

接触駆動式高速受動把持ハンドの開発

井川 久、川島 圭太、西村 斉寛*、渡辺 哲陽*

Development of a Contact-Driven High-Speed Passive Gripper

Hisashi IGAWA, Keita KAWASHIMA, Toshihiro NISHIMURA*, Tetsuyou WATANABE*

抄 録

近年、農業分野を含む屋外作業では人手不足が深刻化しており、省力化・自動化の導入が喫緊の課題となっている。一方で、アクチュエータ駆動型ロボットハンドは屋外環境の塵埃や風雨、泥汚れの影響を受けやすく、故障リスクの増大や保守・メンテナンス負担の増加が課題である。さらに、農作物の形状や大きさは品種や成長段階によって大きく異なるため、多様な対象物に柔軟に対応できる把持機構が求められている。

本研究では、アクチュエータを用いず、接触をトリガーとしてベルトに張力を生じさせ、指が受動的に閉じる高速受動把持ハンドを開発した。開発したハンドは、ベルト張力を機械構造に変換して指を閉じ、内部のラチェット機構により把持状態を保持する。さらに、指関節数の増加と指間距離可変機構の導入によって、床置き対象物への対応および多品種への適応を実現した。試作した第二世代プロトタイプによる性能評価では、従来の電動ハンドと比較して、高速性および汎用性の向上を確認した。

キーワード：受動把持、屋外作業ロボット、接触駆動、農業自動化、指間可変機構

Abstract

In recent years, labor shortages have become a critical issue in outdoor work environments, including agriculture, increasing the demand for labor-saving and automation technologies. However, outdoor environments are often affected by dust, rain, and mud, making actuator-driven robotic grippers prone to failure and requiring frequent maintenance. Furthermore, agricultural products vary significantly in size and shape depending on their type and growth stage, requiring versatile and adaptive gripping mechanisms.

In this study, we developed a high-speed passive gripper that operates without actuators, using a contact-driven mechanism. The proposed gripper initiates the grasping motion through belt tension generated by contact with the object and maintains the grasping posture using a ratchet mechanism. Additionally, we introduced a two joints finger structure and a variable finger span mechanism to improve adaptability to different product sizes and to enable gripping from floor surfaces. Performance evaluations of the second-generation prototype demonstrated improved gripping speed and versatility compared to conventional electric grippers.

KEY-WORDS : Passive grasping, Outdoor robotics, Contact-driven mechanism, Agricultural automation, Variable finger span

*金沢大学、*Kanazawa University

事業名：奨励研究

課題名：モーターレス型高速把持ハンドの開発（ファーストステージ）

指間距離を可変とするモーターレス型高速把持ハンドの開発（セカンドステージ）

1. はじめに

近年、国内製造業では人手不足が深刻化しており、各種工程の自動化・省力化が喫緊の課題となっている¹⁾。特に北海道では、製造業のみならず一次産業においても人手不足が深刻化しており、とりわけ農業分野においては、野菜などの収穫作業における労働力不足が顕在化しており、その省力化・自動化のニーズが急速に高まっている。このような背景には、労働人口の減少や高齢化といった構造的要因が存在し、農業の担い手不足は地域経済全体の持続可能性にも影響を与える深刻な社会課題である²⁾。加えて、近年はスマート農業の推進など政策的後押しも強まっており、生産現場へのロボット技術の導入は不可避の流れとなっている。

屋外作業の自動化を実現する上で特に課題となるのは、塵埃・雨風・泥汚れ・寒暖差などの過酷な環境条件である。このような環境下ではロボット全体の故障リスクが高まるが、特にハンドは対象物との接触頻度が高く、外力や汚れの影響を受けやすいため、モータなどのアクティブアクチュエータを使用しない構造が望ましい³⁾。実際に、アクチュエータ駆動型のハンドは防塵・防水構造のために高コスト化しやすく、頻繁なメンテナンスも必要となる。一方で、アクチュエータ不要の受動的な機構を用いたハンドは構造がシンプルであり、可動部の少なから故障リスクが低減し、屋外でも安定した運用が期待できる。

さらに、生産性の向上の観点からは「高速把持」による作業効率化が重要である。特に農業現場では、把持完了までの時間が長いと全体の作業効率が低下し、コストの増大に繋がるため、これは一般的な産業現場にも共通するが、農業現場においては特に顕著である。従来のアクチュエータ駆動型ハンドでは、把持動作に数秒を要する場合も多く、十分な作業速度を達成できないことが課題となっていた⁴⁾。また、農作物は品種や成長段階により大きさが異なるため、固定された指間距離では対応できないケースも多く、把持対象に応じて指間距離を調整可能な機構が求められる。加えて、農業の収穫現場では地面に置かれた作物を直接把持する場合も多く、指先が対象物の下に自然に潜り込める構造でなければ実用には至らない。

ロボットハンドの研究分野では、制御性に優れたアクチュエータ駆動型ハンドの開発が進められてきた一方、前述した環境耐性や高速性、多品種対応の課題が残されている。受動的な把持機構に関しても研究例は存在するが、多くは特定の用途・対象物に限定されるものが多く、汎用性に課題がある。西村ら⁵⁾が提案したロボットハンド機構は、対象物との接触力を利用して受動的に把持動作を行うという新しいアプローチを提案しており、シンプルかつ高速な把持動作の可能性を示唆している。

本研究では、西村らが提案した受動把持機構を基礎として、

屋外作業および農作物への応用を目的とした接触駆動式高速受動把持ハンドを開発した。本ハンドは、対象物との接触によって指先のベルトに張力を生じさせ、その張力を指関節の駆動力として把持動作を実現する、受動的かつシンプルな構造を採用している。本研究における設計要件および構造上の特徴については、2.1節で詳述する。

2. 設計要件と基本概念

2.1 設計要件の定義

本研究の設計要件は以下の三点である。

第一に、屋外作業の厳しい環境条件に対応するため、モータ等のアクチュエータを用いない受動的な設計とする。塵埃や雨風、泥汚れ、寒暖差などの過酷な環境ではアクチュエータ系の故障リスクが高く、頻繁なメンテナンスを要する。一方、機械的なリンク機構と弾性要素のみで構成される受動システムは、耐環境性と信頼性の両面で優位性を持つ。

第二に、対象物との接触を契機として受動的に閉動作を開始し、迅速に把持を完了できることとする。従来のアクチュエータ駆動型ハンドでは把持に数秒を要する場合が多いが、本研究の方式では接触と同時に動作が始まり、作業サイクルタイムの短縮が可能となる。

第三に、多様な大きさや形状の農作物に対応できる汎用性を有することとする。単一品目専用設計では実用性が低く、作物ごとにハンド交換が必要となる。そこで、対象物の形状に柔軟に追従し、さらに指間距離の可変機構を備えることで、一台のハンドで複数種類の農作物を把持可能とした。

2.2 接触駆動受動把持の基本原則

本研究では、アクチュエータを用いず、対象物との接触によって生じる外力（押圧力）を関節の回転運動に変換して把持を行う「接触駆動式受動把持」の原理を構想した。この方式では、対象物との接触をトリガーとしてベルトに張力を発生させ、その張力を機械的に指関節の回転トルクへと変換することで、受動的な把持動作を実現する。

図1に示す概念図のように、2指間に張られたベルトが対象物に接触すると、ベルト張力が発生し、この張力が指先のプーリーおよび関節部の補助リンクを介して指関節を回転させる。この回転により、指が閉じる方向へ動き、対象物を包み込むように把持する。

本原理の利点は、動作に電力を要せず、構造が簡素で信頼性が高い点にある。また、ベルトが受動的に張力を調整するため、対象物の形状や剛性に応じた適応的な把持が自然に成立し、剛体・弾性体を問わず幅広い対象への適用が期待できる。

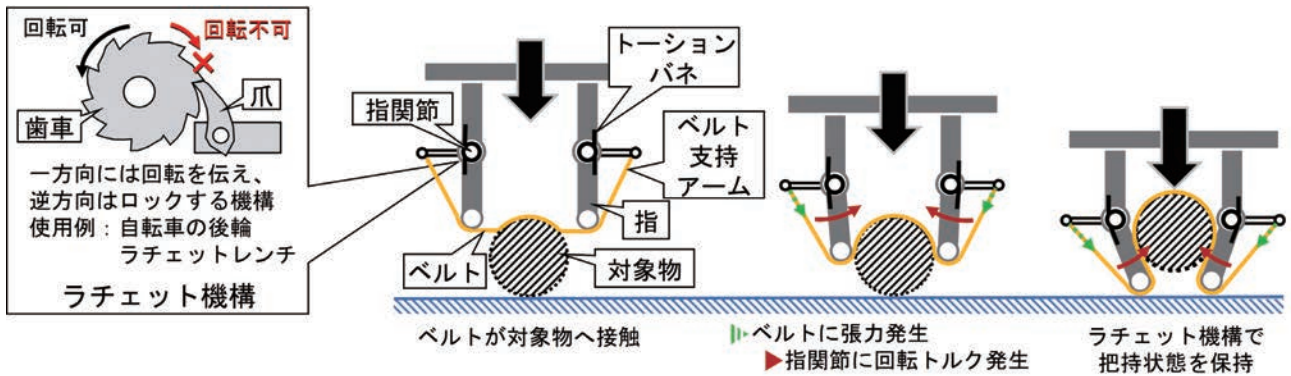


図1 接触駆動式受動把持ハンドの動作原理

2.3 ラチェット機構による把持後の姿勢保持の構想

把持後の姿勢を安定的に保持するため、本研究ではラチェット機構の導入を構想した。

ラチェット機構は一方方向の回転のみを許容し、逆回転を防止する機械要素であり、把持動作完了後に指の位置を機械的に保持することで姿勢を安定化できる。

図2に示す概念図のように、把持状態ではラチェットの爪が歯車に噛み合い、指関節の逆回転を抑制する。把持を解除する際には、リリースピンによって爪の拘束を解除し、トーシヨンバネの復元力により指が開放状態へ戻る構造を想定している。このような受動的な姿勢保持機構を導入することで、把持後に外部から動力を供給する必要がなく、省エネルギー性と安定性の両立が可能になると考えた。

本原理にもとづく具体的な機構設計および試作結果については、3章にて述べる。

3. 第一世代プロトタイプの開発

3.1 基本機構の設計

前章で述べた接触駆動およびラチェットによる姿勢保持の構想をもとに、これらの原理を実際に具現化するための基本機構を設計した。具体的には、ベルト張力を利用した左右対称二本指の受動把持機構を設計し（図3）、各指の関節付近に配置したベルト支持アームにより、対象物との接触時に発生する張力を回転トルクへ変換する構造とした。さらに、歯

車・プーリー・タイミングベルトからなる同期機構を導入することで、左右の指が均等に閉じ、安定した把持姿勢を実現した。

指部には、対象物を傷つけず確実に把持することを目的として、弾性と摩擦特性に優れたシリコンベルトを採用した。特に農作物など傷つきやすい対象物への適用を考慮し、接触面の柔軟性を確保している。

また、指関節部には2章で構想したラチェット機構を実装した。指は閉方向のみに回転し、外力に対して把持状態を安定して保持できる。把持解除時にはリリースピンで爪を解除し、トーシヨンバネの復元力により初期位置へ戻る構造とした。このように、受動的な動作による高信頼な姿勢保持を実現している。

3.2 試作と基本性能評価

以上の設計内容にもとづき、3Dプリンタ（PLA樹脂）を用いて第一世代プロトタイプを製作した。図4に評価試験環境と対象物の把持状況を示す。ベルト部には前述のシリコンベルトを用い、屋外使用を想定した安定した把持が可能な構成とした。

性能評価試験では、協働ロボットUR5eを用いてキュウリ、ニンジン、ナスの3種類の農作物を対象に把持試験を実施した。対象物に接触して把持した後、所定位置まで搬送する一連の作業時間を、市販の電動ハンド（2F Adaptive

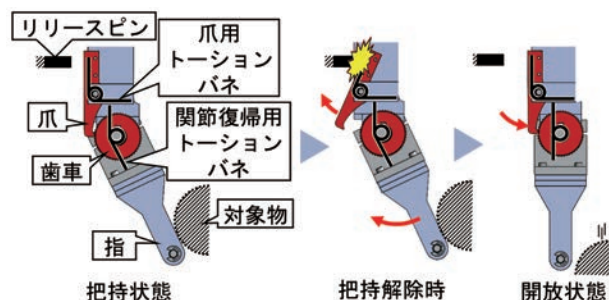


図2 ラチェット機構による関節角度保持と開放の動作原理

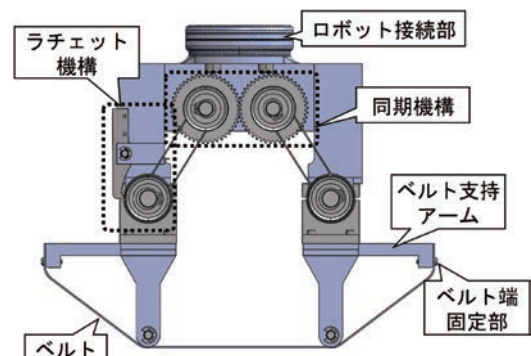


図3 第一世代プロトタイプの基本機構図

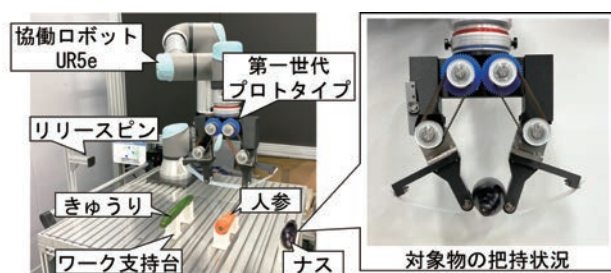


図4 第一世代プロトタイプの評価試験環境
対象物の把持状況

Gripper・ROBOTIQ社製）と比較した。その結果、第一世代プロトタイプでは総作業時間が20.2秒、市販ハンドでは24.6秒となり、約18%の作業時間短縮が確認された。すべての対象物で把持が成功し、把持後の保持状態も安定していた。

なお、本ハンドは床置き状態での把持が困難であったため、本試験では対象物をワーク支持台上に設置して評価を行った。この課題は、3.3節で述べる改良対象の一つとして抽出された。

3.3 課題の抽出

第一世代により、基本的な把持性能および把持速度の向上を確認した一方で、以下の課題が明らかとなった。

第一に、床置き状態の対象物に対する把持が困難であった。床面に置かれた対象物の下に指先が潜り込めなかったこ

とから、単関節構成であることおよび指先形状が太いことが主な要因と考えられる。このため、収穫作業などの実環境では把持不能となるケースが想定された。

第二に、対象物の大きさに応じた柔軟な把持が難しかった。指間距離を固定構造としていたことが原因と考えられる。第一世代では指間距離を約80mmに固定していたため、サイズばらつきのある農作物への対応力が限定的であった。

以上の課題を踏まえ、第二世代プロトタイプの開発を行った。

4. 第二世代プロトタイプの開発

4.1 第二世代プロトタイプの開発方針

第一世代プロトタイプでは、「床置き対象物への対応困難」と「固定指間距離による汎用性の制限」という2つの課題が明らかとなった。これらの課題を解決するため、第二世代プロトタイプでは次の2点を改良方針として設定した。

- ・床置き対象物への対応：関節数増加・指先形状の見直し
- ・汎用性の向上：指間距離可変機構の導入

4.2 関節数増加による床置き対応

床置き状態の対象物を把持可能とするため、指構造および関節機構を改良した（図5）。

第一に、指先を薄型化し、床面との隙間が小さい対象物に対しても指先が下部へ自然に滑り込めるようにした。第二に、関節数を単関節から二関節構成へと増加させ、より柔軟な指先の動きを実現した。さらに、第一関節と第二関節が受動的に連動して動作する受動連動機構を新たに設計した（図6）。本機構では、第二関節軸に固定ギアを配置し、これに噛み合う可動ギアを第二リンク上に配置している。対象物との接触によってベルトに張力が発生すると、第二関節が回転し、可動ギアが固定ギアとの噛み合いにより受動的に回転する。その回転がタイミングベルトを介して第一関節に伝達される構造とした。本構成では、関節間のギア比を1:1に設定しており、第二関節が屈曲すると第一関節も同角度で屈曲す

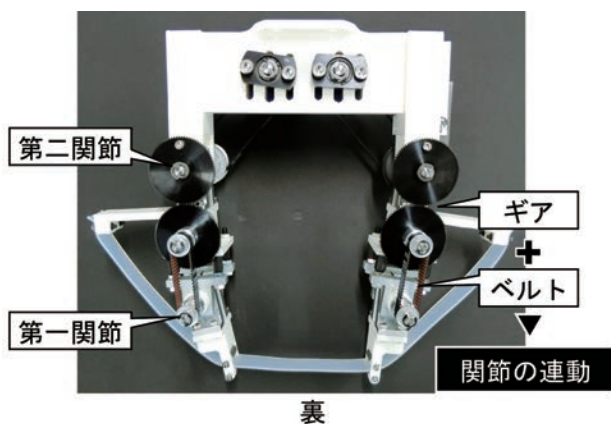
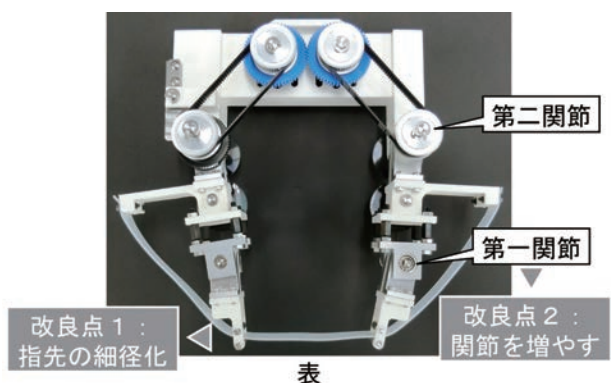


図5 第二世代プロトタイプの改良点

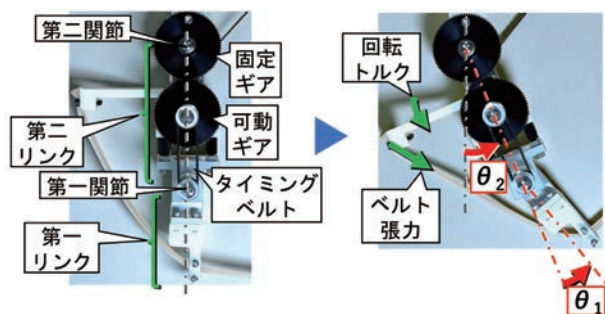


図6 二関節指の受動的連動機構（固定ギアと可動ギア、タイミングベルトによる連動動作）
対象物の把持状況

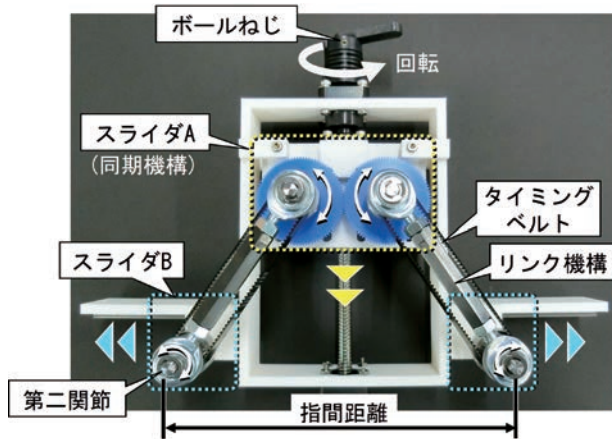


図7 第二世代プロトタイプの手間可変機構

る。これにより、対象物接触時のベルト張力のみで指先が自然に対象物下へ滑り込み、効率的かつ安定した受動把持が可能となった。

4.3 指間距離可変機構の開発

異なる大きさの把持対象に柔軟に対応するため、指間距離を可変とする新たな機構を開発した。図7に指間距離可変機構の構造を示す。

本機構では、上部に配置したボールねじを回転させることでスライダAが上下に直動し、リンク機構を介してスライダBが左右方向へ連動して移動する。この動作により、左右の指間距離を同時に拡張・縮小できる構造とした。さらに、リンク機構とタイミングベルトの長さを一定に保つことで、指間距離を変更しても左右の第二関節の動作が常に同期し、安定した把持動作を維持できるようにした。指間距離の可変範囲は60～120mmとし、ゴボウ、ニンジン、サツマイモなど、形状やサイズの異なる多様な農作物に対して柔軟に対応可能となった。

4.4 第二世代プロトタイプの設計・試作

4.1節で示した「関節数の増加による床置き対応」と「指間距離可変機構の導入による汎用性向上」の方針にもとづ

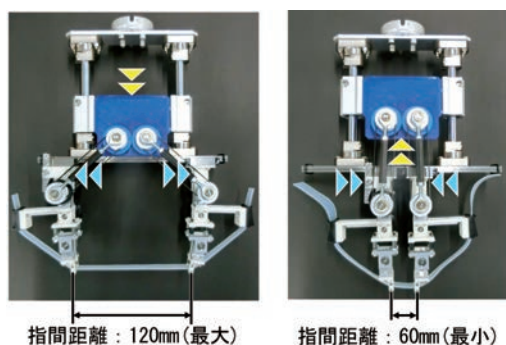


図8 第二世代プロトタイプの外観
(指間距離：最大・最小)



図9 ワンウェイクラッチの動作原理

き、第二世代プロトタイプの設計および試作を行った。図8に第二世代プロトタイプの外観を示す。基本構造は第一世代を踏襲し、主要構造部品には3DプリンタによるPLA樹脂製部品を採用した。指先にはシリコンベルトを用い、対象物への優しい接触と安定した把持を両立している。また、指間可変機構の摺動部にはリニアブッシュを組み込み、滑らかな動作と耐摩耗性の両立を図った。

一方、第一世代プロトタイプでは、把持状態の保持にラチェット機構を用いていたが、保持角度がラチェットの歯数に依存するため、特に床置き対象物など把持角度の微調整が求められる場面で課題が残っていた。そこで第二世代では、ラチェット機構を維持しつつ、その内側に逆回転を防止するクラッチ機構を組み合わせた構造とした。この構成により、把持方向への回転はワンウェイクラッチ(図9)を介してスムーズに動作し、反対方向の回転はラチェット機構によって確実に保持される。結果として、ラチェットの歯ピッチに依存しない無段階の関節角度保持が可能となり、より柔軟かつ高精度な把持保持を実現した。

5. 性能評価試験

5.1 試験環境と方法

第二世代プロトタイプの性能評価は、図10に示す試験環境で実施した。把持試験には協働ロボットUR5eを用い、開発したハンドをアーム先端に装着して行った。

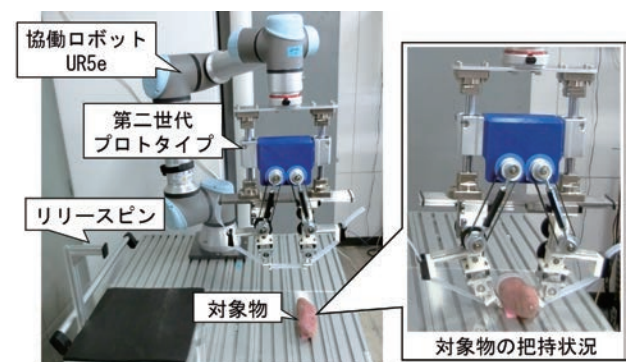


図10 第二世代プロトタイプの評価試験環境
対象物の把持状況

5.2 把持性能評価

第二世代プロトタイプの把持性能を評価するため、床置き

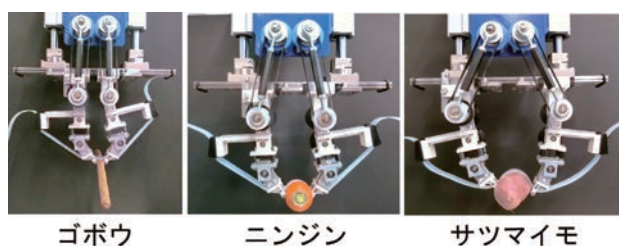


図11 把持試験の様子

状態での把持試験および多種類の農作物を対象とした把持試験を実施した。把持対象物はゴボウ、ニンジン、サツマイモの3種類とし、いずれも水平な平面上に直接配置して試験を行った(図11)。把持試験ではワーク支持台を使用せず、指先が対象物下部へ自然に潜り込む動作の有効性を検証した。

その結果、すべての対象物において安定した把持動作が可能であることを確認した。特に、第一世代プロトタイプで課題であった床置き状態での把持も問題なく達成でき、多様な形状・大きさの農作物に対して汎用的に対応可能であることが示された。さらに、ラチェット機構とワンウェイクラッチの組み合わせにより、把持後の姿勢保持も安定し、確実な把持保持が実現できることを確認した。

5.3 速度性能評価

把持速度性能を比較するため、開発した第二世代プロトタイプと市販電動ハンド(2F Adaptive Gripper・ROBOTIQ社製)による比較試験を実施した。把持対象物はサツマイモとし、協働ロボットUR5eを用いて、同一動作条件下で両者の把持および搬送動作を比較した。

比較試験では、ロボットの移動速度を両条件で統一し、市販ハンドではグripper開閉速度を最高速設定とした。図12に試験中の様子を示す。写真は把持動作を同時に開始した場面であり、開発ハンドが市販ハンドよりも早く把持を完了し、次動作に移行し始めている様子が確認できる。

試験結果として、開発ハンドの作業時間は6.9秒、市販ハンドでは8.1秒となり、開発ハンドは約15%の作業時間短縮を達成した。この結果から、接触駆動方式が把持速度の向上および作業効率化に有効であることが示された。

5.4 試験結果と考察

一連の性能評価試験の結果、開発した第二世代プロトタイプは、当初の開発目標である汎用性・高速性・床置き対応の各性能において十分な実用性を有することを確認した。

把持性能に関しては、ゴボウ、ニンジン、サツマイモを対象に把持試験を実施し、床置き状態を含むすべての対象物で安定した把持動作を確認した。特に、第一世代プロトタイプで課題であった床置き対象物の把持については、指先の薄型化と二関節構造の導入により改善が確認された。さらに、指間距離可変機構の導入によって、対象物の大きさに応じた柔

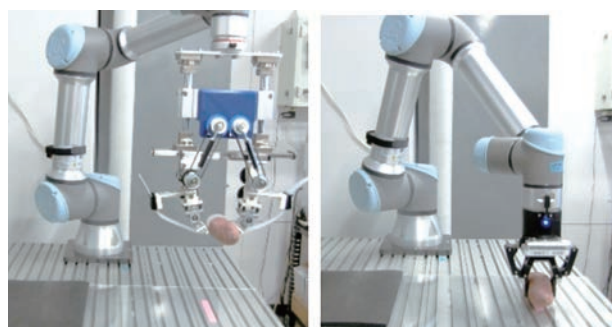


図12 開発ハンドと市販ハンドの速度比較試験の様子

軟な把持が可能となり、対応範囲が大幅に拡大した。

速度性能に関しては、市販電動ハンドとの比較試験により、開発ハンドが約15%短い作業時間を達成し、接触駆動方式の有効性が定量的に示された。

6. おわりに

本研究では、屋外作業の自動化を目的として、接触駆動式高速受動把持ハンドの開発を行った。特に、アクチュエータレスによる高耐環境性、床置き対象物への対応、多様な農作物に適応可能な汎用性の実現を目標とし、第一世代および第二世代のプロトタイプを段階的に開発した。

第二世代プロトタイプでは、指の二関節構造および指間距離可変機構を導入し、代表的な農作物(ゴボウ、ニンジン、サツマイモ)を対象とした性能評価を実施した。

その結果、床置き状態での把持、複数品種への柔軟な対応、そして市販ハンドと比較した高速な把持が可能であることを確認した。

一方で、現行プロトタイプでは指間距離変更時のベルト張力調整が手動であるなど、実用化に向けた課題も明らかとなった。今後は、張力調整の自動化機構の導入、さらなる耐久性評価、より複雑な形状を有する対象物への適応性向上を進め、実フィールドでの検証および実用化を目指す。

参考文献

- 1) 経済産業省：製造業を巡る現状と政策課題，(2017)
- 2) 農林水産省：スマート農業実証プロジェクト報告書，(2020)
- 3) 川島圭太，井川久，他：第24回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集，3E3-01，pp.3431-3432，(2023)
- 4) 川島圭太，井川久，他：第25回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集，3E3-02，pp.2855-2856，(2024)
- 5) Toshihiro Nishimura, Yoshinori Fujihira, et al.: *The ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.9, No.6, No. JMR-16-1232, pp.1-13, (2017)