

氏 名	わた なべ てつ よう 渡 邊 哲 陽
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2262 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科機械工学専攻
学位論文題目	Optimization of Grasping by a Robotic Hand and Trajectory Design of 3-D. O. F. Arm with an Unactuated Joint (ロボットハンドによる物体の把持の最適化と非駆動関節をもつ 3 自由度アームの軌道設計)
論文調査委員	(主 査) 教授 吉川恒夫 教授 足立紀彦 教授 土屋和雄

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ロボットハンドによる把持の最適化に関する研究ならびに非駆動関節をもつ 3 自由度アームの軌道設計に関する研究をまとめたものである。全体で 7 章から成り立っている。

第 1 章は序論であり、研究の背景、関連研究、研究目的と本論文の構成について述べている。

第 2 章は要求外力集合を用いた把持の最適化の研究について述べている。ロボットハンドによって物体の把持を行う場合、任意方向から対象物に加わる外力・モーメントに対して、それを打ち消して対象物を平衡状態に保つことができるなら、その把持をフォースクロージャと呼ぶ。このフォースクロージャーを実現できる対象物表面上のロボットハンドによる接触点位置の組み合わせは無限に存在する。そこで、要求外力集合に含まれる任意の要求外力に抵抗できる接触点位置の組み合わせの中で、その要求外力に抵抗するのに必要な接触力を最小化するような組み合わせを求める問題を設定している。要求外力集合とは、対象物に加わる、ロボットハンドによって抗しなければならない外力の集合である。この集合は作業に応じて設定され、フォースクロージャーを含めた一般の望みの把持を扱うことができる。また、要求外力集合の大きさは抵抗したい外力の大きさに相当するため、抵抗可能な外力・モーメントの大きさを評価することができる。この問題を、分枝限定法をもとにしたアルゴリズムを用いて解いている。さらに数値例により、本手法の有効性を示している。

第 3 章は要求加速度・平衡力集合を用いた物体の把持の最適化の研究について述べている。フォースクロージャーは 2 通りの解釈が可能である。一つは、前述の定義であり、もう一つは、対象物の任意方向に加速度を発生できる、である。これまで、この 2 通りの解釈を区別した上で、最適な接触点位置を求める問題は考察されてこなかった。そこで、外力・モーメントに抗する力からなる集合を要求平衡力集合、対象物に発生させたい望みの加速度からなる集合を要求加速度集合と定義し、次のような問題を設定している。“与えられた操作範囲内の各対象物位置姿勢において、要求加速度・平衡力集合に含まれる任意の要求加速度・平衡力を発生することができる接触点位置とロボットハンドの姿勢の組み合わせの中で、それら要求加速度・平衡力を発生するのに必要な関節トルクの大きさが最小となるような組み合わせを求めよ。”この問題を、分枝限定法をもとにしたアルゴリズムを用いて解いている。また、数値例により本手法の有効性を示している。

第 4 章は複数対象物に対するパワーグラスプの最適化の研究について述べている。パワーグラスプとは、あらかじめ各関節に適切なトルクを与えておけば、把持している対象物に任意方向の外力が働いたとき、関節トルクを変えなくても機構的に接触力が発生し、外力を打ち消すことができるという把持である。今までパワーグラスプの研究は単一対象物の把持にその対象に限られていた。しかしながら、一つの対象物を把持する場合よりも、一度に複数の対象物を把持する場合の方が効率が良い事もある。そこで、ロボットハンドで複数対象物を同時に把持する場合において、パワーグラスプを構成するための条件を導出している。パワーグラスプを用いる目的の一つに、機構的に外力を打ち消す接触力の発生機能を有効に利用しようということが挙げられる。そこで、要求外力集合に含まれる任意の要求外力に抵抗するのに必要な関節トルクの大きさをできるかぎり小さくしたいという観点から、パワーグラスプを構成するのに必要な最適な関節トルクを求めている。また、

数値例により本手法の有効性を示している。

第5章は多指ハンドによるピボット操作を動的制御を用いて行う場合の接触力最適化の研究について述べている。ピボット操作とは、家具のような重い物体を動かすときに人間が行うような、対象物を環境との接触点を含む軸まわりに回転させる操作である。この操作では、環境からの反力を利用することで、従来のハンドのみの操りよりも小さな力で、対象物を操ることができる。直方体形状物体に対するピボット操作を準静的に行うための手法が提案されているが、この方法は一般の対象物に適用できるものではなかった。そこで、ピボット操作を行うための動的制御法を構築している。その際、指先接触力の大きさを最小化するような内力の目標値を求めている。この内力の目標値を使うことで、環境からの反力を利用して小さな指先接触力で物体を操ることができる。また、実験により本手法の有効性を示している。

第6章は非ホロノミックな拘束を持つ3自由度マニピュレータの目標軌道の生成と収束制御の研究について述べている。2階非ホロノミックシステムの一つに、水平面内において2つの回転駆動関節の先に一つの回転自由関節を持つ3自由度アームがある。この系に対して、系を2階のチェインド形式として表現し、閉ループ制御する手法が提案されている。ここでは原点へと指数関数的に収束する軌道に対して状態を指数関数的に収束させる手法が用いられており、目標軌道追従と最終的な目標状態(原点)への指数関数的な収束が同時に達成されている。しかしながら、そこで用いられた目標軌道は限定されており、任意に与えられた初期状態から始まるものではなかった。そこで、このアームに対して、任意の初期状態から、任意に定めた1つの目標通過点を通じたのち、原点へ指数関数的に収束する軌道の生成手法について提案している。また、数値例により本手法の有効性を示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ロボットハンドによる把持の最適化に関する研究ならびに非駆動関節をもつ3自由度アームの軌道設計に関する研究をまとめたものであり、得られた結果は次のとおりである。

(1)ロボットハンドによる把持に関して、まず、対象物に加わる任意方向の外力を打ち消して、対象物を平衡状態に保てる時、その把持をフォースクロージャーと呼ぶ。フォースクロージャーを実現できる対象物とロボットハンドとの間の接触点位置は、一般に無限に存在する。そこで、与えられた要求外力集合に含まれる任意の外力に抵抗するのに必要な接触力を最小化するような接触点位置を求める方法を提案している。

(2)フォースクロージャーは2通りの解釈が可能である。一つは上述の定義であり、もう一つは、対象物に任意方向の加速度を発生させることができるというものである。そこで、生じうる外力・外モーメントに抗する力からなる集合を要求平衡力集合、対象物に発生させたい望みの加速度からなる集合を要求加速度集合と定義し、これらの集合をもとに、接触点位置とロボットハンドの姿勢を最適化することを提案している。

(3)任意方向の外力が対象物に加わったとしても、関節トルクを変更することなく機構的にそれを打ち消す接触力が発生するような把持形態は、パワーグラスプと呼ばれる。複数の対象物を把持してパワーグラスプを構成する際の最適な関節トルクを要求外力集合の概念を用いて求める方法を提案している。

(4)対象物を環境との接触点まわりに回転させるピボット操作においては、環境からの反力を利用して小さな力で重い対象物を操ることができる。このピボット操作を動的制御するための手法及び、指先接触力の大きさを最小化するような内力の目標値を求める手法を与えている。

(5)水平面内において2つの回転駆動関節の先に一つの回転自由関節を持つ3自由度アームは、2階非ホロノミックシステムであり、これを安定に制御するための制御則が知られているが、アームの目標軌道の与え方によっては安定になるとは限らない。そこで、安定に制御できるような目標軌道生成のための1方法を提案している。

以上、本論文は、ロボットハンドによる物体の把持および操作計画に関して、接触点位置、関節トルク、接触力を最適化するための新たな手法を提案し、また非駆動関節をもつ3自由度アームの安定な制御実現のための新たな軌道計画手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。