

氏名	やまぐち けんご 山口 賢悟
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) バイオロボティクス専攻
学位論文題目	実問題への応用を前提とした低自由度汎用ロボットハンドの開発とその評価
論文審査委員	主査 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 田中 真美 東北大学教授 吉田 和哉 東北大学准教授 平田 泰久

論文内容要約

本研究では、産業用ロボットによる生産ラインにおける物体のハンドリング作業に焦点を当てる。現在、物体のハンドリング作業を自動化するためには、ロボットハンドを搭載したマニピュレータに加え、部品を決まった位置で供給するパーツフィーダ、マニピュレータと部品の相対位置姿勢を一意に決める治具といった周辺装置が必要となっている。これらの装置は高価であり、スペースを必要とし、さらに部品の種類が変わった場合は交換する必要がある。このため現在、特に多品種少量生産の製品のハンドリングの自動化が進んでいない。産業用ロボットが、これらの周辺装置を使わなくても作業を行うことができるようになるためには、ロボットの機構、制御技術やセンシング技術等に関するさらなる研究が必要である。本研究では、産業用ロボットが物体をハンドリングするためのロボットハンドの設計手法、機能、構造等を工夫することにより、産業用ロボットの汎用性を高め、産業用ロボットの適用可能な作業を増やすことを目指す。

これまでロボットハンドに関して数多くの研究が行われてきたが、依然として工場ではグリッパや真空パッドが用いられており、ロボットが扱うことができる対象物が限られている。そこで本研究では、3つのコンセプトを基に、3種類のロボットハンド、(1) 小型部品のロバストなビンピッキングを目的とした2本指1自由度ロボットハンド RAPID (Robust and Agile Pick-up Device), (2) 袋などのハンドリングを目的とした吸着機能を有するロボットハンド sGRIPP (Suction Function Integrated Gripper for Power and Precision Grasp), (3) 様々な物体、工具などのハンドリングの実現を目的とした劣駆動ロボットハンド uGRIPP (Underactuated Gripper for Power and Precision Grasp), の研究・開発および評価を行った。

2本指1自由度ロボットハンド(グリッパ)は工場などで広く用いられており、これを改善する効果は大きい。グリッパの機構に関する研究はこれまで十分に行われてきたが、部品把持に最適な設計手法については不十分であると考えられる。市販のグリッパの多くは、様々な対象物形状に対応できるように、対象物と接触する爪先部分が取り換え可能となっており、この爪先の形状はロボットのユーザが設計を行っている。この爪先形状は、対象物が変わるたびに設計しなおす必要があるが、従来はエンジニアの勘と経験に基づいた試行錯誤によって設計されてきた。従来の研究では、特定の形状および作業に最適なグリッパの爪先形状の設計手法などが提案されて

きた。そこで本研究では、より汎用的に対象物形状を円形と仮定することで、より効果的なグリップの爪先形状の設計手法を提案する。この設計手法を基に開発したグリップを RAPID とよんでいる。

ここで、2 次元平面内を動く円形部品を仮定し、グリップの爪先を三角形とする。部品を把持する前に、爪先によって囲い込み、部品に位置誤差がある場合でも取りこぼしを防ぐ（ケーシング）。次にグリップを閉じることで部品を滑らせ、一意の位置に誘導する（セルフアライメント）。最後に 4 点の接触点で部品を把持する（フォームクローチャ）。これらのハンドリングコンセプトを基にし、グリップ、爪先および対象物の幾何学的解析から、把持することができる部品の径の範囲が最大となる爪先形状を導出することができる。1 自由度回転開閉グリップ RAPID と、提案する設計手法を用いて作製した爪先を用いて把持実験を行い、その有効性を示した。

次に、このコンセプトを 3 次元に拡張する。これは、工場におけるバラ積み部品の把持（ビンピッキング）作業を想定している。この場合、物体はロボットに対して 3 次元の位置・姿勢誤差を生じるが、グリップの三角形の爪先で把持することにより位置・姿勢誤差を修正することができる。さらに、部品を把持した状態でグリップを水平にして指を微小幅だけ開き、重力を利用することで、残った位置・姿勢誤差を修正し、一意の位置・姿勢で把持することができる。このコンセプトを基に、1 自由度平行開閉グリップ RAPID 2 (Fig. 1) と、提案する設計手法を用いて作製した爪先を用いて把持実験を行い、その有効性を示した。

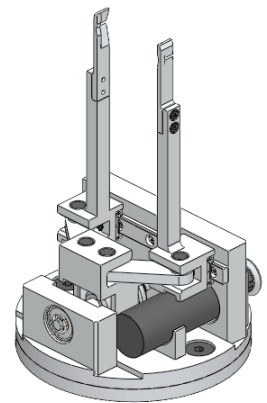


Fig. 1 RAPID 2

ロボットハンドの汎用性を高める方法の 1 つとして、把持機構と吸着機構を組み合わせることによりロボットのハンドリング能力を向上することができる。真空パッドなどの吸着機構をロボットハンドやグリップと組み合わせる研究は、これまで多く行われてきたが、把持機構と吸着機能を独立に用いるか、吸着機構の姿勢を対象物に合わせて調整するものが多かった。また、これまでの研究においては、開発したロボットハンドの有効性を実験により確かめており、その有効性を理論的に解析した研究は行われていない。そこで本研究では、指先に吸着機能を有するロボットハンドによる物体のハンドリングの解析手法を提案する。

真空パッドの吸着力は、真空パッドの面積と真空圧力に比例することが知られているが、真空パッドをロボットハンドの指に取り付け把持力を加える研究はあまり行われていなかったため、真空パッドを有するロボットハンドから把持対象物へどのような力を加えることができるかは分かっていなかった。本研究では、真空パッドの原理から、真空パッドを有するロボットハンドから把持対象物へ加えることができる力の範囲を導出し、接触モデルを構築した。この接触モデルを従来の把持安定性の解析手法に適用し、ロボットハンドに吸着機能を加えることによる有効性を定量的に評価した。

ロボットハンドの指先に吸着機能を加えることで、把持安定性が向上するだけでなく、従来のロボットハンドでは実現が難しかった作業を簡単な制御によって実現することができる。そのような作業の例として、部品の袋

詰め作業が挙げられる。部品をパッケージングするために袋に詰める作業は、工場で一般的に行われているが、袋の大変形を制御する必要があるため、汎用ロボットが行うことが難しい。そのため、人間の作業者が行うか、専用の梱包機が用いられている。指先に吸着機能を有するロボットハンドを用いると、吸着機能により袋を作業台から持ち上げ、袋の口を指ではさみつつ吸着して固定し、指を開くことで袋の口を開くことができ、双腕ロボットを用いれば袋詰め作業を比較的簡単な制御で実現することができる。

本研究では、吸着機能を有するロボットハンド **sGRIPP** 試作機および **sGRIPP** (Fig. 2) を開発した。このロボットハンドは、千葉らによって開発された **iGRIPP** (Integrated Gripper for Power and Precision Grasp) をベースにしている。**sGRIPP** を用いたハンドリング実験を行い、その有効性を示した。

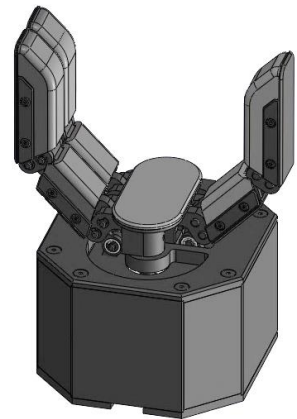


Fig. 2 **sGRIPP**

工場における人間の作業を行えるような汎用的なロボットハンドを実現するためには、単腕によるハンドリングを考えるだけでは不十分である。人間の作業者は両手を巧みに使い、例えば、片手で部品を固定した状態で、もう片方の手で組み付け作業を行ったり、両手で段ボールなどの大型の物体をハンドリングしたりすることができる。近年、双腕ロボットの研究が盛んに行われており、いくつかの双腕ロボットは販売が開始されている。しかしながら、これらの双腕ロボットは単腕用に設計されたロボットハンドを用いており、その性能を生かし切れていない。両手での作業においては、対象物へ比較的大きな力を加えるために、指と掌全体を対象物へ押し当てられることが重要である。そこで本研究では、双腕ロボットへの搭載を想定したロボットハンド **uGRIPP** を開発した。

ロボットハンド **uGRIPP** は、新たに設計した劣駆動リンクを搭載し、アクチュエータ数を増やすことなく、指の回転開閉と平行開閉を切り替えることができ、両手を用いたハンドリングにおいては指と掌を対象物へ押し当てることができる。この劣駆動リンクは、対象物形状に合わせて指を自動的に屈曲させる、なじみ把持も実現することができる。従来のロボットハンド用の劣駆動リンクは、4 節リンクの 1 つの関節を固定し、2 つのリンクをバネとストッパで拘束した構造をベースとしていた。本研究で提案する劣駆動リンクは、5 節リンクを平行 4 節リンクとして用いることにより、指の平行開閉となじみ把持を両立している。さらにバネとストッパにより指リンクの運動を制限することによって、指の回転開閉と平行開閉を自動的に切り替えている。本研究では、提案する劣駆動リンクの運動解析を行い、各リンクの位置・姿勢を計算するとともに、静力学解析により、各種把持状態におけるリンク間の力と把持力、駆動力を計算し、提案する劣駆動リンクが想定通り、なじみ把持や精密把持において対象物に把持力を

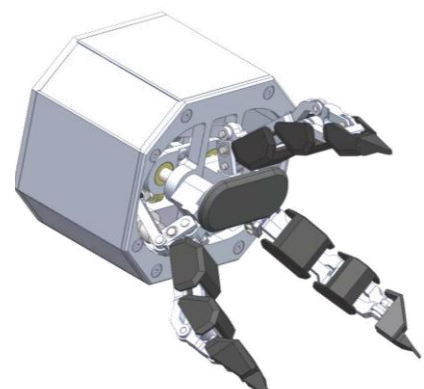


Fig. 3 **uGRIPP**

加えることができることを確かめた。

提案する劣駆動リンクを搭載した **uGRIPP** 試作機を製作し、様々な形状の物体を把持することができることを確かめた。さらに試作機を改良し、指先に **RAPiD** の爪を搭載することにより小型円形部品のロバストな把持も可能とするロボットハンド **uGRIPP (Fig. 3)** を製作し、実験によりその有効性を示した。

以上のように、本研究では、低コストで製作できるにも関わらず汎用的なエンドエフェクタを実現することにより、ロボットの適用可能な分野を広げることを目指し、低自由度汎用ロボットハンド **RAPiD**, **sGRIPP** および **uGRIPP** を開発し評価した。しかしながら、汎用的なロボットハンドを開発するだけでは、ロボットが各種ハンドリング作業を自動的に行うことはできない。現在の産業用ロボットにおいては、マニピュレータおよびロボットハンドの動作を、対象物・作業に合わせて手動で設定しており、対象物・作業が変更された場合は設定し直す必要がある。今後は、開発したロボットハンドおよび双腕ロボットによる把持計画や動作計画に取り組む予定である。