することができれば，接触力の算出が可能となる．

3.4　バネ定数の算出

バネ定数を算出するために，フォースゲージを用いてキャリブレーションを行う．式 (5) における定数を，ハンドが映っている画像から算出することでバネ定数を求める．

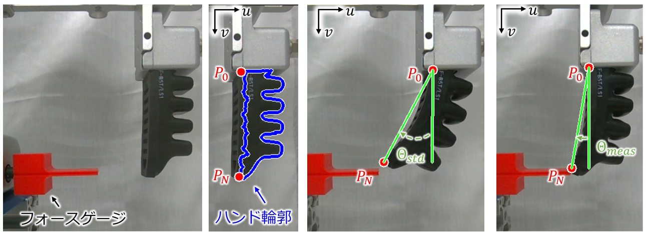
まず，ハンドの駆動前の状態でリンク長さ l を求める．図 4(a) の入力画像に対し，図 4(b) の青線のようにハンドの輪郭を取得する．得られた輪郭より，図 4(b) の赤点に示すハンドの根元関節 P_0 および指先関節 P_N を求める．ハンド全体の長さは P_0 と P_N の 2 点間の距離により求まる．2 点間の距離は図 4(b) の左上に示す画像座標系の v 軸成分によって求めることができるため，各リンクの長さ l は次式により取得できる．

$$l = \frac{v_{P_N} - v_{P_0}}{N} \tag{6}$$

なお，ハンド変形後もリンク長さは変わらないため，リンク長さ l は一度だけ求めればよい．

次に，フォースゲージに接触しないようにハンドを駆動させ，ハンド全体の曲げ角度を取得する．図 4(c) に示す，ハンド駆動後の画像に対し，ハンドの輪郭から P_0 および P_N を算出する．得られた 2 点について角度を算出することで，図 4(c) の緑線のようにハンド全体の曲げ角度 Θ_{std} を取得する．

$$\Theta_{std} = \tan^{-1}\left(\frac{u_{P_N} - u_{P_0}}{v_{P_N} - v_{P_0}}\right) \tag{7}$$



(a) (b) (c) (d)

図 4　バネ定数の算出

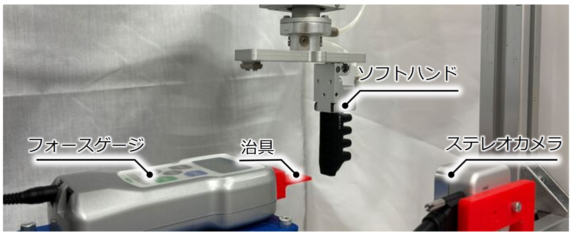
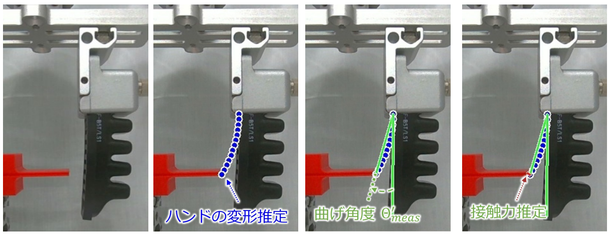


図 6　実験環境



(a) (b) (c) (d)

図 5　接触力の推定

その後，ハンドの先端がフォースゲージに接触するようにハンドを駆動させ，曲げ角度と力の大きさの関係を取得する．フォースゲージと接触後の曲げ角度 Θ_{meas} は，図 4(d) の緑線のように，Θ_{std} 算出時と同様にして算出する．力の大きさについて，フォースゲージで計測できる力の方向は，図 4(d) 左上の画像座標系に示す v 軸方向である．よって力の方向を考慮し，以上で算出したリンク長さ l および曲げ角度 $\Theta_{std}, \Theta_{meas}$ を用いれば，式 (5) よりバネ定数 k を算出することができる．

$$k = \frac{FNl}{(\Theta_{std} - \Theta_{meas})\cos(\Theta_{meas})} \tag{8}$$

3.5　接触力の推定

ハンドの指先のみならず，ハンドの任意の位置で接触した際の力も推定する．先行研究の手法により，ハンドを駆動する前に，ハンドがどのように変形するかを推定する [3]．図 5(a) に示す入力画像に対して，図 5(b) の青点のように，ハンド根元から物体と接触するまでのリンクの変形を推定する．ここで接触するリンクを i としたとき，接触前のバネ関節 P_i までの曲げ角度 Θ'_{std} は次式となる．

$$\Theta'_{std} = \frac{i}{N}\Theta_{std} \tag{9}$$

接触後のバネ関節 P_i までの曲げ角度 Θ'_{meas} を図 5(c) の緑線のように算出する．接触点までのハンドの長さは，リンクの長さ l を用いて il と求められる．よってハンドの任意の位置で接触した際の接触力 F_i は次式によって算出することが可能となる．

$$F_i = \frac{k(\Theta'_{std} - \Theta'_{meas})}{il} \tag{10}$$

式 (10) に，3.4節で求めたバネ定数を式 (5) に代入することで，図 5(d) の赤線のように接触力を算出する．

4.　実験

提案手法の有効性を検証するため，物体とハンドの接触位置を変えたときの接触力を推定する実験を行った．

4.1　実験環境

実験環境を図 6に示す．フォースゲージの位置を固定し，フォースゲージおよびハンドを撮影できる位置にステレオカメラを設置した．なお，ソフトハンドに Shenzhen Yuejiang Technology 社の DOBOT MG400 Soft Gripper Kit，ステレオカメラに Intel 社の RealSenseD405，フォースゲージに日本電産シンポ社の FGP-5 を用いた．フォースゲージの先端には，変形推定を行うために 3D プリンターで製作した PLA 製の治具を取り付けた．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．

4.2　実験条件および評価

まずキャリブレーションを行い，バネ定数を算出した．次に，図 7に示すように，フォースゲージと接触するハンドの位置を 3 段階設けて接触力の推定を行った．それぞれの接触位置において，フォースゲージで計測した接触力と提案手法により推定した接触力の誤差平均および標準偏差を算出し評価する．

4.3　キャリブレーション結果

曲げ角度の変化と力の大きさの関係を図 8(a) に示す．この結果より，3.4節の内容に基づいてバネ定数を算出した結果を図 8(b) に示す．図 8(b) より平均値をとり，バネ定数を $k = 10.3$ Nmm/deg とした．

4.4　力推定結果

力推定の結果を表 1に示す．フォースゲージで計測した力と提案手法によって推定した力の誤差平均は $-0.01 \sim 0.02$N，また標準偏差は $0.04 \sim 0.08$N となった．この結果より，変形推定の結果に基づいて接触力を推定することが可能であると考えられる．

ハンドの位置が (a) の場合に比べ，位置が (b)(c) の標準偏差が大きいことがわかる．これは，変形推定の誤差が影響しているものと考えられる．ハンドの位置 (a) の場合は，ハンドの指先で接触するため変形推定が精度良く行えた．しかし位置 (b)(c) では，画像ノイズによってフォースゲージと接触するリンクの算出が不安定となってしまった．先行研究の変形推定精度が 0.7mm ～ 1.7mm となっており，接触するリンクおよび曲げ角度の変化から接触力を求めているため，変形推定の結果が接触力の推定に影響を与えたと考えられる．今後は，変形推定手

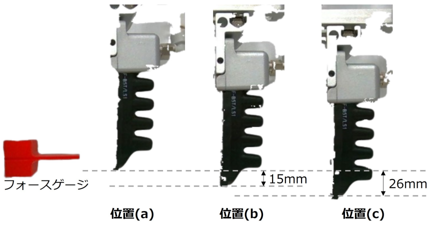
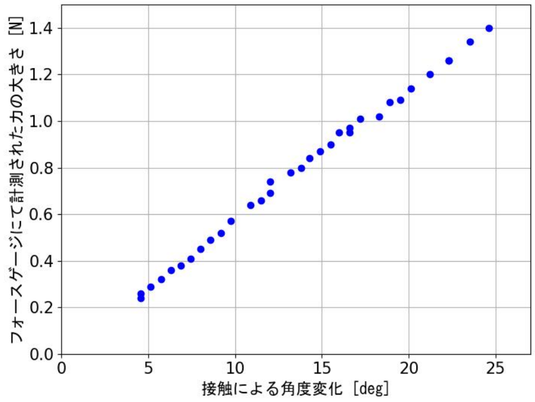
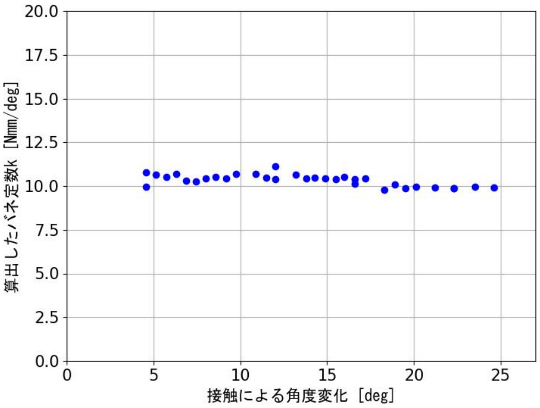


図 7　フォースゲージとハンドの位置



(a) 角度と力の大きさの関係



(b) 算出したバネ定数

図 8　キャリブレーション結果

表 1　提案手法による接触力の推定結果

ハンドの位置	計測値と推定値の誤差 [N]	標準偏差 [N]
図 7 の位置 (a)	0.01	0.04
図 7 の位置 (b)	-0.01	0.08
図 7 の位置 (c)	0.02	0.07

法を見直すとともに，変形推定の誤差による接触力推定の影響についても考察を進めていく．

5.　結論

本論文では，画像を用いて予測したソフトハンドの変形結果を用いて接触力を推定する手法を提案した．ハンドを剛体-バネ関節直列モデルおよび PCC モデルを用いてモデル化した．モデル化したハンドに対して，フォースゲージを用いて，曲げ角度と力の大きさを求めることで，バネ定数を算出した．また先行研究を用いて接触リンクまでの曲げ角度を求めることで，バネ定数を用いて接触力を推定した．実験の結果，推定誤差の平均が $-0.01 \sim 0.02$N, 標準偏差が $0.04 \sim 0.08$N となった．

今後は，ハンドの複数の位置で接触する場合においても接触力の推定が可能となるように手法を改善する．

参　考　文　献

[1] J. Shintake *et al.*: “Soft Robotic Grippers”, Advanced Materials, vol. 30, no. 29, 2018.

[2] H. Wang *et al.*: “Toward Perceptive Soft Robots: Progress and Challenges”, Advanced Science, vol. 5, 2018.

[3] 甲斐亮吾ら: “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”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024 講演論文集, 1P1-G10, 2024.

[4] J. Qu *et al.*: “Recent Progress in Advanced Tactile Sensing Technologies for Soft Grippers”, Advanced Functional Materials, vol. 33, no. 41, 2023.

[5] S. Dilibal *et al.*: “Additively Manufactured Custom Soft Gripper with Embedded Soft Force Sensors for an Industrial Robot”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 22, pp. 709–718.

[6] B. Jamil *et al.*: “Proprioceptive Soft Pneumatic Gripper for Extreme Environments Using Hybrid Optical Fibers”, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 4, pp. 8694–8701, 2021.

[7] D. D. Barrie *et al.*: “A Deep Learning Method for Vision Based Force Prediction of a Soft Fin Ray Gripper Using Simulation Data”, Frontiers in Robotics and AI, vol. 8, 2021.

[8] E. Rho *et al.*: “Impact of Physical Parameters and Vision Data on Deep Learning-Based Grip Force Estimation for Fluidic Origami Soft Grippers”, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 9, no. 3, pp. 2487–2494, 2024.

[9] 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.

[10] 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, pp.1661--1683, 2010.

[11] Q. Jiang and F. Xu: “Design and Motion Analysis of Adjustable Pneumatic Soft Manipulator for Grasping Objects”, IEEE Access, vol. 8, pp.191920--191929, 2020.