

Binding に基づく柔軟紐ハンドによる把持操作

Object grasped by hand with the soft string based on binding

○岩政 恒史 (立命館大学) 平井 慎一 (立命館大学)

Hisashi IWAMASA, Ritsumeikan University

Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

This article focuses on grasping of an object by a robotic hand based on binding. This hand uses a soft string for grasping an object. This string encloses around an object in grasping and binding. This helps us to cope with errors of object geometry and location. Soft string can sense pressure has the ability sensing pressure.

Key Words: Robot Hand, Tactile Controlled, Binding

1. 緒言

近年、ビジョンセンサ、双腕ロボットなどの普及に伴い、多品種少量生産に関して、セル生産方式の自動化が試みられている。しかし、未だに製造の現場でも人手による作業を必要とされる工程や場面は少なくない。その原因としては、扱う把持物体の変形やばらつきが問題となる場合が多い。多品種少量生産の製品の中でも、食品分野は特に扱う対象のばらつきが激しい。扱う物体の中にはさまざまな柔軟物体が含まれており、同じ種類のものの中でも形状、内容量などが異なる。このような理由から、従来のロボットハンドによるハンドリング技術では、ばらつきの大きい把持物体に対応が困難であることが食品分野の製造を自動化する障害の一つとなっている。このため、把持物体のばらつきや制御誤差を許容可能とするロボットハンドによるハンドリング技術は、今後需要が増えることが予想される。

以上より、本研究では食品をはじめとしたレオロジー物体を把持する物体の把持を簡易化させる把持形態や構造を模索する。また、その理論に基づいたハンドを実際に製作し、把持性能について検証、評価を行う。

2. Binding(バイディング)

本稿におけるバイディング (Binding) とは、本研究目的のために提案する、ハンドリングにおける物体の把持方法である。この物体の把持方法は把持物体を必要以上に変形させないこと、また、確実性の高い把持操作を実現することを目的としている。

ここで注目したのは物体の拘束方法であるフォースクロージャ (Force closure) とケーシング (Caging) である。

フォースクロージャは、Fig. 1 に示すように、指と把持物体の間に滑りが発生しない状態において、ハンドリング物体に作用する任意の外力に対して力とモーメントの平衡式が成り立つような状態を満たすように物体を拘束する方法である [1]。物体操作に外力と接触面での摩擦力が発生することが前提となるため、把持可能性について考慮し、指の配置や把持力が、物体にどのように影響するのかについて分析が必要である。ハンドリングを行ううえで指と把持物体の間に相対運動が発生しないので、高速かつ精密なハンドリング作業を行ううえで有効な手法である。しかしながら、把持力の大きさと位置合わせの精度が把持の大きな要因となり、作業に要求される機械精度や位置情報の精度はその分高い。また、把持物体を破損させずに把持するためには力制御が必要である。

ケーシングとは、Fig. 2 に示すように、これは把持物体がロボットによって構成される閉鎖領域から脱出できないようにする幾何学的な物体の拘束手法であり、必ずしも扱う物体の自由度を完全に奪わない [2]。この手法は、位置制御ロボットによる物体拘束のため、力制御が不要であるということが

特徴である。フォースクロージャと異なり、ケーシングは必ずしも把持物体と接触している必要がない。そのため、拘束のマージンを取ることで位置制御誤差、モデル化誤差などある程度許容できる。したがって、環境情報や機械的な部分で誤差が発生する割合が大きい場合にピック&プレースなどの単純作業では非常に有効な手法である。しかし、その代償として把持した後の物体の姿勢や位置は厳密に制約されないために、プレースの際の位置決めて精度を上げることは困難である。また、ハンドリングの際にケーシング条件内で把持物体が動くことによって把持物体にダメージを与える恐れがあるという欠点が存在する。

以上の二つの物体の把持方法に着目し、本研究目的に適する物体の拘束方法として提案するのがバイディングを用いた物体の拘束方法である。バイディングについてのモデルを Fig. 3 に示す。バイディングは把持物体を連続した弾性体の拘束物体を用いて、ある空間平面で縛り付ける拘束手法であり、物体を拘束するまでの過程において、物体の二次元空間におけるケーシングと、物体の二次元空間におけるフォースクロージャの双方を完了する。この把持方法は把持の過程でケーシングを行うことで、把持物体を安定した把持位置まである程度収束させる役割を果たすことが予想できる。また、最終的にハンドからの把持力を加えることによって、把持時の把持物体の姿勢をある程度制約することができ、ケーシングのみのハンドリング方法に比べて把持物体のプレースの際の姿勢や位置の精度を上げることができると予想される。

連続物体を用いた締め付けによって物体を拘束するため、物体と接触する面積が大きい把持となることが予想される。そのため、把持物体にかかる把持力を分散させることができ、把持物体の必要以上の変形を抑える効果が期待できる。

上記二つの物体の拘束方法の特徴を踏まえたうえで、把持方法においてバイディングの位置付けについての関係を Fig. 4 に示す。フォースクロージャは作業精度の高さの点で優れており、ケーシングは作業精度の許容誤差範囲の広さで優れているという利点をそれぞれ持っている。今回提案するバイディングでは、それぞれの利点を持ち合わせた手法となることが予想される。

3. 実機システム

本研究で製作したハンドについて説明する。製作した実機ハンドの外観を Fig. 5 に示す。実機の最大時の大きさは縦 150mm、横 150mm、高さ 180mm であり、重量は 305g である。把持可能範囲は最小で 45 × 45 mm、最大で 135 × 135 mm である。ハンドは、剛体物から成る 4 指の間に把持物体をバイディングするための弾性体から成る紐状の把持部分 (以降、バイディング材と記す) で構成されている。ハンドは 4 指の開閉とバイディング材の巻取り部分にそれぞれ 1

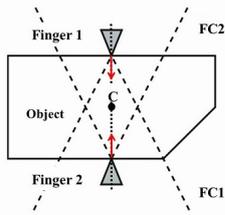


Fig. 1 Force closure

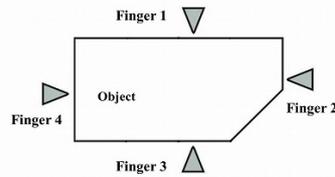


Fig. 2 Caging

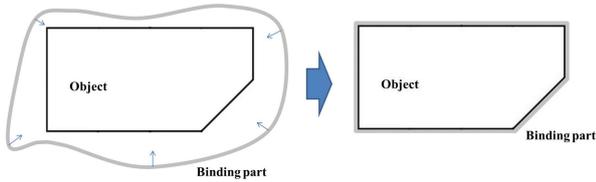


Fig. 3 Binding

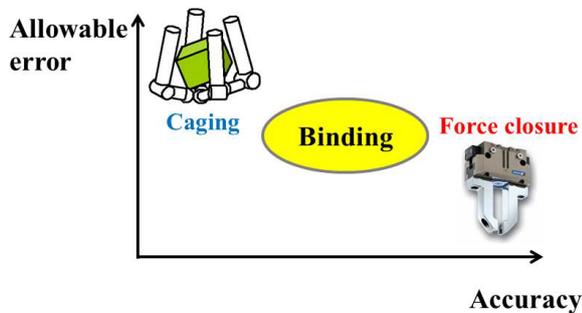


Fig. 4 Accuracy and allowable error in grasping concepts

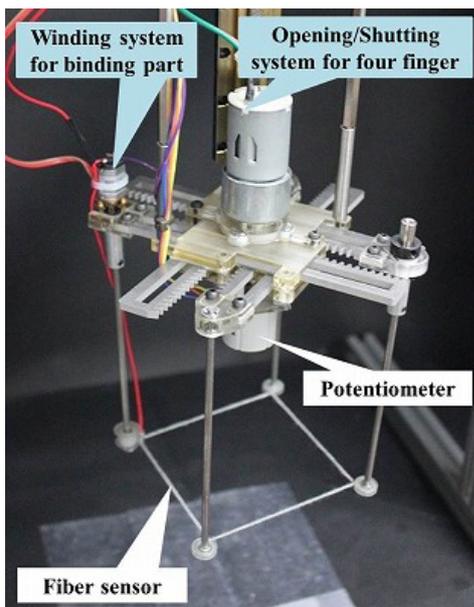


Fig. 5 Hand appearance

自由度を持つ。また、4指の開閉によって把持物体の外形の大きさに合わせてバイディング材を接触させ、把持時には巻取り部分を回転させることでバイディング材を締めたり緩めたりすることが可能である。バイディング材の巻取り部分の回転を制御することにより、把持物体にかかる把持力の調節が可能であると予想される。

4. ファイバーセンサの利用

本研究では、把持物体にかかる力をファイバーセンサを用いて計測する。本システムで用いるファイバーセンサは、感圧導電性カブリング糸を用いている。感圧導電性カブリング糸は、感圧導電性糸をダブルカブリングしたものである。感圧導電性糸とは、非導電繊維であるポリエステルに導電性を持つステンレスの繊維を混紡して撚り合わせたものである。Fig. 6に示すように、この感圧導電性糸は、糸にかかる張力や圧力が大きくなると、糸中のステンレスの繊維どうしの接触点数が増加することによってセンサ自体の電気抵抗が変化する。この原理については、一定の区間内であれば伸びと抵抗値の間に線形近似可能な関係が存在することが分かっている [3]。また、ダブルカブリングとは、Fig. 7に示すように、中心に配されたポリウレタン製の弾性糸の周囲に感圧導電性糸が2重に巻かれた構造である。この構造は感圧導電性糸の抵抗値変化の特性を安定させるために取り入れた構造となっており、ヒステリシスの軽減に有効であることが分かっている [3]。また、弾性と伸縮性に優れるという特性を持つため、大きな変形に対応できることが予想される。このセンサの大きな特徴としては、軽量、柔軟で、センサ自体が複雑な構造を持たずにセンシングが可能である点である。このセンサは、複数の糸を用いることによりロバスト性、精度の向上が見込めることが分かっている [3]。本ハンドはアクチュエータの回転によって変化する、把持物体を拘束するバイディング材の締め付け量を制御することで把持力を調節するために、バイディング材にかかる張力を取得する必要がある。本稿では、ファイバーセンサに張力が加かるとセンサ自体の抵抗値が少なくなる特性を利用し、取得したセンサの抵抗値をアクチュエータによってセンサを引っ張る大きさとして反映させ、バイディング材の張力を制御することで把持力を制御する。このセンサの抵抗値の大きさを与えられた目標値に収束させることで、センサにかかる張力の大きさを一定に保ち、任意の把持力に反映させることを試みる。

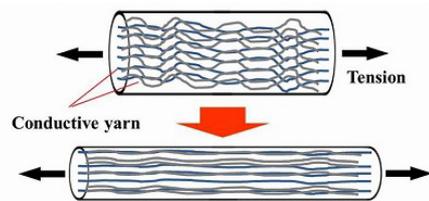


Fig. 6 Operating principle of electro conductive yarn

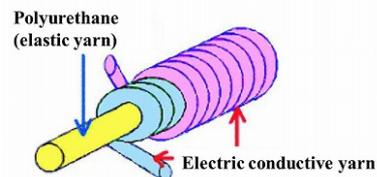


Fig. 7 Structure of covering electro conductive yarn

柔軟部が把持物体に接触した時に把持物体に及ぼす力を測

定する方法として、アクチュエータによって巻取り用のプールの回転数を測定することで締め付け量を推定する方法と、本ハンドで用いているファイバースensaがセンサにかかる張力によって発生する抵抗値の変化を測定することで把持力を算出する方法を検討した。前者はバイディング材とプール部分での滑りや、ハンド本体の変形などによって発生した誤差に対処できない。一方、後者は直接把持物体と接触するため、把持力からセンサまでの情報の伝達ロスが少なく、誤差を少なく抑えることができるのではないかと考えた。また、本ハンドはセンサ部分をそのまま把持部分となるバイディング材として使用しているため、部品点数などを抑えることができる。これにより前者よりも機械的構造が単純にすることが可能であり、センサ自体が軽量であるため全体の重量も削減することが可能である。さらに、ファイバースensa自体がダブルカバリング構造になっているので、バイディング材として用いるための十分な弾性体としての役割も持ち合わせていると考えた。

5. バイディング材の張力制御

本章ではファイバースensaの抵抗値を任意の数値に収束させることで、ハンドに任意の把持力を出力することを目的とする。各指部分でのプール部分やギアによるモータの減速部分で生じる摩擦を考慮し、制御則にはPID制御を用いる。以下にその制御則を示す。

$$V_m = K_p(R_d - R_x) + K_d\dot{R}_x + K_i \int (R_d - R_x) dt. \quad (1)$$

式(6.1)において、 V_m はファイバースensaの巻取りを行うDCモータを駆動させるモータドライバICのPWM出力を決定するピンに出力する電圧であり、 R_d はファイバースensaの目標抵抗値、 R_x は5章のFig 5.1で示した計測回路によって取得したファイバースensaの現在の抵抗値である。比例ゲイン、微分ゲイン、積分ゲインをそれぞれ K_p , K_d , K_i と表す。

5.1 検証実験

6.1節で示した制御則を用いてハンドの制御を行い、実際に目標値に収束することの妥当性、および収束性能を検証する。ハンドの4指の開閉量を固定した状態で、5 secごとに目標抵抗値を50Ωずつ変化させ、その間の抵抗値のステップ応答の収束の様子を計測する。ハンドの開閉量は把持範囲でとなる四辺の一边を45 mmになるように設定する。

5.2 実験結果

実験結果をFig. 8に示す。制御値を R_x 、目標抵抗値を R_d とする。

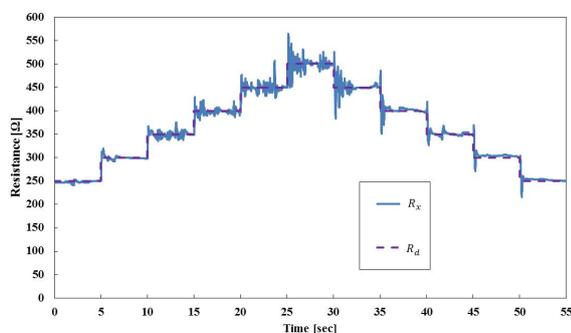


Fig. 8 Step response of resistance

5.3 考察

ステップ応答は各目標値に収束している。ただし、各目標値におけるステップ応答に制御値のオーバーシュートがみられる。このため、制御則における各ゲインの再調整が必要であると考えられる。

また、ステップごとの収束の様子を見ると、目標抵抗値が大きくなるほど収束値が不安定になっている。これは、抵抗値が大ききときにはファイバースensaにかかる張力が少なくなるため、ファイバースensa内の導電繊維同士の接触状態が一定でなく不安定な状態になることが原因であると考えられる。

目標抵抗値を下げていく段階において、目標抵抗値が更新された瞬間に、実験を行った場合においても一度抵抗値が増加している。このことから、ファイバースensaに対して緩んだ状態から引き延ばすという動作を行った場合に、瞬間的に抵抗値が増加する性質があるということが考えられる。

6. バイディング材が把持物体に及ぼす力とバイディング材の張力の関係

把持時にバイディング材にかかる張力および圧力と、把持物体にかかる力の関係性を検証する。

6.1 計測方法

圧力センサを取り付けた立方体形状の把持物体に対して、ハンドの4指の開閉量を一定にしたまま把持を行い、バイディング材の締め付け量を変化させる。そのときに圧力センサにかかる力を静的に測定する。把持力を計測するための把持物体の外観をFig. 9に、把持時の様子をFig. 10に示す。開閉量は把持範囲でとなる四辺の一边を55 mmになるように設定し、ファイバースensaの抵抗値は200Ω~650Ωの範囲で、50Ω毎に計測を行った。

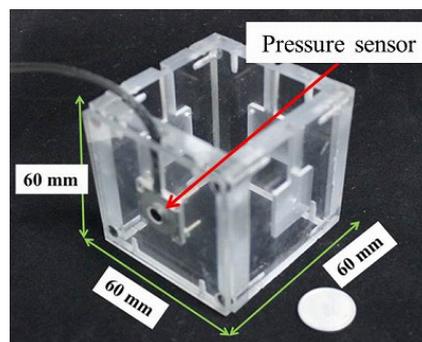


Fig. 9 Cube for measuring pressure

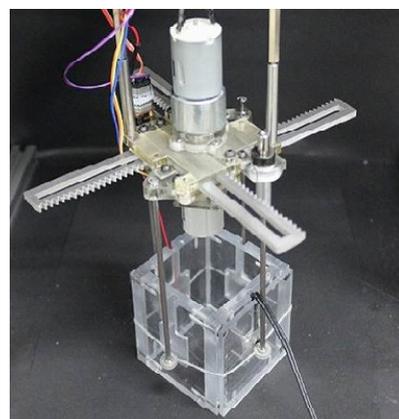


Fig. 10 Grasping cube

6.2 計測結果

実験結果を以下の Fig. 11 に示す。

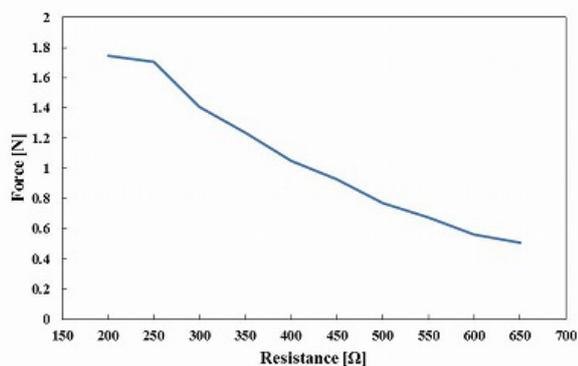


Fig. 11 Force vs. electrical resistivity

6.3 考察

バイディング材となっているにファイバーセンサの締め付けによって抵抗値が増加するとともに把持物体に加わる把持力も増加していることが分かる。50 Ω増加するごとに把持力は0.1~0.3 Nの範囲で増加している。200 Ω以降はファイバーセンサの目標抵抗値を増加させても目標の値に下がらなくなったために計測が不能となった。これはモータのトルクが不足しているためであると考えられる。現段階以上の把持力を出す必要がある場合には、ファイバーセンサの引っ張り強度などを考慮しながらアクチュエータの再選定が必要である。

7. バイディングによる把持位置の許容誤差検証

バイディングに基づく把持方法によって把持物体の把持位置の誤差を許容できるかどうか検証を行う。

7.1 実験方法

ケーシング条件を満足するように把持位置の中心となる場所以外に把持物体を設置し、把持可能であるかどうかを検証する。ここでは4指の開閉量を一辺135 mmの状態から徐々に4指の間隔を狭めていき、45 mmまで狭めたときに手動リニアステージによって把持物体を持ち上げられるかどうか確認する。

7.2 実験結果

どの把持位置においても把持位置の中心まで把持物体を最終的に手動リニアステージによって持ち上げることができた。動作の様子を Fig. 12 に示す。

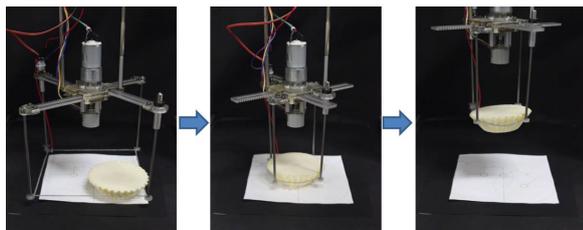


Fig. 12 Appearance of grasping

7.3 考察

バイディング材が把持物体を安定して把持できる位置まで誘導して、把持位置を収束させる役割を果たしているといえる。

8. 結言

本報告では、把持物体の変形を抑えるために、ハンドの把持部分に伸縮性のある柔軟物を使用することによってハンドの把持部分を対象物の形状に合わせて変形させ、接触面積を増加させることによって対象物との接触部にかかる圧力を分散させる構造を提案した。また、把持位置のずれや把持物体の形状の違いを許容するために、把持の過程でフォースクロージャ、およびケーシングの双方の利点を生かすような物体の拘束方法であるバイディングを提案し、それを実現させる機構を提案した。提案したハンドの構造、把持方法に基づいた4指2自由度ハンドを製作し、把持実験を行った結果、バイディングに基づく把持方法が把持位置の誤差の許容について有効であることを示した。

今後の課題として、手先に取り付けるセンサから正確な把持力を導出するためのセンサの校正を行う。また、把持物体についての変形量の測定を行い、ハンドによる把持が把持物体に及ぼす変形についての検証を行う。実機の軽量化や構造の簡略化を試みる。

文献

- [1] 平井慎一, 若松栄史: “ハンドリング工学,” コロナ社, 2005.
- [2] 横田諭: “不完全な把持によるマニピュレーション,” 横浜国立大学博士論文, 2010.
- [3] 小田俊輔: “感圧導電糸の生体計測への応用,” 立命館大学修士論文, 2009.