

論文の内容の要旨

論文題目「剛性可変機構を有する多関節グリップングハンドに関する研究」

学位申請者 玉本 拓巳

キーワード：ロボットハンド 劣駆動 包み込み把持 差動歯車機構 剛性可変機構

日本は度重なる地震や津波といった自然災害により、これまでに幾度となく大きな被害を被ってきた。こうした自然災害や、福島第一原発事故のようにそれに付随する災害などにおいて、救助や調査活動を行うことは二次災害といった非常に大きなリスクが付きまとう。こうした背景から、災害時の対応をロボットに任せようとする議論が活発になり、レスキューロボットや災害対応ロボットの研究が盛んに行われている。災害対応ロボットに求められる作業として、瓦礫の撤去や要救助者の搬送、危険物の回収などが挙げられる。いずれもロボットアームおよびハンドを使用する作業であり、ハンドの性能が重要となる。

ロボットハンドによる把持は、大きく指先把持と包み込み把持に分けて議論される。包み込み把持は多点接触という特徴を持ち、外乱に対する把握の頑丈さや対象物の正確な情報を認識する必要なく把持を達成できることから、災害対応ロボットに適していると考えられる。包み込み把持を目的とする多関節グリップングハンドは、深海や宇宙などの極限環境への応用も盛んであり、実際に災害対応ロボットに搭載して運用を試みた研究が存在する。これらのハンドは対象物の形状になじむような把持を達成することで、対象物への負荷を軽減させることができる。また、多くの場合においてセンシングをほぼ必要としない劣駆動による機構が提案されている。災害現場で運用するハンドは衝撃や熱、電磁波といった電気/電子部品にとっての危険因子が多く存在するため、この特徴は大きな利点となる。

しかし、従来提案されてきた多関節グリップングハンドには課題が二つ挙げられ、一つは姿勢の不安定さを孕んでいる点である。これは、最も広く普及しているワイヤ・プーリを用いたテンドンシステムで、そして関節数が多いほど顕著に現れる問題であり、各関節の変位とトルクが相互作用することが原因である。そしてもう一つは、床や壁に密着している対象物に対して、アプローチ可能な姿勢が著しく限定されてしまう点である。これはピンチングを想定していないためであり、指先が対象物と接触している状態でさらに指先関節にトルクを与えようとした場合、上述した相互作用に起因して別の関節へトルクが伝わってしまう。これらのことから災害対応ロボットに取り付けて運用するエンドエフェクタとしては、その機能が不十分であるといえる。

本研究では、従来提案されてきた多関節グリップハンドの、物体形状へなじむ、劣駆動で動作する、などの利点を継承しつつ、関節間の変位およびトルクの干渉、ピンチングの達成といった課題をクリアするハンド機構の開発を目的とし、機構提案および評価を行った。こうしたハンドの実現により、災害対応ロボットのエンドエフェクタとして運用する上で、非常に効果的に作業を達成することができるようになる。

第 1 章では、国内の災害対応ロボットの取り組み、ロボットハンドに関する従来研究の利点および課題、本研究の目的について述べた。また、本研究で開発したハンドが満たすべき要件として、具体的に次の 5 項目を定めた。(1) 物体形状に沿った柔らかい把持を可能とする、(2) シンプルな制御で動作可能な劣駆動機構である、(3) 状況に応じて関節剛性の制御を可能とする、(4) 本質安全を確保した力覚システムを有する、(5) 包み込み把持に加えピンチングを可能とする。

第 2 章では、前章で定めた 5 項目の要件を満たすグリップハンド機構について述べた。これらを満たすには、1 関節につき、関節角度と関節剛性の 2 つの制御を可能とする必要がある。そのため 2 入力 1 出力という特徴を持つ差動歯車機構に注目した。まず差動歯車機構の概要について説明し、その一つである遊星歯車機構をハンドに応用した研究を参考に、本研究に適した形態について議論した。提案した差動歯車機構では、入力にはモータからのトルクおよびバネによる受動的なトルクを与える。能動的な角度制御を行う場合はモータトルクがそのまま関節へ出力されるが、関節が外部との干渉により固定された、または過剰に回転した場合に、バネにエネルギーを蓄えるように動作する。バネの復元力が外部干渉に対する抵抗力となり、バネ力を制御することで関節剛性を可変とする。この提案機構について動作式を示し、理論上、目的とする動作を満たせることを確認した。

第 3 章では、提案したグリップハンド機構の動力学シミュレーション手法および基礎動作に関するシミュレーション結果について述べた。動力学シミュレーションは、実機での正確な測定が困難である接触力や、関節剛性パターンなどの検討のために導入された。まず、運動要素のモデル化と運動方程式の導出過程について詳述した。運動要素には、リンク機構、モータ、把持物が挙げられ、それぞれ独立して運動方程式を導く。その際、基本的にはラグランジュの運動方程式を利用し、柔軟物体の把持物のみ有限要素法を利用した。また把持物とリンク機構の相互干渉は、接触した際の貫入量に比例する反力が発生するペナルティ法を用いる事で再現した。基礎動作のシミュレーションに関しては、把持物無しの場合の屈曲動作と、いくつかの形状に対する包み込み把持について示し、それらの結果より、非常に単純な制御で屈曲動作および物体形状になじむ包み込み把持が達成できることを確認した。

第 4 章では、まず製作した実機および制御系について、そして実験とシミュレーションによる評価について述べた。評価は第 1 章で示した 5 項目の要件に沿って行った。初めに、前章でシミュレーション結果を示した単純な制御による包み込み把持について、実機でも同様に達成可能であることを確認した。次に、重力影響下にある場合や柔軟物体の包み込み把持の実験などから、剛性可変機構の有効性を示した。そして、差動歯車機構の特徴を利用した力覚システムにより、把持過程におけるいくつかのタイミングを把握可能であることを示した。また、提案した劣駆動システムを利用した、指先に動力を伝達する機構により、ピンチングおよび包み込み把持への移行をスムーズに行えることを確認した。

第 5 章では、結論として第 2 章から第 4 章で得られた成果についてまとめ、本研究の目的が達成されたことを示すと共に、今後の展望を述べた。

以上のように、本研究では災害対応ロボットのエンドエフェクタとして運用することを旨とした多関節グリップハンドの開発を目的とし、その実現のために包み込み把持に焦点を当て、機構の提案および評価を行った。特に第 1 章で挙げた 5 項目の要件に対して十分な成果を得たことから、災害現場などのフィールドで運用されるハンドが、より多様な作業を行うための道筋を示し、この分野の発展に貢献できるものと期待される。