

論文の内容の要旨

インハンドマニピュレーション (IHM) は、ロボットハンド内で物体の位置や姿勢を変更する動作を指し、ロボットによるピックアンドプレース作業等において有効な技術である。例として、物体をつまんだ後にハンド内へと移動させる「つまみ上げ操作」やハンド内で物体の姿勢を変更する「回転操作」を行うことが可能となる。IHM を実現するために、表面にベルト等の回転機構 (Active surface) を設けたハンドが開発されている。しかし、つまみ上げ操作時に物体とハンドの間の滑り直接計測し把持力を調整することや、回転操作時に様々な形状の物体に対して大きな姿勢変更を行うことが難しいという課題がある。本博士論文においては、各操作に対して下記の実現を研究目的とし、ハンド外に設置したステレオカメラから得られる把持物体姿勢に基づいた IHM 手法を提案している。

- つまみ上げ操作：カメラから物体とハンド間の滑り状態を推定し、物体と接触する前からハンド内に引き込むまでの一連の操作
- 回転操作：カメラ画像から検出した把持物体の形状や姿勢に応じた制御により、様々な形状の物体に対して大きな操作範囲で姿勢変更

第 1 章では、IHM の活用例や定義を提示し、既存研究とその課題について述べている。その上で、本博士論文における目的を設定している。

第 2 章では、研究目的を達成するための目標、条件、戦略を定めている。

第 3 章では、物体のつまみ上げ操作手法を提案している。Active surface としてベルトを設けた平行 2 指グリップを使用するとき、物体との接触状態に応じて、ベルトと物体の移動量に差が生じる点に着目した。提案手法においては、カメラ画像から取得される物体の位置、姿勢、サイズに基づき、物体とベルトの移動量を比較することで滑り状態を推定する。また、操作を 4 つのフェーズに分け、接触する前からハンド内に引き込む一連の操作を行う。種々の質量、摩擦係数および硬度の物体および実物体を用いた実験を通して、操作開始時には把持していない物体を、滑らずにかつ潰しすぎずに把持し、ハンド内の決められた位置に移動する操作を実現したことが示されている。

第 4 章では、物体の回転操作手法を提案している。物体が落下する状況と、ある姿勢においてそれ以上回せなくなる状況について考察している。それらの要因として、物体とハンド間の接触点が回転操作中に移動し切り替わる点と、ベルト以外の要素によっても回転が生じ得る点に着目し、物体形状と姿勢に応じたベルトとフィンガの制御を行う。32 種類の柱体および 3 次元形状の実物体 12 点を 1 回転させる実験を通して、本手法によって、既存研究よりも操作可能な物体形状の種類および角度が増大されることを示している。

第 5 章では、本博士論文の結論と今後の展望について述べている。

以上のように、本博士論文は、ロボットハンドによる IHM の実現に向けて、ステレオカメラから把持物体の姿勢を認識し、ハンドを制御する手法を提案している。種々の物体に対する実験により、「つまみ上げ操作」および「回転操作」に対する課題を解決できることが示されている。

論文審査の結果の要旨

1. 論文の主題

把持物体姿勢の画像認識に基づくインハンドマニピュレーション技術の開発
Vision-based in-hand manipulation by pose detection of a grasped object

2. 当該研究分野における位置づけ

インハンドマニピュレーション (IHM) は、ロボットハンド内で物体の位置や姿勢を変更する動作を指し、ロボットによるピックアンドプレース作業等において有効な技術である。例として、物体をつまんだ後にハンド内へと移動させる「つまみ上げ操作」やハンド内で物体の姿勢を変更する「回転操作」を行うことが可能となる。IHM を実現するために、表面にベルト等の回転機構 (Active surface) を設けたハンドが開発されている。物体を把持した状態で Active surface を動かすことで、連続的に物体を並進および回転させることが可能となる。一方で、つまみ上げ操作においては、物体とハンドの間の滑りを計測し把持力を調整できる必要もあるが、Active surface の表面にセンサを搭載することは困難である。ハンド外部に設置したカメラを用いて滑り状態を推定する研究も行われているが、一度把持力を調整した後に状態推定および力の調整を行っており、物体と接触する前からの処理は想定されていなかった。また、回転操作については、Active surface を用いる既存研究においても、物体によっては姿勢変更の範囲が制限されていた。操作範囲を広げるためには、物体形状や姿勢の情報に応じた制御を行う必要があるが、それらの情報に基づいた手法はこれまで例を見なかった。

本博士論文では、ステレオカメラにより認識した把持物体姿勢に基づいてロボットハンドの制御を行うことで、滑り状態を推定し物体と接触する前から把持力調整を行うことが可能なつまみ上げ操作と、種々の形状の物体に対して広い範囲での姿勢変更が可能な回転操作の両者を実現した、独自性の高いものである。

3. 論文の構成

本博士論文は、以下の 5 章で構成されている。

- 第1章 序論
- 第2章 研究方針
- 第3章 つまみ上げ操作手法
- 第4章 回転操作手法
- 第5章 結論と今後の展望

4. 論文の独自性・成果

本博士論文は、Active surface を持つロボットハンドにおいて実現されていなかった、滑り推定を行えるつまみ上げ操作と、種々の物体形状に対して姿勢変更の範囲を拡大できる回

転操作の両者を、ステレオカメラにより認識した把持物体の情報に基づいてハンドを制御することで実現している。本論文の成果は以下のように要約できる。

- (1) 画像を用いて物体と **Active surface** の移動量を比較することで、種々の質量、表面状態および硬度の物体に対して、滑らずにかつ潰しすぎない把持を実現した。
- (2) 操作開始時には把持していない物体を、ハンド内の決められた位置に移動させるつまみ上げ操作手法を提案した。
- (3) 物体が落下する状況と、ある姿勢以上に回らなくなる状況を考察し、それらの対策のために必要な物体情報を画像から抽出する手法を提案した。
- (4) 物体情報に基づいてフィンガや **Active surface** を制御することで、既存研究よりも操作可能な物体形状の種類および角度を増大させた。

上記成果のうち、特に、つまみ上げ操作時に画像を基に物体と **Active surface** の移動量を比較する処理、および、回転操作時に物体が落下または回転しなくなる状況に対して必要な物体情報を画像から抽出する処理は、それぞれ高い独自性を持つものであると言える。また、これらの技術により、各課題を解決するつまみ上げ操作および回転操作を実現できたことは、IHMの研究分野において大きな貢献を持つと言える。

5. 論文の課題

本博士論文では、つまみ上げ操作と回転操作とを提案したが、ピックアンドプレース作業を行うためには、物体を決められた場所に配置するプレース操作の実現も求められる。同時に、各操作を統合させ、一連の作業を行えるシステムを構築することも必要となる。それらの手法やシステムの開発が今後の課題となる。

6. 論文の評価

本博士論文では、ロボットハンドによる IHM の実現に向けて、ステレオカメラから把持物体の姿勢を認識し、ハンドを制御する手法を提案した。IHMにより可能となる物体操作のうち、物体をピックしハンド内に引き込む「つまみ上げ操作」と、ハンド内で物体の姿勢を変更する「回転操作」に着目し、以下の成果を挙げた。まず、つまみ上げ操作においては、カメラ画像を用いて、物体と **Active surface** の移動量の差分より滑り状態を推定しながら、物体をハンド内の任意の位置まで引き込む操作手法を構築した。提案手法により、種々の物体を滑らせずにかつ潰しすぎずに把持し、決められた位置まで移動させるつまみ上げ操作を実現した。次に、回転操作においては、操作中に把持物体が落下する状況とある姿勢以上に回らなくなる状況に対して、カメラ画像から物体形状や姿勢に関する情報を取得し、所望の回転を行えるようにハンドを制御する手法を提案した。提案手法により、既存研究と比較して多くの物体形状に対して広い範囲での操作が可能となった。

以上のように、IHMの研究分野において今後の工学的な応用も期待できる独創的な成果を挙げた本博士論文は、博士（工学）の学位論文として十分に値するものと認める。