解 説

ソフトロボットハンドによる食品ハンドリング

Soft Robotic Hands for Food Material Handling

平 井 慎 一* 王 忠 奎* *立命館大学ロボティクス学科
Shinichi Hirai* and Zhongkui Wang* *Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

1. 緒 言

本解説では、食品ハンドリング用のロボットハンドを紹介する。日本では、1日に数百万食の弁当が製造、販売されている。弁当への食品のパッキングは、そのほとんどを人手に頼っているのが現状である。賞味期限の観点から、弁当は消費地の近くで製造する必要がある。しかしながら、人手を確保することが近年は困難になりつつあり、パッキング作業の自動化が望まれている。また、菓子の箱への詰め込みや農水産物の仕分け等において、自動化への要望が高い。食品産業において、加熱調理や混合、冷凍等の調理工程には、多くの自動化機器が導入されている。一方、パッキングや仕分けなどのハンドリング作業の多くは、人手に頼っている。近年の人手不足に伴い、これまで人手で成されてきたハンドリング作業の自動化が必要とされている。

食品のハンドリングが困難である理由として、1) 多くの食品が柔らかい、2) 食品の形状や特性には、ばらつきが大きい、3) 段取り替えが多いということが挙げられる。弁当には多くの柔らかい食品が詰められている。唐揚げや卵焼きなどは、個々の形状や柔らかさ、表面特性が異なる。また、弁当の製造ラインでは、ある弁当を作った後に、別の弁当を作っており、結果として段取り替えの頻度が高い。したがって、食品ハンドリングを自動化するためには、食品の形状や特性のばらつきに対応する必要がある、さらに価格競争力が望まれる。一方、自動車や電気製品の製造で必要とされるほどの精度は要求されない。

従来の自動化においては、一種類の部品に対して専用のグリッパーを設計し、それを用いて部品を把持することが多い。この方式においては、部品数と同数のグリッパーを用意する必要がある。このような専用グリッパー方式は、部品の形状や寸法のばらつきが小さいことが前提となる。一方、食品産業においては、個々の食材の形状や寸法のばらつきが大きいため、このような従来方式を適用することは困難であり、新しいアプローチが必要となる。

食品の形状や特性のばらつきに対応してハンドリングを実現する一つの方策は、エラストマーやファイバーに代表される柔軟な材料をロボットハンドに導入することである。

すなわち、食品と接触する物理的インタフェース部分に柔らかい材料を用いることにより、形状や特性のばらつきが吸収されることを期待できる。我々は、柔軟な材料を用いたロボットハンドにより、食品のハンドリングを実現することを目指している。本解説では、その成果として、プリンタブルソフトグリッパー、プレストretch指グリッパー、環状シェルグリッパー、バインディングハンドを紹介する。

2. プリンタブルソフトグリッパー

空気圧を印加すると曲がるエラストマー製の指から成るロボットハンドが提唱されている [1]~[3]。ブリーツ構造を有する指は、一つの面に沿って複数のチャンバーが配置されている。指に空気圧を印加すると、チャンバーが膨張し、指に印加した圧力に応じて指に曲げ変形が生じる。複数の指から構成されるロボットハンドにより、物体を把持することができる。指を製作する方法として、1) 型を用いる鋳造、2) 三次元プリンタによる印刷が考えられる。近年、エラストマー製の部材を印刷できる三次元プリンタが市販され、様々なエラストマー製の指を試作することが容易になってきた。そこで、エラストマー製の部材を印刷できる三次元プリンタを用いて、エラストマー製の指から成るハンドを試作し、食品ハンドリングに適用した [4] [5]。このハンドを、プリンタブルソフトグリッパーと称する。

プリンタブルソフトグリッパーのプロトタイプを図1(a)に示す。このグリッパーは、空気圧の加圧によって曲がるエラストマー製の指から構成されている。複数のエラストマー製の指から成るグリッパーは、図1(b)に示すように、対象物を把持することができる。このプリンタブルソフトグリッパーの製作工程を図2に示す。まず、三次元プリンタ (Stratasys 社製 Objet350Connex) で、指の部品 (図2(a)) を製作する。一つの指は二つの部品から成る。複数

図1 プリンタブルソフトグリッパーのプロトタイプ

原稿受付 2019年4月1日

キーワード: Handling, Soft Gripper, Food Materials

〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

*Kusatsu-shi, Shiga

のチャンバーを有する部品と、蓋となる部品である。部品の黒い部分はエラストマー (TangoBlack+)、白い部分は硬い樹脂 (VeroWhite) から成る。さらに、ベース (図2(b)) を硬い樹脂で印刷する。次に、指を構成する二つの部品を接着する (図2(c))。製作した3本の指をベースのスナップショットに差し込むと、プリンタブルソフトグリッパーが完成する。プリンタブルソフトグリッパーの指に空気圧を印加すると、曲げ変形が生じる。製作した指の変形を図3に示す。圧力が高くなるにつれて、曲げ変形が大きくなる。

図4に示すように、試作したプリンタブルソフトグリッパーは、卵や食材入りカップ等、様々な食材を把持することができた。また、図5に示すように、ロボットマニピュレータの先端にプリンタブルソフトグリッパーを設置することにより、複数の食材入りカップを箱にパッキングすることができた。

三次元プリンタを用いると、様々な構造や特性を有する

指を試作することができる。図6に三種類の指を示す。図6(a)の指では、空気圧チャンバーが一様に配置されている。図6(b)の指では、空気圧チャンバーの配置が不均等である。図6(c)の指では、指の中央部と指の両端で硬さが異なる。それぞれの指を三次元プリンタで試作し、空気圧を印加し、指の変形を調べた結果を図の中段に示す。さらに、有限要素シミュレーションで指の変形を計算した結果を図の下段に示す。図6(a)の指では、変形が一様であり、指の変形形状は円形に近い。図6(b)の指では、空気圧チャンバーが少ない中央部で変形が小さく、結果としてリンク構造の変形に近い形状を示す。図6(c)の指では、指の中央部が柔らかい材料で、指の根本と先端が硬い材料で作られており、結果として中央部の変形が大きい。以上のように、プリンタブルソフトグリッパーにおいては、実現する構造や特性の自由度が高く、対象物に応じて適切な指を設計・製作することができる。

3. プレストレッチ指グリッパー

プリンタブルソフトグリッパーの指は、下方を向いており、対象物を指の間に入れることが難しい。この課題を解決するために、プレストレッチ指グリッパーを提案した[6]。図7(a)に示すプレストレッチ指ハンドは、自然状態で指が外側に開いており、対象物を指の間に入れやすい。空気圧を印加すると、図7(b)に示すように指が内側に曲がり、対象物を把持することができる。

図2 プリンタブルソフトグリッパーの構成部品

図3 空気圧印加によるソフトフィンガーの変形

図4 プリンタブルソフトグリッパーによる食品の把持

図6 三種類のプリンタブルソフトグリッパーの指

図5 食材入りカップの箱へのパッキング

プレストレッチ指の原理を図8に示す。プレストレッチ指は、プリンタブルソフトグリッパーの指と曲げ変形のみ可能でほとんど伸縮しないフィルムから成る(図8(a))。プリンタブルソフトグリッパーの指をあらかじめ引っ張り(図8(b))、伸ばしたままの状態フィルムを張り付ける(図8(c))。引っ張りを解除すると、指はフィルムを貼っていない側に曲がる(図8(d))。すなわち、フィルムを貼っている面は伸縮せずに曲がり、フィルムを貼っていない側は縮み

(a) 自然状態 (b) 加圧状態

図7 プレストレッチ指グリッパー

図8 プレストレッチ指の原理

図9 プレストレッチ指の製作

ながら曲がる。この曲がっている自然状態により、対象物に接近する。プレストレッチ指の製作過程を図9に示す。

食品の把持実験のために、食品サンプルを製作した(図10)。この食品サンプルは、形状や外観のみならず、重量や柔らかさが実物に近い。試作したグリッパーによる把持やハンドリングが可能かどうかを、食品サンプルを用いて検証し、その後に実物を用いて検証する。これにより、グリッパーの設計・試作・評価を、効率的に繰り返すことが可能になる。

プレストレッチ指ハンドは、スパゲティが入ったカップを把持することができた(図11(a))。さらに、唐揚げのサンプル(図11(b))、鮭の切り身のサンプル(図11(c))、卵焼きのサンプル(図11(d))等、カップに入っておらず、表面に凹凸のある食品のサンプルを把持することが可能であった。したがって、プレストレッチ指ハンドを用いることにより、様々な食品を把持することができると考えられる。

4. 環状シェルグリッパー

プリンタブルソフトグリッパーやプレストレッチ指グリッパーにおいては、空気圧の印加により曲がる方向のみならず、それ以外の曲げやねじりの剛性が低い。結果として、意

図10 ハンドリング実験用食品サンプル

図11 プレストレッチ指グリッパーによる食品の把持

図しない曲げ変形やねじり変形が生じやすく、ハンドリングに影響を与える可能性がある。例えば、斜め方向から接近して食材を把持する場合、重力により指が下方に曲がり、把持が困難になる可能性が高い。このような課題を解決するために、環状シェルグリッパーを提案した。

環状シェルグリッパーは、円形のシェルとシェルの内側に配置された空気圧チャンバーから成る（図 12(a)）。円形のシェルは硬い材料で、チャンバーは弾性材料で作られている。チャンバーの一面はシェルに固定されている。環状シェルグリッパーに空気圧を印加すると、チャンバーが膨張する（図 12(b)）。したがって、空気圧を印加しチャンバーを膨らませることにより、環状シェルグリッパーの内側にある対象物を把持することができる。

図 13 に環状シェルグリッパーのプロトタイプを示す。空気圧チャンバーは鋳造で製作した。三次元プリンタで製作した型でエラストマー材料を成形する。空気圧チャンバー

図 12 環状シェルグリッパーの原理

図 13 環状シェルグリッパーのプロトタイプ

の材料として、Smooth-On 社製 Dragon Skin を用いた。シェルの内径は 70 [mm] であり、円周に沿って空気圧チャンバーが 4 個配置されている。

ロボットマニピュレーションの先端に環状シェルグリッパーを装着し、大福餅のハンドリングを実現した結果を図 14 に示す。大福餅の重量は 103 [g] であった。試作した環状シェルグリッパーは大福餅を持ち上げることができる（図 14(a)~(c)）。グリッパーを上向きにしても、大福餅は把持されたままである（図 14(d)~(f)）。空気圧を抜くと、大福餅をテーブル上に置くことができる（図 14(g) (h)）。図に示すように、置かれた大福餅に形状変形はほとんど生じていない。これは、大福餅の周囲に配置されたチャンバーが、広い面積で対象物に接触しているためである。

5. バインディングハンド

バインディングとは、対象物の周囲を弾性糸で囲み、その糸を絞ることにより対象物を把持する手法である [7]。図 15 にバインディングハンドのプロトタイプを示す。これは、4 本の開閉する指、指に沿って張られた弾性糸、2 個のモータから成る。一つのモータが 4 本の指の開閉を担い、他方のモータは糸の繰り出しと引っ張りを担う。弾性糸として、感圧導電糸を用いた。感圧導電糸の抵抗を計測することにより、糸の伸縮を推定することができる。

図 16 はゼリービーンズ入りのカップの摘み上げを示す。ハンドはロボットアームの先端に取り付けられており、上

図 15 バインディングハンドのプロトタイプ

図 14 環状シェルグリッパーによる大福餅のハンドリング

図 16 バインディングハンドによる食材入りカップの摘み上げ

図 17 バインディング過程における対象物のセンタリング

下に移動することができる。まず、感圧導電糸で張られた領域内に対象物が入るように、ハンドを下に移動する (図 16 (a))。次に、4 本の指を閉じ、糸を対象物に接触させる (図 16 (b))。感圧導電糸の抵抗を計測し、計測値をフィードバックすることで、糸の繰り出しを制御する。糸に十分な力が作用した時点で、指の開閉を止める (図 16 (c))。最後に、ハンドを上を移動させることで、対象物を摘み上げる (図 16 (d))。

図 17 はカップのセンタリングを示す。感圧導電糸で囲まれた領域内に入った対象物は、指を閉じて糸を巻き取る過程で、自動的に領域の中央に位置決めされる。すなわち、対象物が領域内にある限り、対象物の位置決め誤差が許される。このセンタリングにおいて、センサは不要である。

感圧導電糸の抵抗を計測し、糸の繰り出しを制御する方法は、幅広い大きさの対象物を把持することができる。一方、把持に必要な時間が長く、作業の効率に課題が残る。そこで、フィードバック制御を用いない手法を考案した。把持対象物の大きさが限定されると仮定し、指と糸を一つのモータで駆動させる。すなわち、指の開閉を担うモータに、糸を巻き取るためのプーリを取り付ける。指の開閉と糸の巻き取りを連動させると、大きさが限定された対象物に作用する力は、ある範囲に収まる。プーリの直径により、糸の張力を調整することができ、結果として対象物に作用する力を限定することができる。図 18 に、指・糸連動バインディングハンドのプロトタイプを示す。図 19 に示すように、このプロトタイプは、フィードバックなしでゼリービーンズ入りのカップを摘み上げることができた。

6. ソフトフィンガーの曲げ変形のセンシング

プリンタブルソフトグリッパーにより食品を把持すると

図 18 指・糸連動バインディングハンド

図 19 指・糸連動バインディングハンドによる把持

き、把持が失敗することがある。したがって、把持の成否を判定することが望まれる。グリッパーの指の曲げ変形を計測し、その計測値から把持の成否を判定することを試みた [8]。三次元プリンタで製作する指に、フィルム状の曲げセンサを埋め込む。まず、センサを埋め込む層まで指を成形し (図 20 (a))、三次元プリンタを一時停止する。成形した部分の上にセンサを置き (図 20 (b))、三次元プリンタの動作を再開する。センサを覆うように、指の残りの部分を成形し、最終的にセンサが埋め込まれた指が成形される (図 20 (c))。

図 20 曲げセンサの埋め込み

図 21 曲げセンサの出力

センサが埋め込まれた指を 3 本成形し、3 本の指から成るグripperを試作した。グripperで 50 [g] のピーナッツが入っている紙カップを把持する。グripperに 20 [kPa], 30 [kPa], 40 [kPa] の空気圧を印加し、把持したときのセンサ出力を図 21 に示す。印加圧力が 20 [kPa], 30 [kPa] のとき、対象物は滑り落ち、把持は失敗した。印加圧力が 40 [kPa] のとき、滑りは生じず、把持は成功した。図に示すように、滑りが生じたときには、センサ出力の急激な変化が生じている。一方、把持が成功したときには、センサ出力が緩やかに変化する。このような信号変化から、滑りが生じたか否かを判定できると考えられる。

7. 結 言

本解説では、食品ハンドリング用のソフトロボットハン

ドとして、プリンタブルソフトグripper、プレストレッチ指グripper、環状シェルグripper、バインディングハンドを紹介した。これらのロボットハンドでは、食品と接触する物理的インタフェース部分に柔らかい材料を用いることにより、形状や特性のばらつきを吸収することを狙っている。柔らかい材料を積極的に用いて新しい機能を発現するロボットに関する研究は、ソフトロボティクスと総称される。このようなソフトロボティクスの方法論を自動化に適用する試みを、ソフトロボティックオートメーションと呼ぶ。本解説における食品ハンドリングの試みは、ソフトロボティックオートメーションの一環とみなすことができる。今後、材料や製造法を検討し、ソフトロボットハンドの実用化を図る。また、食品の力学モデリングとともに、ソフトロボットハンドによる食品ハンドリングの力学解析を進めたい。

参 考 文 献

- [1] A.D. Marchese, R.K. Katzschmann and D. Rus: "A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots," *Soft Robotics*, vol.2, no.1, pp.7–25, 2015.
- [2] G. Fantoni, M. Santochi, G. Dini, K. Tracht, B. Scholz-Reiter, J. Fleischer, T.K. Lien, G. Seliger, G. Reinhart, J. Franke, H.N. Hansen and A. Verl: "Grasping devices and methods in automated production processes," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol.63, issue 2, pp.679–701, 2014.
- [3] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano and H. Shea: "Soft Robotic Grippers," *Advanced Materials* vol.30, issue 29, 2018.
- [4] Z. Wang, D.S. Chathuranga and S. Hirai: "3D Printed Soft Gripper for Automatic Lunch Box Packing," *IEEE Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2016)*, pp.503–508, 2016.
- [5] Z. Wang, M. Zhu, S. Kawamura and S. Hirai: "Fabrication and Performance Comparison of Different Soft Pneumatic Actuators for Lunch Box Packaging," *IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (IEEE RCAR 2017)*, pp.22–27, 2017.
- [6] Z. Wang, Y. Torigoe and S. Hirai: "A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.2, issue 4, pp.1909–1916, 2017.
- [7] H. Iwamasa and S. Hirai: "Binding of Food Materials with a Tension-Sensitive Elastic Thread," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.4298–4303, 2015.
- [8] Z. Wang and S. Hirai: "A 3D Printed Soft Gripper Integrated with Curvature Sensor for Studying Soft Grasping," *2016 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII 2016)*, pp.629–633, 2016.

平井慎一 (Shinichi Hirai)

1990 年 3 月京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士課程単位取得退学。工学博士。2002 年 4 月より立命館大学理工学部ロボティクス学科教授。ソフトロボティクスに関する研究に従事。2017 年、2018 年 国際食品工業展アカデミックプラザ賞 グランプリ。2019 年 IEEE RoboSoft Program Co-Chair。日本機械学会、看護理工学会、IEEE の会員。(日本ロボット学会正会員)

王 忠奎 (Zhongkui Wang)

2011 年 3 月立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2014 年 4 月より立命館大学理工学部ロボティクス学科助教。ソフトロボティクスと生体医工学に関する研究に従事。IEEE RCAR 2018 Best Paper Award on Robotics 受賞。日本生体医工学会、看護理工学会、IEEE の会員。(日本ロボット学会正会員)