

流体を用いた柔らかい指による薄板の マニピュレーションに関する研究

Study on Sheet Manipulation by Soft Fingertip using Fluid

2157009



研究代表者 室蘭工業大学 助 教 藤 平 祥 孝
(助成受領時：金沢大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程)
共同研究者 金沢大学 准教授 渡 辺 哲 陽

【研究の目的】

日常生活や極限環境（宇宙等）で薄板を扱う場面は多い（例：ダンボール・厚紙の操作、フィルムの貼り付け作業）。工場では薄板の表面状態（濡れ）や表面形状（凹凸）が既知であるため、吸着機構を用いた専用のロボットハンドを用いることができる。しかし、日常生活等の環境では薄板の状態が未知であり、専用設計されたハンドでは対応することが困難である。汎用性のある多指ロボットハンドであれば、未知の状態の対象物体に人間のように幅広く対応することが可能である。本研究では、多指ロボットハンドによる表面形状・状態が未知である薄板のマニピュレーション手法の構築を目指す。この手法の構築のキーポイントは、個体差による影響が表面に比べ少ない薄板の辺の把持である（図1参照）。薄板は図1のように平置きされている場合が多く、その状態から薄板の上下を挟むように持つことは難しい。また、薄板の面に塗膜を塗布したときはその表面に触れることを避けたい。そこで、本研究では薄板の辺を把持することを試みる。このとき薄板に曲げ変形が生じる。この変形を積極的に活用するマニピュレーション手法も提案する。

マニピュレーションの中で変形を活用するためには、薄板の変形や薄板に加える力の制御がロボットに求められる。薄板の変形・力の制御

をするとき薄板の力学モデルが必要となる。本研究では、最初に薄板の力学モデルの構築を行う。薄板の辺を把持するとき、不安定な変形（座屈現象）による力の変動や薄板との接触点の不確かさが存在する。流体を用いた柔らかい指（流体指）の方が剛体を用いた硬い指（剛体指）よりも、上記のような把持を不安定にする要因を吸収できると考えられる。本研究では、次に流体指と剛体指のような指の剛性が薄板の把持に与える影響について検証を行い、薄板のマニピュレーションに適切な指の剛性の設計・制御の指針を明らかにする。得られた指針に基づいた薄板の把持戦略についても提案する。

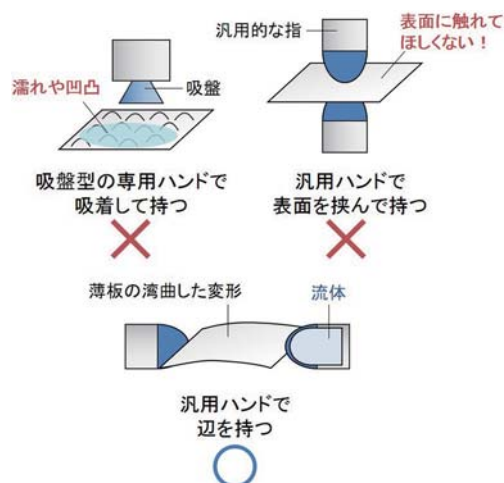


図1 汎用ハンドによる薄板の把持の方針

[研究の内容, 成果]

1. 薄板の力学モデル

薄板の力学モデルを導くために、まず多指ハンドによる把持で最も基本的な2本指での把持を再現した薄板の把持実験を行った。指の剛性による違いがあるのかを確認するために、図2に示す剛性の異なる素材を用いた3種類の指で実験を行った。次に、得られた実験結果に基づいて、オイラーの座屈時の大変位理論から把持時の薄板の2次元の力学モデルを導き、実験結果との比較を行いその妥当性の検討を行った。

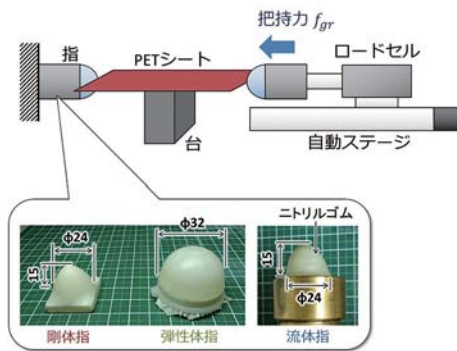


図2 把持実験装置の模式図と用いた指

図2のような実験装置を用いて薄板の把持実験を行った。片側の指は固定してあり、もう一方の指を自動ステージにより閉じていき、台の上に設置された薄板は把持され圧縮されていく。駆動側の指は自動ステージにロードセルを介して取付けられており、把持時の把持力を計測できるようになっている。薄板の変形の計測にはカメラを用いる。薄板の材質はPETであり、サイズはスマートフォンの画面フィルムに近いサイズ (100×70×0.41 mm) とした。剛体 (ABS樹脂)、弾性体 (シリコンゴム) でそれぞれ作成した指と、弾性膜の中を流体 (機械油 ISO VG 100) で満たした指 (流体指) の3種類を用いた (図2)。表面の状態を合わせるために、各指の表面は同じニトリルゴムで覆ってある。流体指は指の内圧を高くすることで指の剛性を高くすることができる。今回の実験で

は、初期内圧が3 kPaと6 kPaと2つの場合で実験を行った。指の剛性は剛体指、弾性体指、流体指 (6 kPa)、流体指 (3 kPa) の順に低い。指を閉じていく速度は3 mm/sとし、各指で3回把持が成功 (滑らず把持) するまで実験を行った。各指での成功率は、剛体指は54.5%、弾性体指は37.5%、流体指はともに100%であり、把持するときの接触点の位置の不確かさに対して流体指が最もロバストであった。

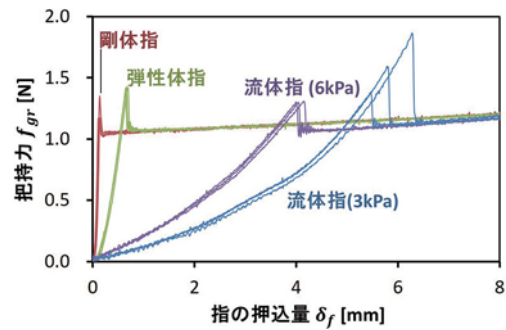


図3 指の押込量と把持力の関係

図3に各指での指の押込量と把持力の関係を示す。各指ともピークに達したときに薄板に座屈が発生し、その後薄板が曲げ変形する。ピークに達する前は指側が変形している領域である。そのため、ほとんど指が変形しない剛体指では、この領域がなくすぐに座屈してしまう。従って、図3を見て分かるように剛体指、弾性体指、流体指 (6 kPa)、流体指 (3 kPa) の順に座屈するまでの押込量が大きくなる。つまり、指の剛性が下がるにつれて、把持力の増加が緩やかになる。そのため、剛体指のように非常に硬い指では、接触の直後に把持力が座屈荷重に到達してしまい、座屈前の把持力の細かい制御が非常に難しい。さらに、少しでも接触点にズレがあると、把持力が摩擦円錐から外れてしまう。従って、接触点の位置の不確かさに対するロバスト性が低くなる (成功率 54.5%)。一方で、流体指のように非常に柔らかい指では、細かい把持力の制御がしやすい。また、接触点のズレは指が変形することで吸収されるので、把持力は摩擦円錐内となり把持を維持しやすい。従っ

て、接触点の位置の不確かさに対するロバスト性が高くなる（成功率 100%）。

今回の対象となる薄板は、1) 薄板と指との接触点は回転自由な拘束、2) 曲げ変形が支配的、3) 軽く重力の影響とが無視でき等方弾性体である。よって、2 本指で把持された薄板は図 4 のような 2 次元のオイラー梁モデルで考えられる。

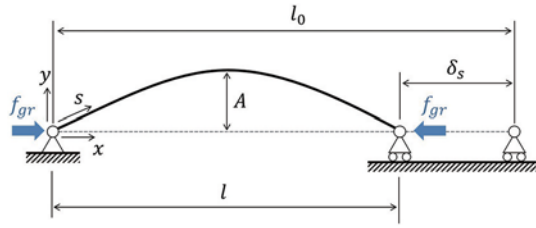


図4 薄板の2次元モデル

薄板の力学モデルとして薄板座屈後の把持力 f_{gr} と薄板端点の変位 δ_s （薄板の変形を代表する変数）の関係を求める。座屈直後に薄板に生じる曲げ変形は大変形である。そこで、オイラーの座屈を対象とした大変位理論^[1]を用いる。まず、座屈後のポテンシャルエネルギー U は、

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^{l_0} \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds - f_{gr} \delta_s + f_{dis} \delta_s \quad (1)$$

となる。ここで、 E はヤング率、 I は断面二次モーメント、 θ はたわみ角である、この式の第1項は曲げ変形により蓄えられるひずみエネルギー、第2項は端点に変位したことで把持力 f_{gr} がなした仕事である。ここで図3を見ると、座屈後に力が低下（散逸）している。そこで、今回は座屈時に散逸した力 f_{dis} のなした仕事を第3項で考慮する。この U を座屈点近傍（ $f_{gr} = f_{cr}$, $\theta = 0$ ）で摂動させ第4変分まで求める^[1]と、

$$\frac{f_{gr}}{f_{cr} - f_{dis}} = 1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\pi A (\delta_s)}{l_0} \right)^2 \quad (2)$$

を得る。 A は中心でのたわみ量、 l_0 は変形前の長さ、 f_{cr} は座屈荷重（図3のピーク値）である。

導出した把持力 f_{gr} と薄板端点の変位 δ_s の関係を表す式 (2) と実験結果との比較を行う。実験に用いた薄板のヤング率を $E = 3 \text{ GPa}$ とし、定数である f_{cr} と f_{dis} は、各実験データから求め平均化したものを用いた。図5にその結果を示す。

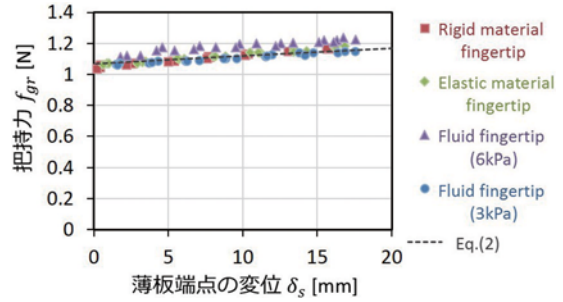


図5 把持力 f_{gr} と薄板端点の変位 δ_s との関係

この図から実験値と式 (2) より求めた理論値とがよく合致していることが分かる。図5を見ると、変位の増加に対して把持力の増加が少ないことが分かる。つまり、把持力を増加させたいときに、薄板の把持では指を閉じこんで把持力を増加させようとしても、意図した把持力の増加が得られないことを示している。

3. 把持安定性

把持安定性を評価する指標として、どのくらいの外力に把持が耐えられるのかという指標（把持耐力）がある^[2]。本研究では、この把持耐力に着目をして、薄板把持時の剛体、弾性体、流体指ごとの把持安定性について実験的に検証を行った。

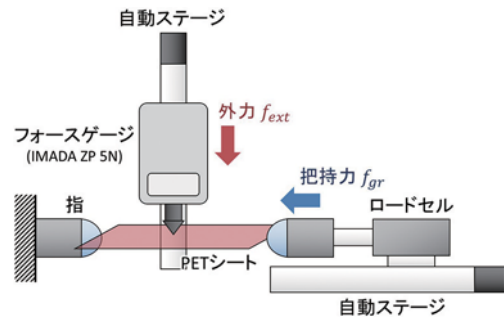


図6 各指での把持力と把持耐力の関係

図6に把持耐力実験の装置の模式図を示す。把持した薄板に外力を負荷するための鉛直方向の自動ステージとその力を計測するためのフォースゲージを図2の装置に加えた構成となっている。この実験で使用した薄板と指は前述のものと同様である。今回の実験では流体指の初期内圧を3 kPaと設定した。実験手順は、指と薄板の接触点 ($f_{gr}=0$) から指を水平方向に5, 10, 15, 20, 25 mmと移動した位置で静止させ、下方向に凸になるように把持する。その後、鉛直方向のステージを駆動させ薄板の中央に鉛直方向の外力を薄板が落ちるまで与える。各指と各移動量で3回ずつ実験を行った。また、鉛直方向の外力を与えときの移動ステージの速度は1 mm/sとした。

把持力と把持耐力との関係を図7に示す。把持力の増加に対して把持耐力の増加が流体指の方が小さい。一方で、剛体指の方がその増加率が高いことが分かる。把持実験の結果(図3)も考慮すると、剛体指は座屈後の領域でしか把持力を制御できず $f_{cr}-f_{dis}$ 以下の把持力で把持できないが、大きな把持耐力を発揮できる。一方で、流体指は座屈前の領域 ($f_{cr}-f_{dis}$ 以下の把持力) で把持力を制御できるが、大きな把持耐力を発揮することができない。つまり、指の剛性によって長短所があり、作業に応じて選択する必要がある。

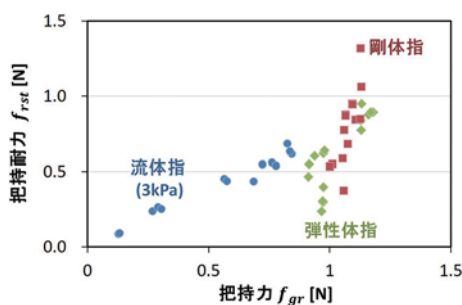


図7 各指での把持力と把持耐力の関係

4. 指の剛性と薄板の把持戦略

これまでの結果に基づいた薄板のマニピュレーションのための指の剛性を変化させた把持

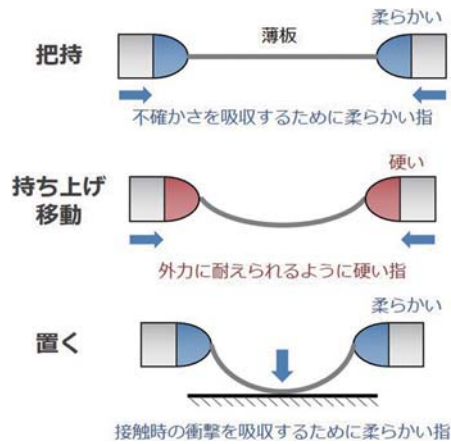


図8 指の剛性を変化させた把持戦略

戦略を図8に示す。まず、シートと接触するときは柔軟かい指が良い。上述のように柔軟かい指は小さい把持力の制御がし易く、接触点の不確かさにロバストであるためである。次に、シートを持ち運びするときは、外力(慣性力等)が作用するためより大きな把持耐力を発生できる硬い指が良い。最後に、シートを置くときは、接触時に衝撃や強制変位が加わるためそれらを吸収できる柔軟かい指が良い。従って、薄板のマニピュレーションには単純に柔軟かい指でなく、場面に応じて剛性を変化させられる指を用いることが望ましい。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、薄板の座屈変形後の力学モデルの構築とその検証のための把持実験と、把持耐力に着目した把持安定性の検証を行った。これらの検証実験より、流体を用いた柔軟かい指と剛体に近い硬い指の薄板の把持における長短所が明らかとなり、各指の長所を生かした指の剛性を変化させる把持戦略の提案をした。

今後、構築した力学モデルを用いて変形を活用したマニピュレーションを実現するための制御手法を構築する。また薄板のマニピュレーションに最適な指の開発や提案した戦略に沿ったマニピュレーションの実証も行っていく。

【参考文献】

- [1] B. Budiansky, "Theory of Buckling and Post-Buckling Behavior of Elastic Structures," in Advances in Applied Mechanics, Academic Press, (1974), pp. 1-65.
- [2] T. Watanabe and T. Yoshikawa, "Grasping Optimization using a Required External Force Set," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, vol. 4, no. 1, pp. 52-66.

【成果の発表，論文等】

(学術論文，査読あり)

- [1] Y. Fujihira, T. Nishimura and T. Watanabe: Bent Sheet Grasping Stability for Sheet Manipulation,

IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 1 (1), pp. 415-422.

(学会発表，査読あり)

- [2] 藤平祥孝，西村斉寛，渡辺哲陽：シートマニピュレーションのための把持安定性，第 21 回 ロボティクスシンポジウム，pp.142-147，2016
- [3] 西村斉寛，藤平祥孝，渡辺哲陽：把持耐力向上のためのマイクログリッパ内蔵の流体指の開発，" 第 21 回 ロボティクスシンポジウム，pp. 274-279，2016 (学会発表，査読なし)
- [4] 藤平祥孝，西村斉寛，足立良太，渡辺哲陽：座屈を利用したシートマニピュレーション，SI2015，2015
- [5] 西村斉寛，藤平祥孝，渡辺哲陽：流体指によるシートマニピュレーションのための指部の設計，SI2015，2015