

画像を用いたソフトハンドの安定把持判定

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

Image-Based Evaluation of Stable Grasping for Soft Robotic Hand

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 for evaluating the grasping stability of a soft robotic hand using camera images. Soft robotic hands have gained attention due to their high adaptability to various objects. They can grasp objects with complex shapes, delicate surfaces, and soft objects. However, this adaptability can also lead to instability if the hand fails to properly adapt to the object's shape. Therefore, it is important to grasping stability before making physical contact with the object. In this study, we use images that capture both the object and the hand. A model which discriminates the entire hand is used to predict the deformation of the hand before grasping. Based on this predicted deformation, the contact points and contact forces are calculated. These values are then used to estimate the overall force and torque exerted on the object during grasping. Finally, we evaluate the grasping stability using established grasping theory methods. In the experiment, the effectiveness was verified by comparing the proposed method with the phenomena observed in the actual system.

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

1. 緒 言

多品種少量生産の需要拡大につれて、ロボットは様々な物体をハンドリング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⁾。ソフトハンドは素材と機構が柔軟という特徴を持っており、そのために様々な物体形状になじんで変形することができる。物体に沿って変形できるため、複雑な形状の物体や傷つきやすい物体、食品などの柔軟物体を把持することができる。

しかし、柔軟性を持つがゆえの課題もある。それは、物体の形状になじむことができず、不安定な把持となる可能性があることである⁽²⁾。物体になじまない状態とは、図1に示すような、指が屈曲してしまった姿勢や、物体の姿勢が変化することで意図せず指先で把持している状態である。このような状態では、ソフトハンドの特徴を活かした、様々な物体の安定的な把持が実現されない。また、実際に把持した後で不安定な把持となった場合、再把持が必要となるため、タスク遂行に時間がかかるほか、物体を傷つけてしまう可能性

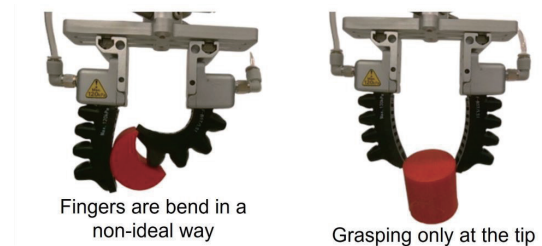


Fig. 1 Unstable grasp by a soft robotic hand

がある。そこで、物体を把持する前に、安定的に把持可能かを判定する必要がある。

把持安定性を評価する場合、ハンドに内蔵したセンサを用いて安定性を評価する研究が多い⁽³⁾⁽⁴⁾。またソフトハンドでも同じように、内蔵するセンサを工夫することで、安定性の算出を行う研究がされている⁽⁵⁾。しかしこれらの研究は、センサの配置が難しいために、取得できる力情報の数が限られ、物体形状や把持位置によっては安定性を算出できない可能性がある。また、ハンドにセンサを内蔵しているため、接触してからでないと安定性を算出することはできない。ハンドの外側にカメラを設け、物体の把持計画をたてる研究もされている⁽⁶⁾。外側にカメラを設けることで、物体の情報を把持前に取得することが可能である。しかし学習を用いた手法であるため、把持物体によっては追加学

^{*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

習が必要となる。

本研究では、画像を用いることで、物体を把持する前に把持安定性を算出することを目指す。まず、ハンド全体を離散体で近似してモデル化する。モデルを用いて、物体把持前の状態において、物体を把持した時のハンドの変形や接触力を算出する。その後、画像処理によって取得した値を用い、把持理論に基づいて把持安定性を算出する。実験では、実機を用いて物体の把持を行う。画像処理によって算出した把持安定性と、物体に搭載した加速度センサの値を比較することで、手法の有効性を評価する。

2. 把持安定性指標

本研究の立ち位置は、新たな安定指標を提案することではなく、画像処理を用いて把持安定性を算出できるか、というものである。そこで、画像処理によって取得すべき値が何かを明確にする必要がある。ここでは、ソフトハンドを用いて把持安定性を評価している先行研究を参考にし、安定性の算出方法を述べる⁽⁵⁾。なお、対象物体は剛体で変形せず、把持中に物体は移動しないものとする。

図2は、ソフトハンドと物体の接触の様子を模式図で示したものである。なおワールド座標系 $\{W\}$ は、図2の左上に示してあるように、カメラ座標系と同じになるように設けている。接触形態について、ソフトハンドを使用しているため、摩擦あり点接触ではなく、図2右側のようなソフトフィンガ型接触を考える⁽⁷⁾。ソフトフィンガ型接触では、各接触点 $\mathbf{p}_i \in (i=1, 2, \dots, N)$ において、力 $\mathbf{f}_i \in \mathbb{R}^3$ およびトルク τ_i が物体に生じていると考えられる。この時、各接触点 $\mathbf{p}_i$ における力とトルク $\mathbf{w}_i$ は次式で定義できる。

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i & \tau_i \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

このとき、物体に加わる合力・合トルク $\mathbf{w}$ は次式のように表現できる。

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^N \mathbf{G}_i \mathbf{w}_i \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{G}_i$ は各接触点の座標系 $\{C_i\}$ から物体座標系 $\{O\}$ への変換行列である。この変換行列は次式により求まる⁽⁵⁾。

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_z & \mathbf{e}_y & 0 \\ \mathbf{p}_i \times \mathbf{e}_x & \mathbf{p}_i \times \mathbf{e}_z & \mathbf{p}_i \times \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

なお、 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ は、各座標の単位ベクトルを表している。ここで接触力について、摩擦円錐を多面錐で近似することで、計算量を抑えることが知られている。物

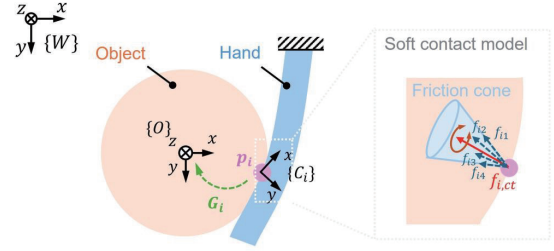


Fig. 2 Grasping stability

体に対する法線方向の接触力を $f_{i,ct}$ とすれば、 $\mathbf{f}_i$ は次式のように表現できる⁽⁵⁾。

$$\mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} f_{i,ct} & \mu_f f_{i,ct} & \mu_f f_{i,ct} & \mu_\tau f_{i,ct} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

μ_f および μ_τ は、それぞれ力とトルクの摩擦係数である。式(1)(3)(4)を用いることで、式(2)によって $\mathbf{w}$ を算出することができる。

得られた $\mathbf{w}$ について、この凸包の多面体が、原点を中心とする6次元の球を含むときに把持は安定する⁽⁸⁾。また、この球の半径が安定余裕を表すことになり、半径が大きいくほど安定していることを表す。本研究では、2次元的な変形を考えているため、画像より推定可能な $\mathbf{w}$ の xy 成分を用いて安定性の算出を行う。 $\mathbf{w}$ の力成分とトルク成分それぞれについて xy 平面での凸包を考える。安定指標算出には Q_{LMW} を用いる。これは、座標系原点から凸多面体までの距離 d_i を用いて、次式で求められる。

$$Q_{LMW} = \min(d_i) \quad (5)$$

すなわち、原点から凸多面体までの距離が安定余裕を表しており、この値が大きいくほど安定な把持が可能ということになる。

以上の内容をもとに、画像処理を用いて把持安定性を算出する。把持安定性の算出には、式(3)より接触位置 $\mathbf{p}_i$ および接触位置における単位ベクトル $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 、式(4)より接触力 $\mathbf{f}_i$ の算出が必要であるとわかる。そこで、3章では画像処理を用いた値算出方法について述べる。3.1節にて手法概要を述べた後、3.2節にてソフトハンドの近似モデル、3.3節にて接触位置、3.4にて接触位置における単位ベクトル、3.5節にて接触力の算出方法について述べる。

3. 画像処理を用いた把持安定性算出

3.1 手法概要

画像処理を用いることで、物体を把持する前に把持安定性を算出することを目指す。そのために構築した手法の概要を図3に示す。まず、ソフトハンドをモデル化する。次に、モデルを用いる

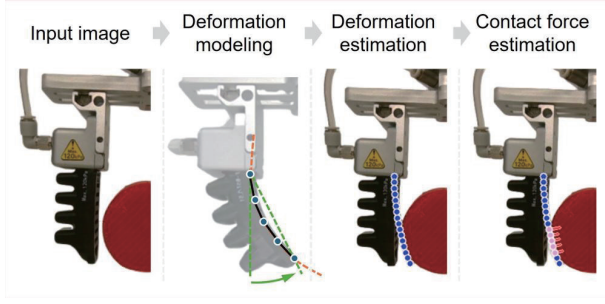


Fig. 3 Overview of the proposed method

ことで、物体を把持した時のハンドの変形状態を、物体を把持する前に予測することができる。その後、ハンドの変形予測の結果を用いて、接触点にて発生する力を算出する。以上で求めた値を用いることで、2章にて紹介した理論によって把持安定性を評価することができる。

3.2 ソフトハンドのモデル化 物体把持後のハンドの状態を予測するため、ハンドをモデル化する。まず、図 4(a) のように、ハンド全体を剛体-バネ関節直列モデルで離散化する⁽⁹⁾。ハンドの物体接触面側について、青色で示すバネ関節と、黒色で示す剛体リンクが、直列に配列しているものとして近似する。続いて、ハンドの柔軟性を示す指標として、図 4(b) に緑色で示す、ハンドの曲げ角度を用いる⁽¹⁰⁾。曲げ角度は、ハンドの根元から先端までのたわみ角で定義される。また各バネ関節における変形角度の総和は、曲げ角度の値と一致するものとする。最後に、図 4(c) に橙色で示される、一定曲率での変形の仮定である⁽¹¹⁾。この仮定の導入によって、各関節のバネ定数は同じ大きさとして扱うことができる。以上の条件によってモデル化を行い、次節以降の画像処理を行う。

3.3 接触位置の算出 接触位置の算出では、先行研究における変形予測を用いる⁽¹²⁾。変形予測では、物体の形状やハンドの位置の情報を活用して、物体を実際に把持する前に、ハンドの変形状態を予測している。なお、このときの変形状態は、3次元ではなく、 xy 平面上の2次元での変形を予測する。具体的には、先行研究の手法を用い、図 5(a) に示す入力画像に対して、図 5(b) 中の青色の円のように変形を予測する。このとき、図 5(c) のように、物体の輪郭とハンドの変形予測点を描画する。ここでは、物体の輪郭を赤色、ハンドの変形予測点を青色で描画している。描画によって発生する輪郭の重なりから、図 5(d) の紫色の円のように接触するバネ関節の位置や個数を算出することができる。ここで算出した接触するバネ関節の位置は、画像座標系原点に対する位置となっている。しかし、2章内の式 (3) で扱う接触位置 $\mathbf{p}_i$ は、物体原点に対す

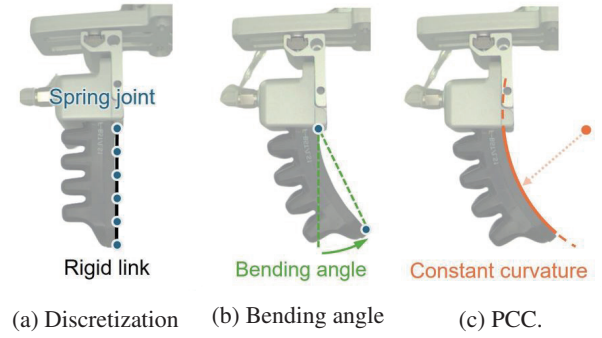


Fig. 4 Modeling of a soft robotic hand

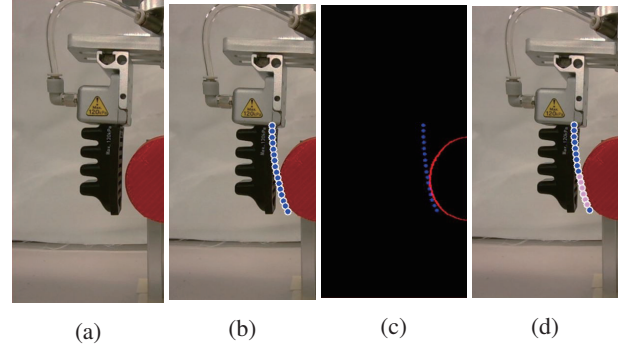


Fig. 5 Detection of contact points. (a) Input image, (b) Result of deformation prediction, (c) Contours of object and hand, (d) Detected contact points

る位置として扱われる。そこで、カメラ座標系を基準とした接触関節の位置を $\mathbf{p}_{i,ct}$ 、物体の重心位置を $\mathbf{p}_{obj}$ とすれば、 $\mathbf{p}_i$ は次式により算出することができる。

$$\mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{i,ct} \\ y_{i,ct} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここでそれぞれの x, y は、位置の x, y 成分をピクセルで表現し、その後ステレオカメラから取得した深度画像をもとにメートル単位系に変換したものである。また、2次元の変形の予測を行うため、 z 成分の値は0となっている。以上によって、接触位置 $\mathbf{p}_i$ の算出が可能となる。

3.4 接触位置における単位ベクトルの算出 続いて、接触位置における単位ベクトルを求める。まず、画像から $\mathbf{e}_x$ 、すなわち2次元画像内における接触力の法線ベクトルを算出する。接触点における物体の接線方向を求める際、物体の輪郭情報を活用する方法が考えられる。この場合、物体の形状を何かしら関数の形で表現し、その関数に対して接触点 $\mathbf{p}_i$ の微分値を用いることによって法線ベクトル算出が可能となる。しかし、物体の形状を、例えばフーリエ変換を用いて関数を算出した場合、計算時間がかかってしまい、リア

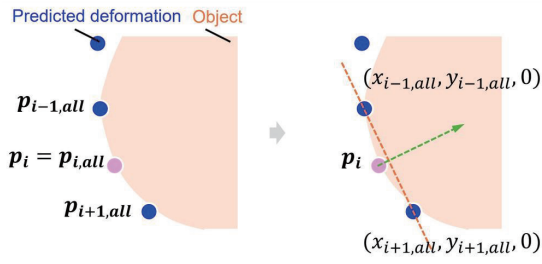


Fig. 6 Calculation of unit vectors

リアルタイムでの推定が困難になると考えられる。また、関数への近似数によっては、実際の物体形状とは大きく異なった形状となってしまう、誤った法線ベクトルを算出してしまふ可能性がある。そこで、ハンドの変形予測の結果を用いることで、リアルタイムかつ正確に法線ベクトルを算出する。

図6に概要を示す。ハンドが物体になじんでいるとき、なじんでいる部分は物体形状となっている。そこで、接触点付近におけるバネ関節の位置情報を用いることで、接触点における法線方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_x$ を算出する。推定されたすべてのハンドの関節点を $\mathbf{p}_{i,all}$ とする。まず、図6に示す橙色の点線のように、検出された接触点 $\mathbf{p}_i$ に対して、前後の2点 $\mathbf{p}_{i-1,all}, \mathbf{p}_{i+1,all}$ を結ぶ直線を算出する。その後、図6の緑線のように、橙色の線に垂直で、 $\mathbf{p}_i$ を通るベクトルを求める。これは、次式にて算出することができる。

$$L = \sqrt{(x_{i+1,all} - x_{i-1,all})^2 + (y_{i+1,all} - y_{i-1,all})^2} \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_x = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} -(y_{i+1,all} - y_{i-1,all}) \\ x_{i+1,all} - x_{i-1,all} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

なお x, y は、2点 $\mathbf{p}_{i-1,all}, \mathbf{p}_{i+1,all}$ それぞれの xy 成分を表している。算出した $\mathbf{e}_x$ に対し、 $\mathbf{e}_y$ は xy 平面上で垂直であること、 $\mathbf{e}_z$ は $\mathbf{e}_x$ と $\mathbf{e}_y$ の外積の関係であることから算出できる。以上より、接触位置における単位ベクトル $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ を算出できる。

3.5 複数接触力の算出 複数接触点での力算出については、先行研究における接触力推定手法を用いる⁽¹³⁾。まず、接触力推定の理論について説明する。物体と接触しない状態では、図7(a)の緑線のように、ハンドが曲げ角度 $\Theta_{i,std}$ だけ曲がっているとする。この後、物体と接触したとき、図7(b)の緑線のように曲げ角度が変化して Θ_i になったとする。このとき接触力が発生するわけだが、それは図7(c)の紫色の線のように、ハンドの各バネ関節にて生じた角度変化によるものであると考える。3.2節にてハンドは一定曲率で変形するものと仮定しているため、各バネ関節のバネ定数は同じ大きさとして扱うことができる。

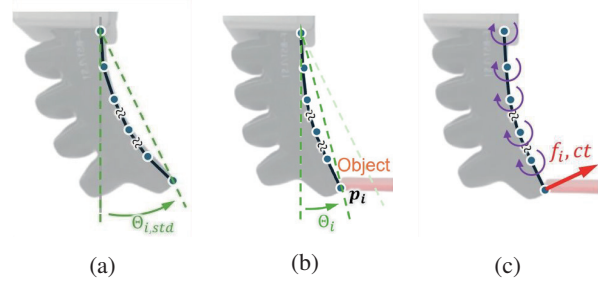


Fig. 7 Overview of methods for contact force calculation. (a) Bending angle before contact, (b) Bending angle after contact, (c) Contact force and torque

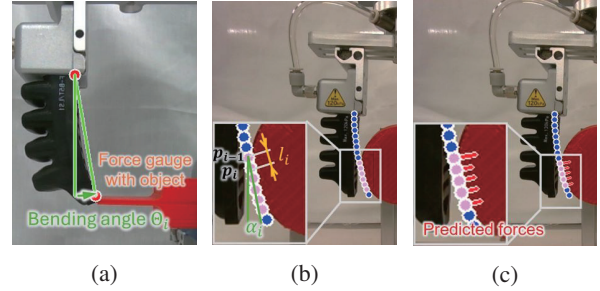


Fig. 8 Calculation of contact force using image. (a) Calibrate spring constant, (b) Calculation of parameters, (c) Result of force estimation

そのため、接触点にてはたらく力は、基準となる関節から接触している関節の間で生じるトルクの総和によるものと考えることができる。そこで、接触点間の長さを l_i 、角度変化を α_i 、バネ定数を k とすれば、 $\mathbf{p}_i$ に生じる接触力 $f_{i,ct}$ は次式によって求めることができる。

$$l_i = |\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i-1}| \quad (9)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_{i,std} \quad (10)$$

$$f_{i,ct} = \frac{k\Delta\alpha}{l_i} \quad (11)$$

なお α_i および $\alpha_{i,std}$ は、次式のように関節のなす角度を表している。

$$\alpha_i = \frac{2\Theta_i}{N} \quad (12)$$

続いて、先述した算出方法に必要な値を、画像処理によって取得する方法を述べる。まず、キャリブレーションによってバネ定数 k を算出する。これは図8(a)に示すように、ハンドの変形を画像処理によって算出し、その時の接触力をフォースゲージによって取得することで、曲げ角度と力の大きさの関係を取得することで算出できる⁽¹³⁾。続いて図8(b)のように、変形推定によって複数接触点を推定した後、 l_i および $\Delta\Theta$ を算出する。なお l_i は深度画像を使うことでメートル単位系で算出する。以上によって、画像から得られた値

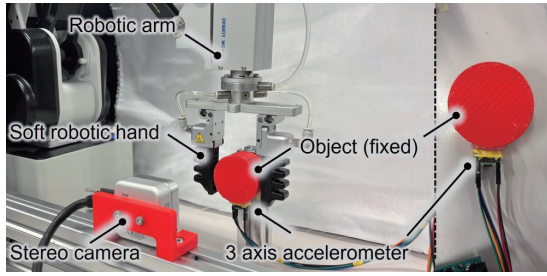


Fig. 9 Experimental environment

をもとに $f_{i,cl}$ を算出することができる。図 8(c) では、算出した接触力を赤色の線で示している。

最終的に、3.3 節から 3.5 節にて算出した値を、式 (2) に代入することで、物体重心における合力・合トルク w を算出することができる。また式 (5) を用いることで、把持安定性を評価することができる。

4. 実験

提案手法の有効性を検証するため、画像処理を用いた提案手法での安定性評価と、実機によって計測した安定性の比較実験を行った。

4.1 実験環境 図 9 に示す環境にて実験を行った。本実験では、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 RealSense D405、ロボットアームに DOBOT 社の MG400、3 軸加速度センサに株式会社秋月電子通商の KXR94-2050、加速度センサの値読み取りに Arduino Uno R3 を用いた。また物体には、図 9 右側に示す、3D プリンターで製作した PLA 素材で 50g の円柱を用いた。物体はアルミフレームと治具を用いて固定し、3 軸加速度センサは物体にグルーガンを用いて固定した。

4.2 実験および評価方法 まず、物体把持前の状態で、提案手法によって安定性を算出した。安定性算出後、ソフトハンドを駆動して物体を把持し、定めた経路にしたがってロボットアームを動かした。その際、物体に搭載した 3 軸加速度センサを用いて、センサから得られた振動の最大値を計測した。提案手法によって算出された安定性と、加速度センサから得られた値を比較することで、提案手法を評価した。なお、図 10 に示す通り、把持位置やグリッパの幅を変えた 9 つのパターンにて、各 3 回の把持実験を行った。提案手法によって算出された合力に関する Q_{LMW} の平均と標準偏差、加速度センサで得られた振動の最大値の平均と標準偏差を用いて比較を行った。

4.3 実験結果 提案手法によって算出された安定余裕の平均と標準偏差、加速度センサで得られた振

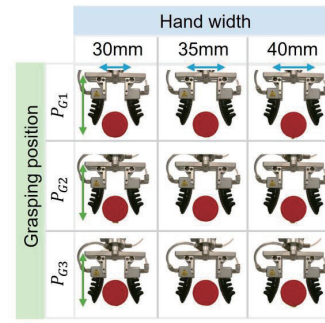


Fig. 10 Grasping position and hand width

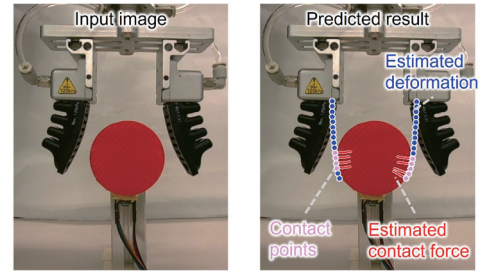


Fig. 11 Example of result at P_{G2} , hand width 35mm

動の最大値の平均と標準偏差の結果を表 1 に示す。また、提案手法での安定余裕の算出結果を図 11 に示す。

表 1 の結果より、把持位置 P_{G1} においてハンドの幅を変えたとき、提案手法によって算出した Q_{LMW} の値が大きくなるにつれて、加速度値が減少していることがわかる。これは、把持位置 P_{G2} および P_{G3} においても同様のことがいえる。よって、ハンドの幅が異なっても、把持位置が同じ場合は、画像によって把持前に安定性を算出することが可能であると考えられる。

しかし、把持位置 P_{G3} でハンドの幅が 30mm, 35mm にて算出された安定余裕 Q_{LMW} に対し、把持位置 P_{G2} のハンドの幅が 30mm, 35mm の方が、加速度の値が大きくなっている。また、 P_{G3} のハンド幅 30mm のとき、 Q_{LMW} は他の場合よりも値が大きいが、算出された加速度が他の場合と同程度になっている。このことから、安定余裕の算出に改善の余地が見られる。そしてその原因は、接触力の算出にあると考えている。先行研究⁽¹³⁾では、指先 1 点のみを接触させた状態で曲げ角度と力の大きさの関係を計測し、バネ定数を算出していた。しかし複数接触する場合、変形による弾性力の影響や、部位ごとでバネ定数が異なることが考えられる。ハンド全体を一定曲率と仮定しているが、ハンドの部位ごとで角度変化による発生力が異なるようであれば、複数接触した状態でバネ定数を算出する必要があると考える。

今後は、以上の要素を考慮して接触力の推定方法を改善していく。また実環境での利用を目指すために、

Table 1 The results of the values calculated using the proposed method and the values from the accelerometer sensor

Position	Width [mm]	Q_{LMW}		Sensor value	
		Mean [N]	Std. dev [N]	Mean [m/s ²]	Std. dev [m/s ²]
P_{G1}	30	0.35	0.002	11.6	0.1
	35	0.32	0.006	12.4	0.3
	40	0.32	0.002	13.0	0.7
P_{G2}	30	0.51	0.020	11.6	0.0
	35	0.47	0.001	11.7	0.3
	40	0.47	0.000	11.9	0.2
P_{G3}	30	1.34	0.068	11.4	0.1
	35	0.47	0.001	11.4	0.0
	40	0.47	0.001	11.5	0.1

物体を固定せず安定性を算出することも目指す。

5. 結 言

本研究では、画像処理による、物体把持前の把持安定性評価手法を提案した。まず、ソフトハンドを剛体-バネ関節直列モデルにて離散化した。その後、離散化モデルを用いて、物体の変形を推定した。変形推定によって、物体とハンドの接触位置、接触位置における単位ベクトル、接触力を算出した。画像処理によって得られた値を、把持理論によって算出された把持安定性指標にて用いることで、画像処理によって安定性の評価をすることができた。実験では、提案手法と実機の加速度センサで得られた値を比較した。把持位置やハンド幅が変化しても、提案手法によって安定性を算出することができた。

今後は、接触力の算出方法を改善することで、より精度の高い安定性把持手法を目指す。また、物体を固定せずより実環境に近い状態での実験を行うことで、手法の有効性の確認、および手法改善を行う。

参 考 文 献

- (1) J. Shintake *et al.*, “Soft Robotic Grippers”, *Advanced Materials*, Vol.30, No.29(2018), pp.170735.
- (2) H. Jang *et al.*, “Soft finger dynamic stability and slip by Coulomb friction and bulk stiffness”, *arXiv:2310.04846*, (2023).
- (3) R. Krug *et al.*, “Analytic grasp success prediction with tactile feedback”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, (2016), pp. 165–171.
- (4) J. Zimmer *et al.*, “Predicting Grasp Success with a Soft Sensing Skin and Shape-Memory Actuated Gripper”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2019), pp. 7120–7127.
- (5) W. Park *et al.*, “A Sensorized Hybrid Gripper to Evaluate a Grasping Quality Based on a Largest Minimum Wrench”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2 (2020), pp. 3243–3250.
- (6) C. Choi *et al.*, “Learning Object Grasping for Soft Robot Hands”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3(2018), pp. 2370–2377.
- (7) M. A. Roa and R. Suárez, “Computation of independent contact regions for grasping 3-d objects”, *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 25, No. 4(2009), pp. 839–850.
- (8) 原田研介ら, “接触面を考慮したソフトフィンガ型把持の安定性評価”, *計測自動制御学会論文集*, Vol.51, No.2(2015), pp.83–91.
- (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, (2023), pp.47–51.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 甲斐亮吾ら, “接触位置を考慮したソフトハンドのブ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*, (2024), 1P1-G10.
- (13) 甲斐亮吾ら, “ソフトハンドのブリグラスプ変形予測に基づく接触力推定”, *第 42 回日本ロボット学会学術講演会予稿集*, (2024), 3I1-02.
- (14) E. Oberg and F. D. Jones, “Machinery ’s Handbook”, *Industrial Press*, Vol. 1916(1916).