

第 1 章 緒論

1. 1 本研究の背景

人は環境との物理的な相互作用によって、自己の意志の実現を図るが、そのためには、実現する作業に見合った力を、自己の筋により発生することが要求される。ここで、目的とする作業が、それを行う主体者の発する筋力で十分に達成できるのであれば、なんら問題はないが、往々にして主体者の筋力では、十分でないことがよくある。これに対し、機械の力を用いて、環境から主体者に加わる力を減少させ、目的とする作業を容易に行うことを可能にするのが、パワーアシスト装置である。パワーアシスト装置は重負荷を扱う全ての局面において、操作者の負担を減少するという意味で有益であるため、その応用分野は広く、例えば工場内における重負荷の搬送に用いたり、グラインダなどの工作工具を操作する負担を軽減するために用いたり、トラックからの貨物の積み降ろしに用いたりといった使用法がまず考えられる。また、特に高齢者のための作業補助装置や病院等における患者の移動装置については大きな期待が寄せられている¹⁾。

パワーアシスト装置の研究および開発は比較的早く、1960年代のCornell航空研究所のMyotron^{2),4),5)}やGeneral Electric社のHardiman^{3),4),5)}に端を発する。その発想の原点は、兵士に重負荷の搬送を容易に行わせるため、人力を増幅する「よろい」を開発することにあった。この時点で発想されたこの「よろい」は、まさにバイラテラルマスタスレーブシステムであり、操作者が外骨格型のマスタを装着し、大出力のアクチュエータを擁するスレーブが、その外側に配されるような構造をしていた。内側のマスタの動きに対し外側のスレーブが追従し、外側のスレー

ブに加わる力を比例的に縮小した力が，内側のマスタを通じ操作者に加わるように制御を行うことにより，動力化されたスレーブの動きを，操作者の四肢の動きと一体化させ，人に重作業を柔軟に行わせることを意図した装置であった．しかし，これらの研究は，予備的な実験が行われただけで，試作機も開発されることなく終わっている．その原因としては主に，サーボやセンサ技術，機械設計の分野における問題があったと報告されている．このようにサーボやセンサ技術が問題となる一つの要因として，これらのシステムでは，マスタとスレーブの2つのアームを用いて装置を構成することを想定していたため，各関節毎に2組のアクチュエータと角度センサを配しなければならないことがあった．これに対し，H.Kazerooni (1989)は，1つの動力化されたアームを用いて，つまりアーム各関節毎に1組のアクチュエータと角度センサを配することで，パワーアシストを実現する手法を提案した⁶⁾⁻¹⁰⁾．それは，1つのアームに加わる操作者と負荷の力を，2つの力センサにより計測し，これがある一定比となるようにアームの挙動を制御することにより，パワーアシストを実現するといった手法であった．また，この手法を用いた"Extender"と呼ばれるパワーアシスト装置で，その有効性の検証を行っている．なお，これ以降のパワーアシストの研究は，一般的に，このような1つのアームを用いて実現されるパワーアシストを対象としており，それは本研究においても例外ではない．しかし，このKazerooniの提案した手法は，アシストの効果を上げるとシステムが振動することから，それを回避するため，高周波成分におけるアシスト効果を下げることにより装置の安定化を図らねばならなかった．つまり，装置が安定であるためには，アシスト効果の増加と共に，アシスト

効果が持続する周波数領域を減少させなくてはならず，ここでアシスト効果を優先するか，応答性能を優先するかというトレードオフが生じていた．この問題に対処するため，小菅ら(1993)は，操作者と負荷の間に介在するアームを，操作者及び負荷から加わる力に対し，一定のインピーダンスとなるように制御する「仮想ツール」の概念を提案し，この手法が，上記の問題を回避できる，つまりアシストする周波数帯を限定することなく，アシスト効果を任意に決定できることを示した¹³⁾⁻²¹⁾．さらに，この手法を動力学特性が未知である油圧ロボットを用いて実現するため，松井ら(1993)は，アーム加速時の油圧アクチュエータのトルク飽和を考慮した適応インピーダンス制御系の設計法について検討し，提案する手法が適応系の不安定化を防止することに有効であることを示した³⁰⁾．ただし，この研究では，実際にトルク飽和が生じたときに，操作者を含めたシステムが安定であるかどうか，また，このようなトルク飽和が生じるシステムが操作者にとって扱いやすいかどうかの議論はなされていない．

これら近年の研究で一般的に用いられるパワーアシスト装置の構成を簡易的に示したのが Fig.1-1 である．アームの手先には，操作者及び負荷からアームに加わる力を計測する力センサが配され，各センサから得られる情報を基に，操作者の動きに追従し，かつ負荷から加わる力を比例的に減少させて操作者に伝えるように，アーム関節部のアクチュエータのトルクが制御される．本論文で取り上げるパワーアシスト系の構成もこれに従い，便宜上，図のようなアームを議論の対象とするが，本論文で展開する議論は，力センサと位置センサを有し，冗長自由度のない動力化された機械システム全てを対象とする一般的な

議論であることを予め述べておく。

このシステムにおける技術的課題は、バイラテラル遠隔操作システムとほぼ共通であるが、それに加えて解決を要する重要な問題は、トルクが有限であるアクチュエータを用いて構成されるパワーアシスト装置の操作性を、いかに良好に保つかである。パワーアシスト装置では、遠隔制御システムと異なりマスタとスレーブが一体化しているため、スレーブに加わる力の一部が直接マスタにも加わる。そのため、スレーブを駆動するアクチュエータにトルク飽和が生じた場合、操作者に加わる力が不規則に増大し、アシスト効果の均一性が保たれなくなり、これによって操作性、安定性が低下すると考えられる。これを未然に防ぐためには、アクチュエータの最大出力トルクを考慮しながら、操作者負荷負担率（Fig.1-1 中の γ ）を予め大きく設定することがまず考えられるが、結果的にトルク飽和は回避できても、操作者の負荷負担は増大するため、操作性の低下を必ずしも防ぐことはできない。

パワーアシストの従来の研究では、制御構造や安定性の問題が多く取り扱われてきた²⁾⁻³⁰⁾。その結果、現在までに力のフィードバック制御やインピーダンス制御を用いたパワーアシスト法の有効性が明らかにされている。しかし、例外はあるものの³⁰⁾、そのほとんどは、アクチュエータが無限のトルクを出し得ることを前提に議論が進められているため、発生トルクに限界を持つアクチュエータを用いて構成される実用パワーアシスト装置を開発する上では、以上に述べたような観点からの制御系の設計法に関する検討がさらに必要であると考えられる。

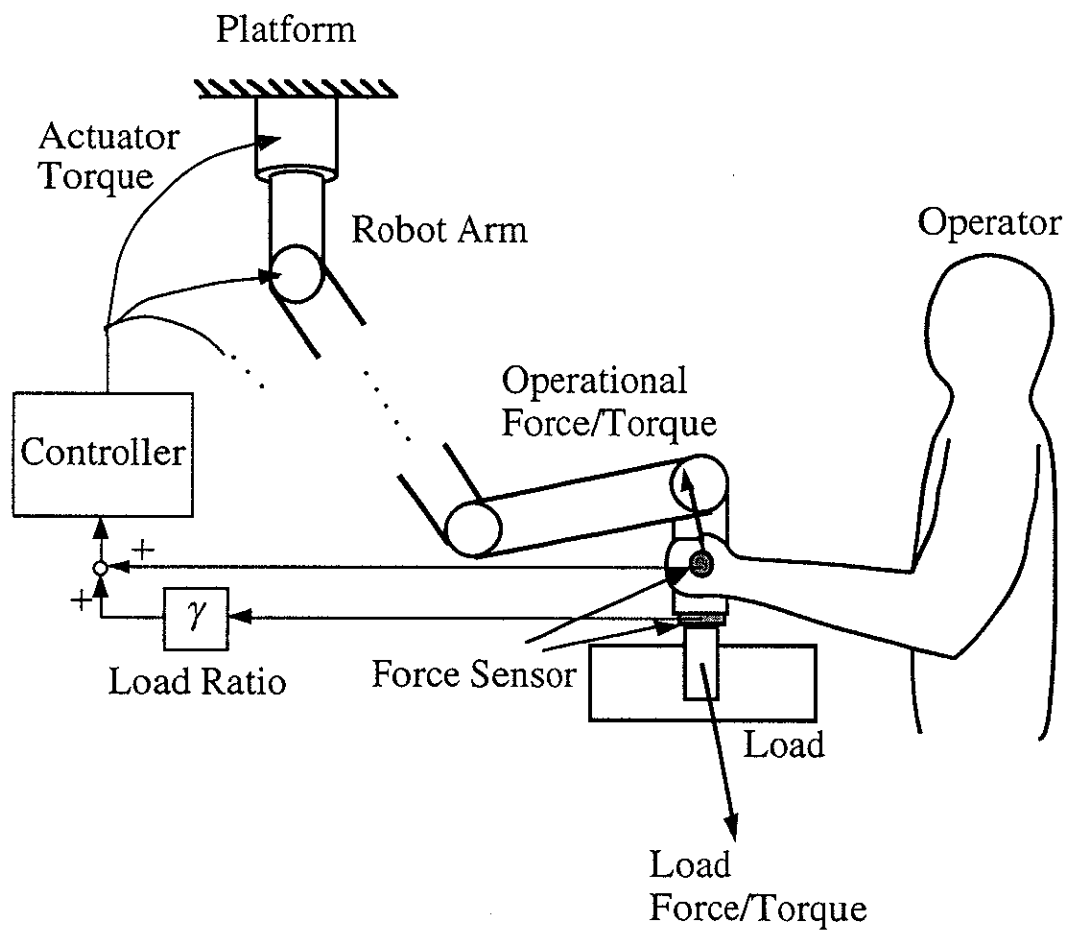


Fig.1-1 一般的なパワーアシスト装置の構成

1. 2 本研究の目的

本研究では，前節で述べた現状認識に基づき，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する．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操作性に及ぼす影響を考察すると共に，トルク飽和を回避するパワーアシストの一構成法として，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する．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，摩擦力など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最大力などを考慮して決定し，動的負荷についてはアクチュエータの最大トルクなどを考慮して決定する．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有効に活用するパワーアシスト装置を構築することを意図している．さらに本システムでは，この比率の個別設定機能を利用して，操作者に加わる重力負荷と動的負荷のバランスを自在に変えることができるため，このバランスを適切に設定することにより，操作感の向上が計れる可能性がある．そのため，これらの比率をどのように決定すれば操作感の優れたパワーアシストが実現できるのかについての検討も行う．本研究では，この提案手法を実際の機械システムにおいて実現する方法を系統的に明らかにし，その有効性を実験により検証し，また各負荷をアシストする比率の設計指針を確立することを目的とする．

1. 3 本論文の構成

第1章「緒論」では、研究の背景、目的について述べた。

第2章「パワーアシスト法の提案」では、まず始めに、従来のパワーアシスト装置において、アクチュエータにトルク飽和が生じた時、どのようにアシスト効果が変わるかを述べ、これが装置の安定性、操作性を損なう一因となることを示唆する。その後、これを踏まえ、重力負荷と動的負荷を個々の比率でアシストすることで、アクチュエータのトルク飽和を回避しつつ、アクチュエータの限られたトルクを有効に活用することを意図したパワーアシスト法を提案する。そして、一関節型のアームを用いたパワーアシスト装置を例に、提案手法の特徴を従来手法と比較しながら述べた後、提案手法を実現する制御則の定式化を行う。さらに、一関節型のパワーアシスト装置を試作し、それを用いた実験により提案手法の有効性を検証する。

第3章「多自由度システムの適用」では、本研究で提案したパワーアシスト法を、一般的な多関節アームを用いた多自由度システムで実現する制御系の構成について論じる。そのため、まず、アームの運動方程式を求め、次に、アームの手先で実現されるべき力の関係、つまり操作者がアームに加える力、アームから負荷に加わる力、アームの手先における操作力の3つの力を、提案するパワーアシスト法を達成するためにどのような関係にするかを論じる。そして、これらの力関係を実現する制御系について述べ、さらに、この制御系に関する議論の中で、動力学特性が既知の負荷に対する、負荷の重力成分と動的成分の分離法についても論じる。そして、新たに試作した多自由度パワーアシスト装置の構成について述べた後、それを用いた実

験により，多自由度系における提案手法の有効性を検証する．

第4章「操作者負担率の決定法」では，前章で示した多自由度系で重力負荷と動的負荷を異なる比率でアシストする制御系において，これら重力負荷と動的負荷に対して操作者が負担する力の比率をどのように決定するのかについて論じる．なお，この操作者が負担する力の比率を以後操作者負担率，または単に負担率とする．ここで，この負担率の決定において考慮すべきは，操作者に加わる力がその最大力を超えないこと，負荷及びアームのアシストに必要なトルクがアクチュエータの最大トルクを超えないこと，操作者に加わる重力負荷と動的負荷のバランスが適切であることである．本章では，それぞれの条件に基づいて負担率がどのように規定されるのかについて述べる．ここで特に，アシストに必要となるトルクがアクチュエータの最大トルクを超えないという条件については，操作者負担率の値，負荷の作業領域，操作者の操作挙動などにより，アシストに必要となるトルクが複雑に変化すること，さらに，操作者負担率の変更に伴い操作者の操作挙動自身が変動することなどから，この条件を満たす負担率を導き出すためには複雑な手順が必要となる．そのため，まず，アシストに必要なトルクを定式化し，負担率などの各パラメータがこのトルクに及ぼす影響を考慮しながら，アクチュエータのトルク飽和を回避するために，負担率をどのように決定するかという手順について，デカルト質量行列，動的可操作性の概念を用いながら，順序立てて説明する．さらに，前章の実験条件及び実験結果を例に，本決定法に置いてその核となる，アクチュエータのトルク飽和の有無の判別が有効であるかどうかを確認する．また，負担率の決定に際して，操作者の主観を加味するための心理物理実験を行い，

どのように負担率を決定するのが操作者の主観という観点から望ましいかを論じる。

第5章「重力負荷と動的負荷の分離法」では，動力学特性が未知である負荷に対しても，提案するパワーアシスト法に基づいたパワーアシストを行うために，未知負荷の重力成分と動的成分を分離する方法について述べる．動力学特性が未知の負荷においてこれを分離するためには，各センサ入力値から負荷の動力学特性をリアルタイムに推定することが必要となる．したがって，まず，この動力学特性と各センサ信号の関係を定式化し，それを基に重力負荷と動的負荷を分離する手法を述べる．具体的には，並進力成分の分離に関しては，絶対座標系に基づいて記述される重力負荷による並進力が，定常成分として表されることから，この分離を行うにローパスフィルタを用いることが有効であることを述べる．その後，最小二乗法推定を用いて負荷重心位置を推定することで，モーメント成分における分離も可能であることを示す．さらに，実際の負荷搬送においては，負荷の持ち上げ時，及び着地時に床から反力が加わり等価的に重力負荷が変動したのと同じ効果が生じるため，これに対する対処法についても検討する．以上の分離法の有効性を検証するため，動力学特性が未知であるという負荷条件の下で，上記の分離法を用いたパワーアシストが適切に機能するかを実験により検証する．

最後に，第6章「結論」において，本研究の成果を総括し，残された問題点，将来の展望等について述べる．