

# 飛び移り座屈を利用した軽量ソフトグリッパの開発

## 第3報 把持対象にかかる局所的な負荷を分散する爪形状の提案

○花守拓樹（九州大学） 河村晃宏（九州大学） 倉爪亮（九州大学）

### 1. 緒言

人間の作業を自動化、高速化するために、これまでに様々なグリッパが開発されてきた。その中には、野菜や果物といった、サイズや形状に個体差のある物体を把持するため、対象の形状に沿って変形しつつ把持することのできるグリッパも多く存在する[1-3]。しかしながら、人の手であっても傷めずに扱うことが難しい桃のような果物の把持は、それらのグリッパであっても依然困難である。

例えば、[4][5]のように人の指を模したグリッパは、対象に触れる狭い面積に負荷が集中してしまう。また、[6]のようなジャミンググリッパは原理上、対象の全ての面を覆いつつ把持することはできない。[7]のように、閉じた際に把持対象と同一形状となる把持面を持つグリッパも存在するが、把持部全体が剛体のため、個体によって対象の形状に差異がある場合では把持面に負荷が集中することがある。

本研究では、繊細な果物などを傷つけずに把持するために、広域な接触面積を有するソフトグリッパを提案する(図1)。提案するソフトグリッパは、閉じた際に把持対象の外形と同一形状となるような把持面を、三次元の飛び移り座屈を利用した機構によって開閉する。閉じた際に把持対象の外形と一致するような把持面にすることで、対象に外力を加えることなく把持することができる。また、ソフトグリッパはエラストマ材によって一体造形されているため、把持対象のサイズ、形状の誤差を吸収しつつ把持することができる。本研究ではこれまでに、人の手であっても無傷の把持が難しい桃に注目してきた。提案するソフトグリッパを桃の把持に最適な構成にするために、サイズや使用する材料の硬度、駆動部の形状と把持能力の関係を検証してきた[8][9]。しかしながら、個体差の大きい対象を把持する場合は、把持面には把持対象の一部分しか触れず、そこに負荷が集中してしまう。本稿では、把持面をより細かく分割することで、把持対象の個体差を吸収し、接触時の負荷を分散できるソフトグリッパを提案する。爪形状を最適化するために、爪部分の形状が把持能力に与える影響に着目し、爪部分の形状が異なるソフトグリッパの製作と、それぞれの比較を行った。

### 2. 飛び移り座屈を利用したソフトグリッパ

本稿では、爪の本数が異なる、4本爪、8本爪、16本爪の3種類のソフトグリッパを製作した(図2)。桃の外形に沿って把持するための球状の把持部に入れるスリットの数を変えることで爪の数を変えているため、爪の本数が多くなるごとに爪の幅が狭くなるように設計されている。爪が小さくなるほど爪の形状は棒状に近づいていくため、球殻に近い爪を有する4本爪と比較すると、16本爪の爪一本当たりの剛性は低くなって

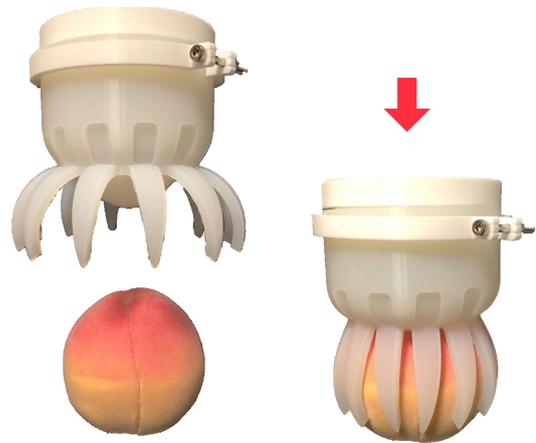


図1 ソフトグリッパの外観

しまう。一方で、爪の分割数が多いほど、把持対象の形状誤差を吸収しやすくなる。

また、8本爪および16本爪のソフトグリッパは、これまでに開発したもの[9]よりも爪を小さくし、数を増やしている。これによって爪単体の剛性が下がり、飛び移り座屈による開、閉それぞれの状態保持を妨げる力を小さくすることに成功している。加えて、状態を保持しやすくするために、爪部分の変形の妨げとなっている部分に窪みを設けている。これらの工夫によって、今回開発した幾つかのソフトグリッパでは、状態保持を実現している。飛び移り座屈現象による状態保持の実現によって、下側に膨らんだ部分を押し付けるだけで、受動的に把持動作を行うことができるようになる。その他に、開、閉それぞれの状態を維持するために外力が必要ないという副次的な利点もある。

#### 2.1 動作原理

提案するソフトグリッパは、図3(A)に示されるようにアクチュエータ部と把持部から構成されている。アクチュエータ部内の圧力を上昇させることで、アクチュエータ部の半球殻の部分が飛び移り座屈現象によって大きく変形する。把持部は、アクチュエータ部の変形に従って開閉される。動作原理を図3(B)に示す。

#### 2.2 製作方法

本研究では、3Dプリンタによって造形した型にエラストマ材を流し込み、硬化させることでソフトグリッパを製作した。まず初めに、液体の状態から硬化させるために、2種類のエラストマ材を攪拌する。次に、エアコンプレッサーと真空槽を利用して、攪拌時にエラストマ材内部に発生した気泡を取り除く。最後に、雌型にエラストマ材を流し込み、雄型を押し込んで固定し、硬化が完了するまで安置する。ソフトグリッパの製作に利用した型を図4に示す。



図2 開発したソフトグリッパの一覧

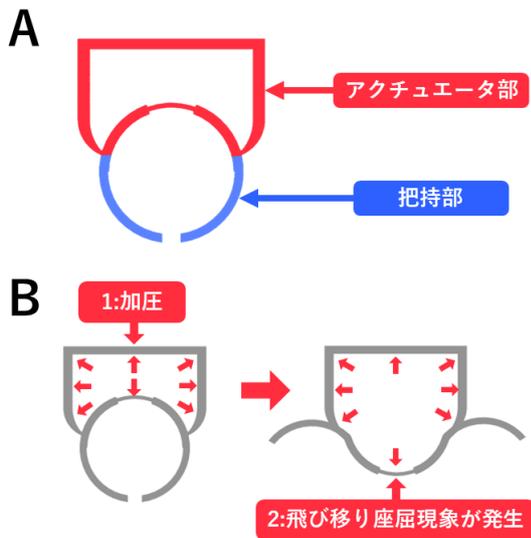


図3 (A) ソフトグリッパの構造 (B) 動作原理

### 3. 性能比較実験

爪形状の違いがソフトグリッパの性能にどのような影響を与えるかを確認するため、爪の剛性と本数の異なるそれぞれのソフトグリッパの性能を比較する実験を行った。実験では、ソフトグリッパを一定速度で上下させることができる直動機構とフォースゲージを組み合わせた実験装置を利用して、把持力の測定、桃の把持を行った。



図4 型の外観



図5 (A) 把持力測定実験 (B) 桃の把持

表1 把持力測定実験

	4本爪	8本爪	16本爪
平均値 [N]	21.56	4.74	4.86
標準偏差	0.630	0.931	0.084

#### 3.1 把持力測定

ソフトグリッパの把持面と同一形状の物体を把持する場合に最適な爪形状を検証するために、把持力の測定実験を行った。実験では、ソフトグリッパの内径と同径の球体を持ち上げる際に加わった力をフォースゲージによって記録し、その最大値を把持力と定義して測定を行った。把持力測定時のソフトグリッパやフォースゲージの位置関係を図5(A)に、5回測定を行った際のそれぞれの把持力の平均と標準偏差を表1に示す。

実験の結果、爪の本数が4本の場合とそれ以外の場合では、把持力に大きく差があり、8本と16本の場合では大きな差が出ないことが分かった。これらの結果から、爪の本数と把持力の間には対数的な相関関係があると考えられる。これは、爪の幅と爪の剛性の間に非

表2 桃の把持実験

	4本爪	8本爪	16本爪
重量 [g]	550	250	200

線形的な相関があることが原因として挙げられる。これらの結果を踏まえて、要求される把持力が4.5[N]程度の場合、より形状誤差を吸収しやすいという点から、8本爪よりも16本爪の方が優れた形状と言える。また、大きな把持力を発揮できるという点では4本爪が優れているといえる。しかしながら、爪の本数と把持力に対数的な相関画あるという予想を踏まえると、要求される把持力が10[N]程度の場合、5本爪から7本爪の間に最適な形状が含まれる可能性が高い。今後は、爪部分の形状と把持能力の相関関係をより正確に分析するために、4本爪と8本爪の間のデータを収集する必要があるといえる。

### 3.2 桃の把持

桃にも、Sから4L、28玉から13玉など、様々なサイズが存在する。収穫時にソフトグリップを利用するケースを想定すると、ソフトグリップの把持面よりも大きな桃を把持する場合も考えられる。把持面より大きい桃を把持する必要がある場合に最適な爪形状を検討するために、把持面より大きい桃を利用した把持実験を行った。実験で利用した桃の模型は重さを調整しながら測定を行うことができるため、ソフトグリップが把持および運搬することができる桃の重さを測定することができる。桃の模型を把持して持ち上げるという動作を5回繰り返すことができれば把持および運搬に成功したものと実験を行った。桃の把持実験の外観を図5(B)に、50[g]ずつ重さを変えて可搬重量を測定した結果を表2に示す。

実験の結果、全てのソフトグリップで200[g]以上の桃を把持することがわかった。また、把持力と同様に、爪の本数と可搬重量の間に対数的な相関関係があると予想される。加えて、全てのソフトグリップにおいて、把持力から予測される可搬重量を大きく下回る結果となった。これは、桃の模型がソフトグリップの内径よりも大きいため、完全に包み込んでの把持を行うことができなかつたことが原因であると考えられる。それ以外にも、把持後の上下動による振動が、重りの重さ以上の負荷を加えていたことも原因と考えられる。また、4本爪のソフトグリップは把持力から想定される可搬重量を他よりも大きく下回っており、およそ4分の1程度となっている。これは、爪単体の剛性が高いことから、サイズの異なる把持対象に接触する面が小さくなってしまふことが原因として挙げられる。これらの結果から、高質量且つサイズの変化が少ない対象を把持する場合には4本爪が、その逆の場合には16本爪が適していると言える。

## 4. 結言

本研究では、桃を傷つけることなく把持するために、広域な接触面積を有するソフトグリップを開発した。提案するソフトグリップは、三次元の飛び移り座屈現象

を利用した開閉機構を採用している。これにより、桃の外形に沿った球状の把持部を、単純な構造体で大きく開閉することができる。

本稿では、提案するソフトグリップの爪部分の形状を最適化するために、爪の本数が異なるソフトグリップを製作し、比較実験を行った。把持力の測定実験では、把持対象の形状誤差が大きく、想定される重さが8本爪の可搬重量を下回っている場合は、爪の本数を増やした方が良いという結論を得た。桃の把持実験では、爪の本数と可搬重量の関係が把持力測定実験で得られたものと近いものとなっていたことから、桃の重量が250[g]を下回っている場合では、爪の本数を増やすことができる可能性が高いという結論を得た。

今後は、今回得られた結果とこれまでの実験結果を元に、使用する材料、把持部の直径、爪の本数などから把持力を予測することができるモデルを作成する。また、爪1本あたりの強度に着目したFEM解析を行うことで、より多くのデータを収集し、前述のモデルの精度を高めていく。これにより、把持対象のサイズと重量に合わせて最適なソフトグリップを設計することが可能となる。

### 謝辞

本研究の一部は、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO)によって実施されました。

### 参考文献

- [1] R. Daniela and T. Michael T: "Design, fabrication and control of soft robots," *Nature*, 521.7553: 467-475, 2015.
- [2] M. Ramses V, et al: "Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers" *Advanced materials*, 25.2: 205-212, 2013.
- [3] H. Yufei, et al: "A Multimodal, Enveloping Soft Gripper: Shape Conformation, Bioinspired Adhesion, and Expansion-Driven Suction." *IEEE Transactions on Robotics*, 2020.
- [4] G, Kevin C et al: "Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs," *Soft robotics*, 3.1: 23-33, 2016
- [5] H. Yufei, et al: "A soft gripper with programmable effective length, tactile and curvature sensory feedback." *Smart Materials and Structures*, 29.3: 035006, 2020,.
- [6] B. Eric, et al: "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107.44: 18809-18814, 2010
- [7] 後藤瑞稀, 池田毅, 伊藤和彦, 森本智明, "開閉式トマト収穫ハンドの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 1P1-A01, 2022
- [8] 花守拓樹, 河村晃宏, 倉爪亮 "飛び移り座屈を利用した軽量ソフトグリップの開発 第2報アクチュエータ部の構造最適化", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(CD-ROM), 12, 21st, 2020
- [9] Hiroki Hanamori, Akihiro Kawamura, Ryo Kurazume: "Soft Gripper Using 3D Snap-Through Buckling for Perishable Fresh Fruits Handling 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 27th 2022), GS26-7, pp. , doi:, on-line, 2022.1.25-27, 2022