

## 第 6 章 結 論

本研究では、有限な発生トルクのアクチュエータで構成されるパワーアシスト装置の制御系に関する問題を検討した。本研究により得られた主要な結果は以下のようにまとめることができる。

#### 1) 重力負荷と動的負荷を個々の比率でアシストするシステムの提案

まず、アクチュエータのトルク飽和によるアシスト効果の変動が、パワーアシスト装置の安定性、操作性に悪影響を及ぼすことを示し、トルク飽和を回避するパワーアシスト装置の一構成法として、重力負荷と動的負荷を個々の比率でアシストするシステムを提案した。具体的には、まず、従来一つの比率でアシストされてきた負荷を、重力などに関する重力負荷と、慣性力、粘性力に関する動的負荷に分離し、それぞれ個々の比率でアシストする制御系を構成する。その後、これらの比率を、重力負荷については、操作者の持続的に発生できる最大力で負荷が保持できるように決定し、その後、動的負荷については、重力負荷をアシストしたアクチュエータの残りのトルクを考慮しながら、動的負荷のアシストに必要なトルクがこれを超えることないように決定する。これにより、アクチュエータのトルク飽和を回避しながら、アクチュエータの限られたトルクを、従来法と比べ有効に活用するパワーアシスト装置を構築することができる。さらに、一関節型のパワーアシストを試作し、実験によりアクチュエータのトルク飽和が操作性に悪影響を及ぼすこと、及び従来手法に対する提案手法の優位性を確認した。

#### 2) 提案するパワーアシスト法を実現する制御系の設計法

一般的な多関節アームを用いて、上記のパワーアシスト法を実現するための制御系の設計法を提案した。まず、ベース座標

系に基づくインピーダンス制御を核とするパワーアシスト制御系の構成を示した後、この制御系で用いられるパラメータの決定法を提案した。このパラメータ決定法の具体的内容は以下の通りである。

まず、負荷と操作者の間に介在するアーム手先の目標慣性、粘性摩擦係数行列については、アーム手先が本来有する慣性、粘性摩擦係数行列をベース座標系に基づいて求め、この値とあまりかけ離れなれた値とならないように決定する。これにより、アーム手先は本来有する特性と近い特性でインピーダンス制御されるため、必要となるアクチュエータの出力トルクを軽減することができる。次に、重力負荷と動的負荷をアシストする比率については、1)においてその決定指針を示したが、実際にこれを計算しようとする、動的負荷をアシストするために必要となるトルクが、操作者の挙動に対して複雑かつ非線形に変化し、このトルクを計算するコストが膨大になるため、それを動的可操作性の概念などを用いて軽減する方法を提案した。また、この計算時に必要となる操作者の最大速度、加速度の正確な見積もりは、結果的に設計者、及び操作者に多大な負担を強いることになるため、予め少し大きめの値を選定し計算に用いることで、この負担を軽減する方法を提案した。さらにこれらを総合し、パラメータの決定手順を示した。

そして、並進2自由度のパワーアシスト装置を試作し、実験により制御系の有効性を確認した。また、パラメータ決定法の核である、アクチュエータのトルク飽和有無の判別法の有効性を、先の実験値を用いて確認した。さらに、これらのパラメータの決定法に操作者の主観を加味するため、心理物理学実験を行い、各比率でアシストしたときの操作感の評価値により、ア

クチュエータのトルク飽和を回避することが望ましいこと，動的負荷より静的負荷を高い比率でアシストした方が操作感が良くなることを確認した．

### 3) 動力学特性が未知の負荷に対する重力負荷と動的負荷の分離法

動力学特性が未知の負荷に対して，提案するパワーアシスト法に基づくアシストを行うため，負荷の重力成分と動的成分の分離法を提案した．並進力成分については，負荷からアーム手先に加わる力をベース座標系に変換し，ローパスフィルタを用いることにより，重力成分と動的成分を分離する方法を提案した．また，トルク成分については，センサ座標系における負荷重心位置を推定することで，重力負荷と動的負荷が分離できることを示した後，この重心位置をオンライン最小二乗法を用いて推定する方法を提案した．さらに，負荷の持ち上げ時などに，床から加わる外力により変動する重力負荷を推定するため，ローパスフィルタの時定数を，予めやや小さめに設定する方法と，負荷の状態により変動させる方法の2つの方法を提案した．そして，3自由度のパワーアシスト装置を用いた実験により本分離法の有効性を確認した．

本論文で提案した手法は，アクチュエータのトルク飽和を回避しながら，トルクを有効に活用できるという面で従来手法に比べ優位性を有している．しかし，反面，負荷の重力成分と動的成分を分離することが必要となり，これらをどのように分離するかが問題となる．本研究では，負荷を主にアーム手先に固定した剛体負荷であるとし，また，負荷は主に自由空間内で操作されるとして，この分離法を検討した．人がその筋力を最大限まで出力することを要求される作業は，大抵がこのような負

荷の持ち上げであることを考えると、このような前提は必ずしも不適切であるとは考えないが、より汎用のパワーアシスト装置を構築するためには、様々な場面において、負荷の分離が行える方法を新たに考えることが必要となる。なお、このようなパワーアシスト装置においては、分離する負荷の成分も、現在の重力成分と動的成分だけでは不十分で、外力などの成分も分離することが必要になると考える。

本論文では、主に安定性、操作性という観点からパワーアシスト系の評価を行ってきた。しかし、この技術が現実の社会へ応用されるためには、さらに安全性という観点からの検討が必須と考える。ここで、安定性、操作性は安全性を高める一つの指標であると考えるが、安全性という大きな枠組みの中でいえば一部でしかなく、安全性を検討するためには、様々な要素を根本から見直すことが必要と考える。このような安全性の検討は、人間と機械が協調して一つの作業を行うための技術として重要であり、非常に興味を持たれる分野である。