

第 2 章 パワーアシスト法の提案

2. 1 はじめに

前章で述べたように、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ると、アシスト効果の変動により、操作性が低下すると考えられる。したがって、本章では、これを回避するための一手法を提案し、その有効性を論じる。提案手法は、まず、負荷がアームに加える力を、重力成分と動的成分に分離し、それぞれの成分を個別の比率を用いてアシストする制御系を構成する。その後、その比率を操作者の最大力と、アクチュエータの最大トルクを考慮して決定する。この手法は、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するパワーアシストを構築することを意図している。さらに、操作者の主観を考慮して、これらの比率を決定することで、より操作感の優れたパワーアシスト装置を実現する可能性があるが、その議論については第4章に譲る。

本章では、まず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について述べた後、この変動が装置の安定性、操作性を低下させる一因となることを指摘する。次に、上記の提案手法について述べ、まずは単純な系から議論を始めるために、一関節型アームを用いたパワーアシスト装置を例に、提案手法の特徴について述べた後、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。

2. 2 アクチュエータの最大トルクとアシスト効果

パワーアシスト装置の一例として、一関節型アームを用いたパワーアシスト装置の一般的構成を Fig.2-1 に示す。この種のパワーアシスト装置では、アーム手先に取り付けた力センサで検知される操作者手先の動きに応じて、アクチュエータを駆動し、アームを追従させる。その際に、アームに加わる実際の負荷（トルク） W の γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) 倍だけ、人が筋力を出せばその負荷を操作できるように、アクチュエータを駆動する。すなわち、アクチュエータが負荷 W に対し常に $W(1-\gamma)$ のトルクを出して、操作者の力作業をアシストする。この機能を実現する制御系は、図に示すように負荷を計測する力・トルクセンサに γ を乗じた値と操作者の手先に加わる力の差に応じて、アクチュエータを操作することで構成できる。以下では、 γ を操作者負担率（または単に負担率）、 $W(1-\gamma)$ をアシストトルクと呼ぶことにする。

アクチュエータが十分なトルクを出力する能力を持ち、かつ系が安定に設定されている場合、図のシステムは仕様通りに動作する。しかし、アクチュエータが最大トルク τ_{\max} を超える過大な負荷の駆動が要求されると、アクチュエータにトルク飽和が生じ、この時、操作者負担率はそれまでの γ から、より大きな比率 $(W-\tau_{\max})/W$ と変化するため、ここで操作者の負担が増加する。

駆動負荷 W が操作中一定の条件下では、このアクチュエータの飽和は、負担率を規定値 γ から増加させるものの、一定値を維持するため操作性への影響は少ない。しかし、例えば慣性負

荷が含まれる場合は，操作中に W が変動するため，結果的に負担率も変動し，そのため装置の操作性や安定性が損なわれると考えられる．このことについては後章の実験においても確認される．

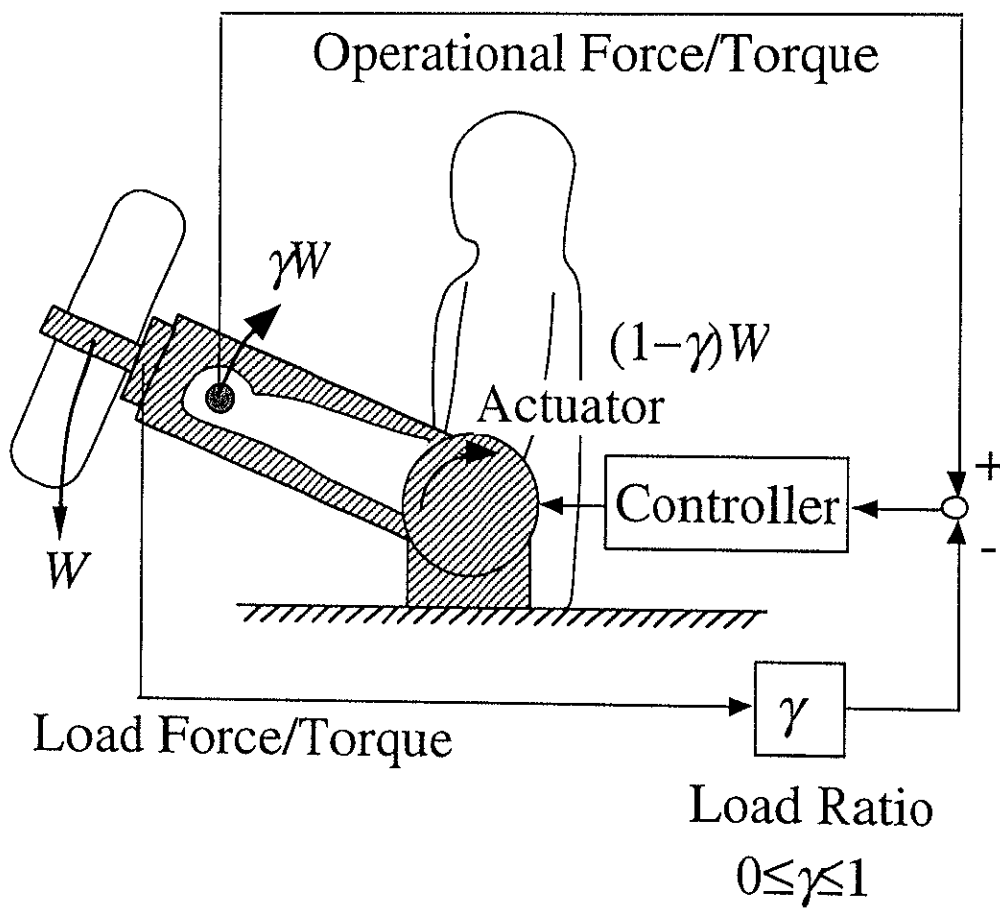


Fig.2-1 従来の一関節型パワーアシスト装置の概念図

2. 3 制御方法の提案

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を回避する一方法は、十分な最大トルクを有するアクチュエータを用いることである。しかし、利用できるアクチュエータの性能には限界がある。

一般に人がある負荷を搬送する場合、物体の重力に依存する負荷は、人の挙動に関わらず常に作用する。したがって、操作者の最大負荷保持能力を f_{hmax} とすれば、操作者がアシスト装置を介してそれを保持するために必要とされる操作力は、この値以下になるようにしなければならない。一方、操作者に作用する負荷の慣性力や摩擦力は操作する速度や加速度に依存して変動する。すなわち、負荷の操作挙動に依存して、その大きさが変動する性質を持つ。これは、アシスト効果を比較的強く抑えたとしても、有限な発生トルクのアクチュエータのもとでは、操作の仕方によってはトルク飽和が生じることを示唆している。しかし、見方を変えれば、この性質は、操作者に操作挙動を調節することで、意識的に負荷負担の調節が可能であることも示唆している。そこで、本研究では、有限な最大トルクのアクチュエータの能力を効率的に利用してパワーアシストを行う手法として、まず、負荷を重力負荷と動的負荷に分離し、それぞれの負荷を異なる比率でアシストする制御系を構成し、その後、その個別設定機能を利用して、操作挙動に関わらず操作者に常に負担をかける重力負荷のアシストを優先的に行う方法を提案する。

Fig.2-2 に提案する制御手法の概念図を示す。図に示すように、操作者及び負荷からアーム手先に加わる力を力センサによ

り計測し，それらの情報を基にアクチュエータのトルクを制御し，アームを駆動する．このシステムにおいて，操作者側のセンサと負荷側の力センサの計測値の比率，つまり操作者負担率を，ある一定値 γ となるようにアクチュエータを駆動するのが，従来の一般的なパワーアシスト装置である．これに対し，本研究では，負荷からアームに加わる力を重力成分と動的成分に分離し，それぞれ個別の比率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)， β ($0 \leq \beta \leq 1$) を設定し，アクチュエータを制御する．ここで，重力成分の負担率 α は，操作者の実用し得る筋力の最大値で，負荷が保持できることを条件として決定する．一方，動的成分の負担率 β は，想定される最大の重力負荷を，負担率 α で搬送する時に必要とされるアクチュエータのトルクと，アクチュエータが発生できる最大トルクとの差に応じて決定する．もし，この差が 0 となる場合は，アクチュエータに動的負荷をアシストする余裕はなく，このとき，負担率 β は 1 に設定する．

以下，問題を単純化して提案する手法の特徴を確認するために，1 自由度系を対称に議論を進める．

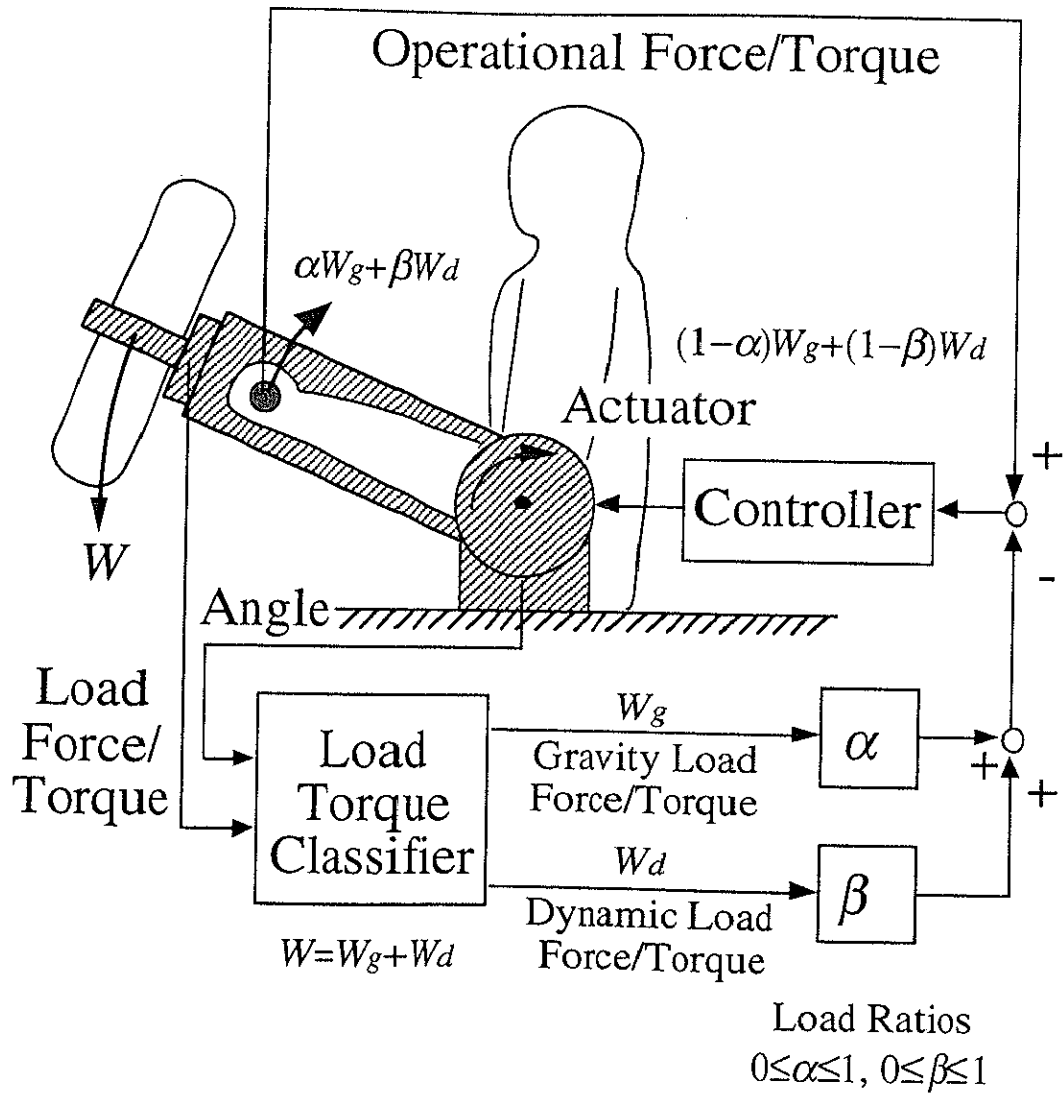


Fig.2-2 提案するパワーアシスト装置の概念図

2. 4 手法の定式化

Fig.2-3 に、一自由度のアームからなるパワーアシスト系を示す。アームは人の腕に寄り添うように動き、人の肘関節はアームの関節軸と一致するよう固定されているものとする。また、人とアームの手先は力センサを介して接合されているものとする。なお、負荷は自由空間内で操作され、その動力学特性は既知であるとする。このシステムを対象に、手法の簡易的な定式化を行う。まず、アーム関節軸回りの運動方程式を求める。アームを含む関節軸回りの負荷の慣性モーメントを I 、粘性係数を D 、重力によるトルクを $G(\theta)$ とし、アームの水平面からの変位角を θ 、アクチュエータ及び操作者が発生するトルクをそれぞれ τ 、 τ_h とすると、システムの運動方程式は、

$$\tau + \tau_h = I\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + G(\theta) \quad (2.1)$$

となる。従来手法では、上式の右辺で表される負荷の操作力の γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) 倍を操作者が負担するため、アクチュエータが出力するトルク τ は、

$$\tau = (1 - \gamma)(I\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + G(\theta)) \quad (2.2)$$

となる。一方、提案手法は、式(2.1)の右辺の負荷操作力 $I\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + G(\theta)$ を、重力成分 $G(\theta)$ と動的成分 $I\ddot{\theta} + D\dot{\theta}$ に分離し、これをそれぞれ異なる負担率 α 、 β を用いてアシストするため、アクチュエータが出力するトルク τ は、

$$\tau = (1 - \alpha)G(\theta) + (1 - \beta)(I\ddot{\theta} + D\dot{\theta}) \quad (2.3)$$

となる.

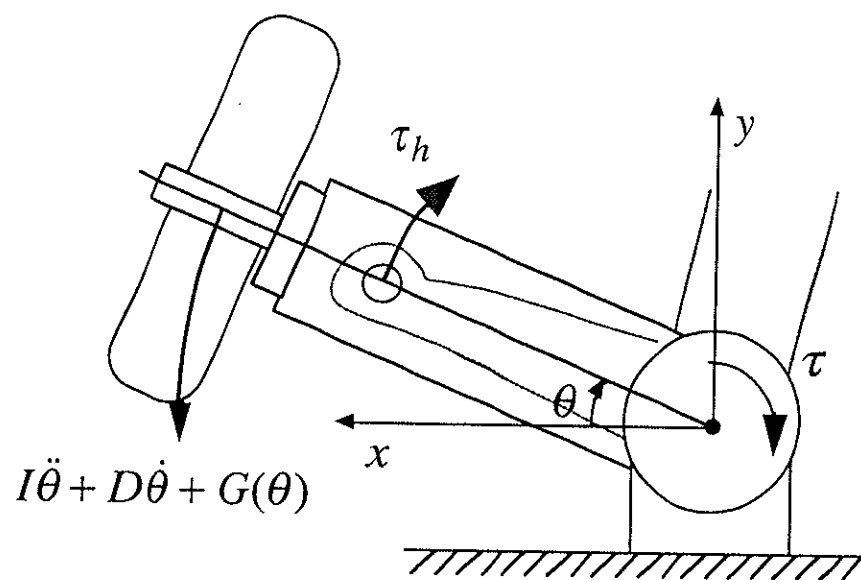


Fig.2-3 一自由度パワーアシスト系

2. 5 手法の特徴

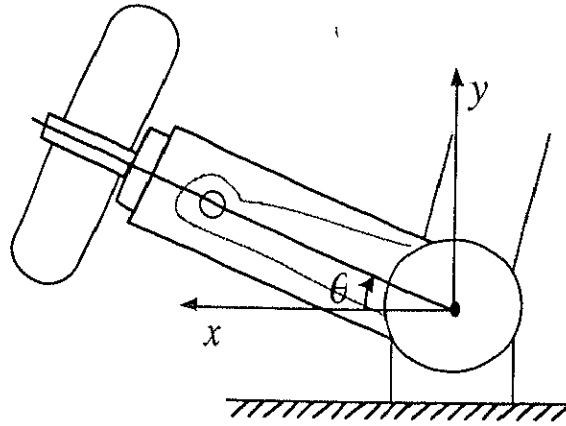
手法の特徴を述べるため、Fig.2-3 のパワーアシスト装置を用いて、負荷を Fig.2-4 に示すように軌道 $\theta=A\sin\omega t$ (A :微小) に沿って操作する場合を仮定する。このとき、重力成分は一定 ($G(\theta)\doteq G(0)$) とみなせるため、アクチュエータが出力するトルク τ は、従来法においては、式(2.2)より、

$$\tau=(1-\gamma)(-IA\omega^2\sin\omega t+G(0)) \quad (2.4)$$

となる。ただし、粘性の影響は小さい ($D\doteq 0$) と仮定し無視した。ここで、アクチュエータの最大トルク τ_{\max} に対し、操作者負担率 γ を小さく設定すると、アシストトルク τ が大きくなり、Fig.2-5(a)に示すように、アクチュエータにトルク飽和が生じる。この飽和を回避する一方法は、負担率 γ を小さくし、アシストトルク τ を減らすことであるが、この場合、Fig.2-5(b)に示すように、重力負荷に対するアシストトルク $(1-\gamma)G(0)$ も減少し、特に低速操作 ($\omega\rightarrow$ 小) において、アクチュエータのトルクが有効に活用されないことが分かる。それに対し、提案手法におけるアクチュエータの出力トルクは、式(2.3)より、

$$\tau=(1-\alpha)G(0)+(1-\beta)(-IA\omega^2\sin\omega t) \quad (2.5)$$

となる。ここで、後述するように適切に操作者負担率 α , β を決定すれば、Fig.2-5(c)に示すように、低速領域からアクチュエータのトルクを効率的に利用するシステムを構築することができる。以上が提案システムの特徴である。



$$\theta = A \sin \omega t \quad (A : \text{Small})$$

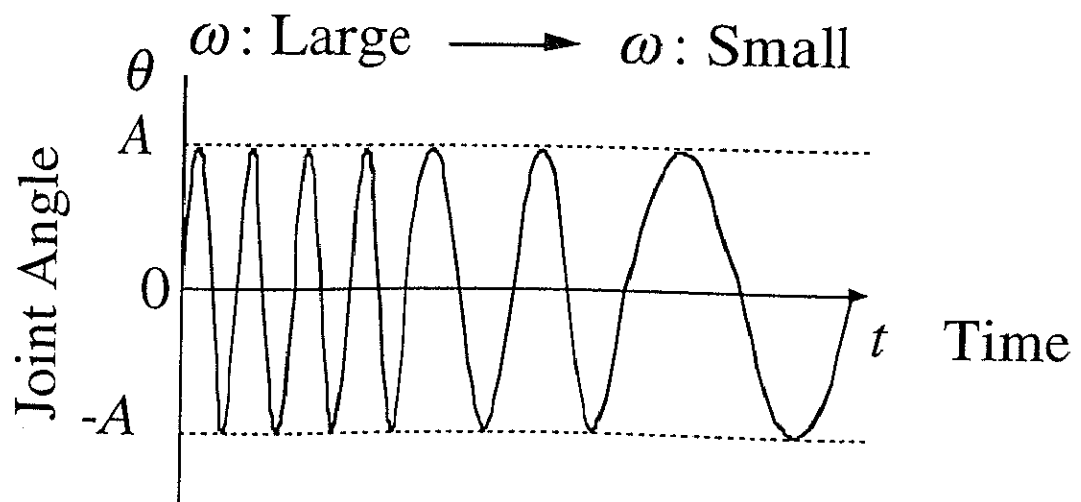


Fig.2-4 操作する軌道

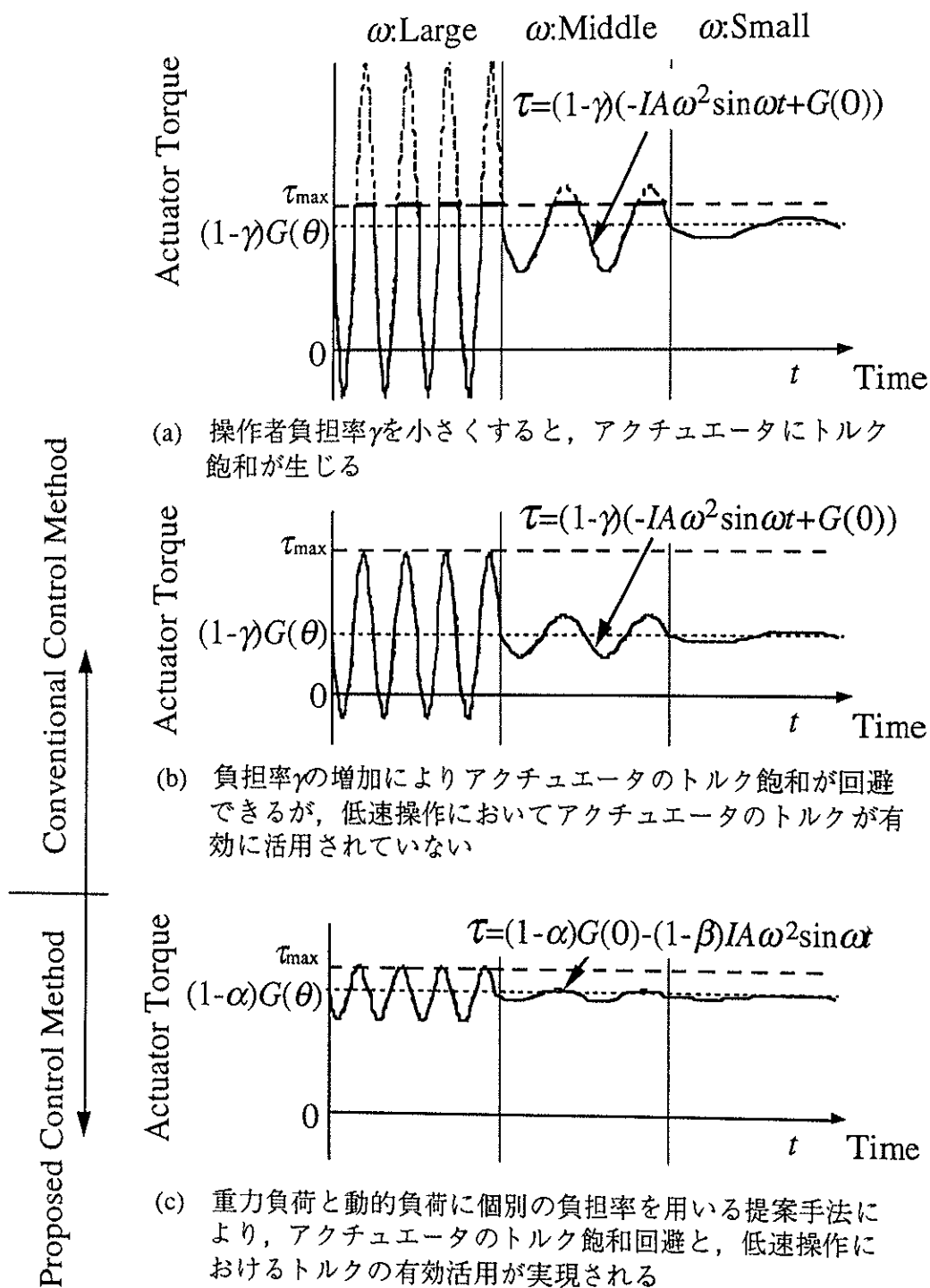


Fig.2-5 操作者負担率とアクチュエータのトルク飽和の関係

2. 6 操作者負担率の決定法

先に述べた，重力負荷と動的負荷を個別の比率でアシストする制御系において，トルク飽和を回避しながら，アクチュエータのトルクを有効に活用するためには，その操作者負担率 α ， β を適切な値に決定することが必要不可欠である．したがって，提案手法に基づいて，どのように操作者負担率 α ， β を決定するかについて考える．

重力負荷により生じるトルク $G(\theta)$ の最大値を G_{\max} とすると，操作者に加わる最大トルクは， αG_{\max} となる．したがって，操作者が肘関節に無理なく発生できる最大トルクを $\tau_{h\max}$ とすると，重力負荷の負担率 α は，以下の不等式を満たすように決定する．

$$\tau_{h\max} \geq \alpha G_{\max} \quad (2.6)$$

ただし， $0 \leq \alpha \leq 1$ である．ここで，これをアシストするに必要となるアクチュエータの最大トルク τ_{req} は，式(2.3)より，

$$\tau_{req} = (1 - \alpha) G_{\max} \quad (2.7)$$

となる．したがって，アクチュエータの最大トルクを τ_{\max} とすると，動的負荷のアシストに用いることができるトルクは， $\tau_{\max} - \tau_{req}$ となる．これより，負荷操作時の操作者肘関節の最大速度，加速度をそれぞれ $\dot{\theta}_{\max}$ ， $\ddot{\theta}_{\max}$ とすると，動的負荷の負担率 β は，以下の不等式を満たすように決定する．

$$\tau_{\max} - \tau_{req} \geq (1 - \beta) (I \ddot{\theta}_{\max} + D \dot{\theta}_{\max}) \quad (2.8)$$

なお，上記の $\dot{\theta}_{\max}$ ， $\ddot{\theta}_{\max}$ は，人の能力に依存するパラメータであり， β とも相関を持つため，それを考慮に入れて， β を決定することが必要となるが，それについては後章で詳しく述べる．

以上，式(2.6)および式(2.8)の不等式に基づき，トルク飽和を回避しながら，アクチュエータのトルクを効率的に利用する操作者負担率 α ， β が求められる．

2. 7 検証実験

本節では，一自由度パワーアシスト実験システムを試作し，動作中のアクチュエータのトルク飽和が操作性に及ぼす影響と，提案手法するアシスト法がアクチュエータのトルク飽和を回避しつつ，アシスト効率の高いシステムを構築することに有効であることを，負荷のトラッキング実験により確認した結果を述べる．

2. 7. 1 実験装置

実験用に試作したパワーアシスト装置を Fig.2-6 に示す．ダイレクトドライブ電動モータ（インランド製，最大トルク 4.1Nm）と，高分解能エンコーダ（キャノン製，分解能 324,000ppr）を関節に備えた一関節アームを，コンピュータ（NEC 製，PC-9821As）を用い，2ms 毎に制御することにより，パワーアシストを実現する．なお，本実験では，負荷とアームの動力学特性が全て既知であるため，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は用いない．また，図に示すように，本アームは，アーム自身の重力補償を機構的に行うために，関節を中心として対称形に作られている．さらに，より重い負荷を用いた実験が行えるように，重力負荷に対するアシストの一部を，カウンターウェイトを用いて行う機構も有している．操作者の上腕は，このアームに肘と手先の2点で固定され，アームは上腕と一体化して動くため，操作者がアーム手先のグリップに力を加えることで，パワーアシストが実現される．

実験には，2.5kg の負荷を用い，操作時におけるアシストトルクとアームの挙動を，50ms 毎にサンプリングする．また，カウンタウエイトは，操作負荷の半分の1.25kg とした．以上のシステムにおける関節軸周りの慣性は $I=0.73\text{kgm}^2$ であり，負荷の重力により生じるトルクは，関節軸から負荷重心までの距離が0.37m であることから， $G(\theta)=2.5\times 0.37\cos\theta[\text{Nm}]$ である．なお，本システムでは，アームの粘性力及び重力は，それらがシステムの挙動に及ぼす影響が小さいことから無視する ($D \cong 0$)．これをアシストするためにアクチュエータが出力するトルク τ は，エンコーダにより計測される関節角情報 θ と，上記の I , D , $G(\theta)$ を式(2.3)に代入することにより導出される．ただし，重力負荷の操作者負担率 α の決定に際し，カウンターウエイトを用いて構造的に負荷の半分の重力成分を既にアシストしているため，つまりアクチュエータが負担する力の比率に換算すると0.5 だけアシストを既に行っているため，アクチュエータが負担する重力負荷のアシストトルクは $((1-\alpha)-0.5)G(\theta)$ となる．また，式(2.3)に基づいてアクチュエータのトルク τ を計算するためには，角加速度 $\ddot{\theta}$ を求めることが必要となるが，これは，現在と一つ前に角度センサで計測された関節角 θ の差分を求め，サンプリング時間 (0.002s) で除算した後，ローパスフィルタ (時定数 0.02s) でノイズを除去することを，2回繰り返すことにより求めることができる．結果的に，重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β , センサで計測される角度情報 θ , 上記手順により算出される角加速度 $\ddot{\theta}$ から，アクチュエータが出力するトルクは，

$$\tau = ((1-\alpha)-0.5)G(\theta) + (1-\beta)I\ddot{\theta} \quad (2.9)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} G(\theta) &= 2.5 \times 0.37 \cos \theta \\ I &= 0.73 \end{aligned} \quad (2.10)$$

である。

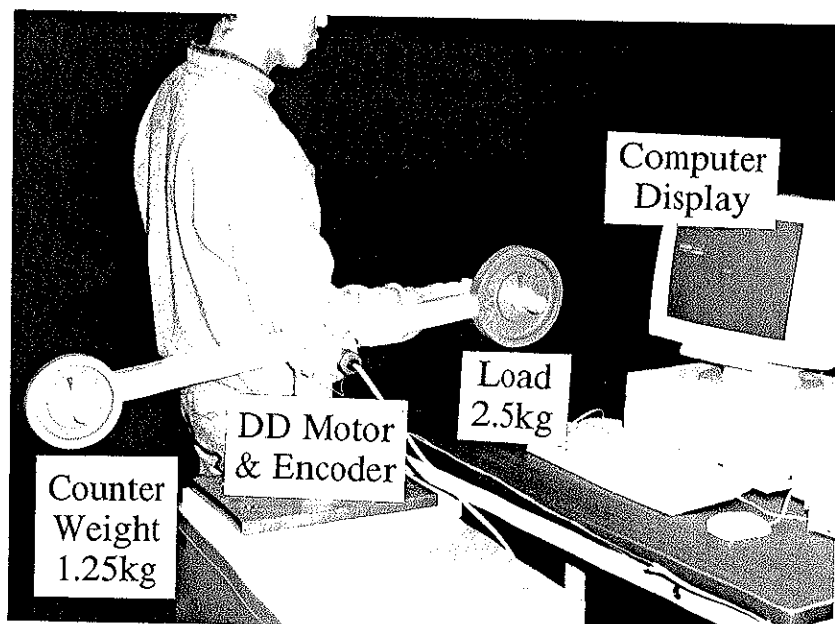


Fig.2-6 1自由度パワーアシスト
実験装置

2. 7. 2 実験方法

以上の実験装置を用い、いくつかの操作者負担率を設定し、与えられる指標に一致するように、操作者にアームを位置決め操作させ、その際のアームの角度変化、アシストトルクの変動を計測して、操作者負担率、アクチュエータのトルク飽和と操作性の関係を評価した。

位置決め作業指標として、コンピュータディスプレイ上に目標及び関節角度情報を表示した。すなわち、Fig.2-7 に示すように、常に中央に表示される括弧“[]”形と、現在のアーム関節角度と目標角度の差に比例して上下する“-”型を共に表示する。そして、操作者には、アームを操作してできるだけ早く“-”型を括弧“[]”内に位置決めするよう指示した。なお、この括弧“[]”形の上下方向の幅は関節角度で 0.02rad に相当し、この目標角内にアーム関節角度を一定時間 (1.0s) 保持すると、Fig.2-8 に示す予め用意したランダムな目標角度に従い、“-”型がステップ上に上ないし下に移動し、次の位置決めタスクが与えられる。これを、30回繰り返す。

以上の実験において、アクチュエータのトルク飽和が操作性に与える影響と、提案するパワーアシスト法の有効性を検証するため、操作者負担率の異なる実験条件を3種用意し、これらの実験結果を比較した。実験に用いた重力負荷と動的負荷の操作者負担率は、実験 (a) $\alpha=\beta=0.3$ 、実験 (b) $\alpha=\beta=0.5$ 、実験 (c) $\alpha=0.3, \beta=0.9$ である。ここで、実験 (a)、(b) は、重力負荷と動的負荷に等しい負担率を設定しているため、従来のパワーアシスト法に相当する。実験 (a) では、操作者が負荷をすばやく操作した場合、アクチュエータにトルク飽和が生

じるように，操作者の負担率を小さく設定した．一方，実験（b）は，トルク飽和が生じないように，負担率を大きく設定した．また，実験（c）は，重力負荷と動的負荷の負担率が異なることから，提案するパワーアシスト法に相当する．なお，負荷の重力成分については，十分にアシストを行うため操作者の負担率 α を実験（a）と同様に小さく設定した後，動的負荷の負担率 β については，アクチュエータのトルク飽和が生じないように大きく設定した．これらの操作者負担率 α ， β の値に基づいて，式(2.9)から，アクチュエータの目標トルクが求められる．なお，上述の実験（a），（b），（c）の条件で，それぞれ想定した飽和特性が得られるように，アクチュエータの最大トルクはソフトウェアで 2.5Nm に設定した．被験者は，本実験の主旨を理解した 20 才代の健常男子 4 名である．各被験者は練習を積み，十分操作に習熟した後，実験に臨んだ．

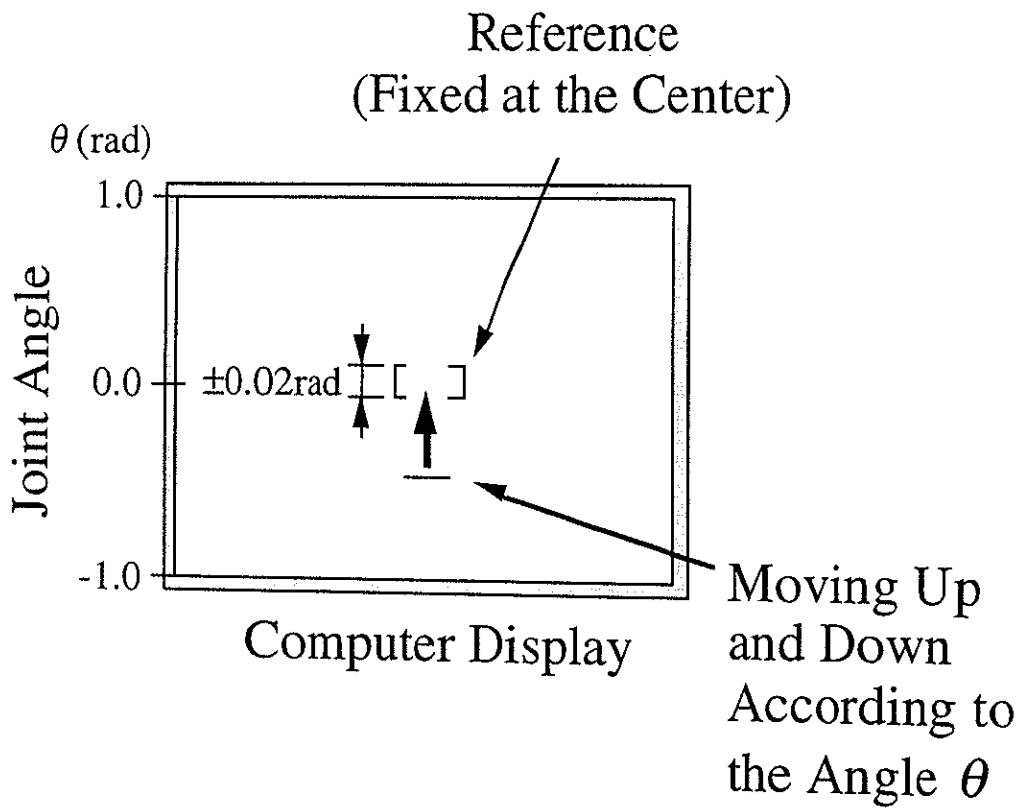


Fig.2-7 操作者に提示される目標角とアーム関節角

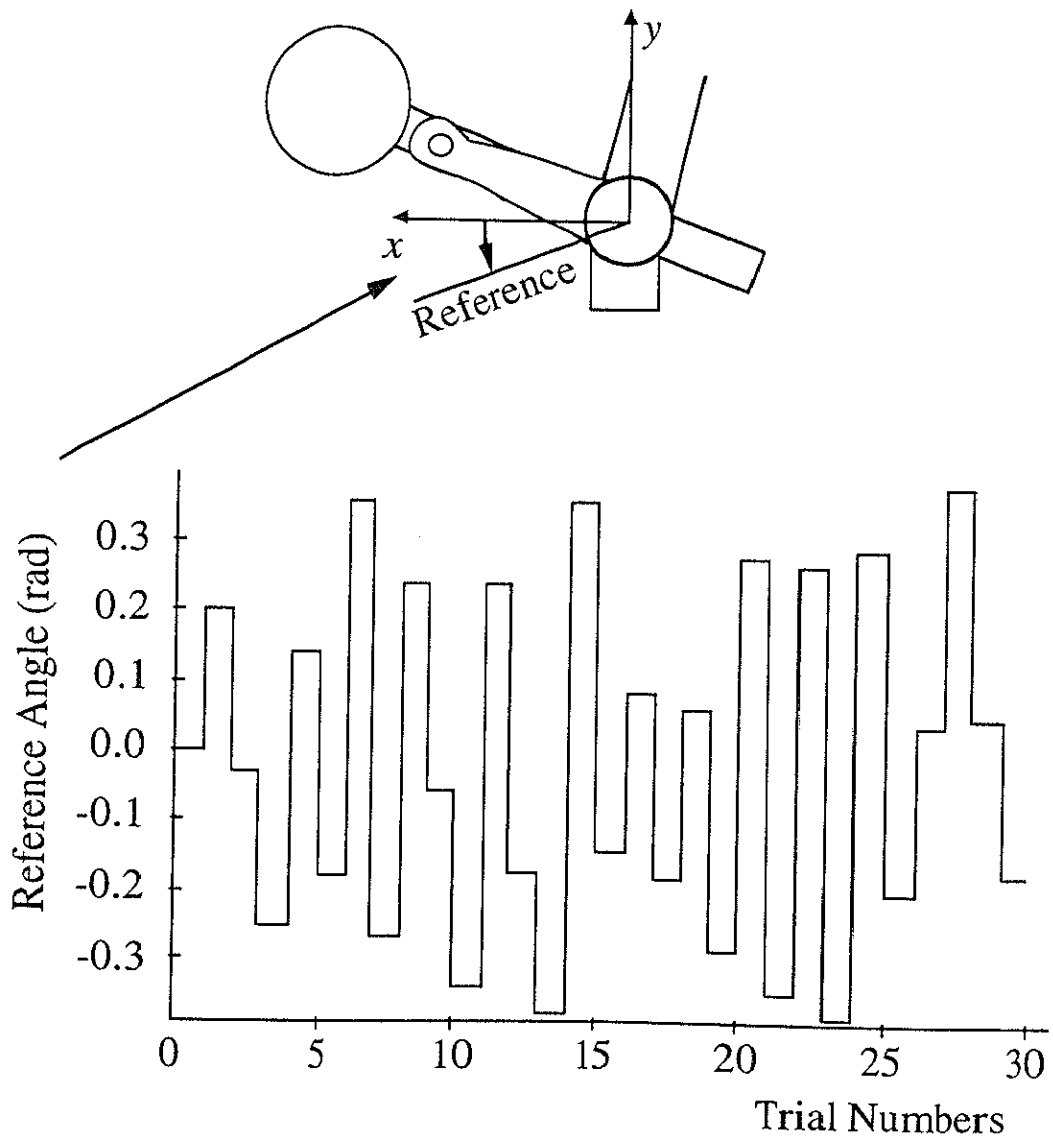


Fig.2-8 実験に用いた目標角

2. 7. 3 実験結果及び考察

Fig.2-9 に一被験者についての実験結果を示す。図は、アームの関節変位角とアクチュエータが出力したアシストトルクの時間履歴を表している。なお、他の被験者の結果についても以下のような傾向がみられる。

まず、実験 (a) の結果では、負荷の負担率 α , β が小さく、要求されるアクチュエータのトルクが大きくなるため、トルクが頻繁に飽和していることが認められる。一方、トルク飽和が生じた時の目標角近傍のアーム関節角の時間履歴に注目すると、その形状は振動的になっていることがわかる。また、各試行毎の応答波形も、トルク飽和の生じていない実験 (b), (c) では比較的規則的であるのに対し、実験 (a) は不規則な形状を示している。以上のような望ましくない挙動は、過大な加速度を伴う操作でアクチュエータのトルクが飽和したことによって、等価的にアシスト効果が減少し、その結果、不連続なアシスト効果の変化が生じて、操作者はそれに対応するため臨機応変かつ試行錯誤的な操作の調整を行ったため生じたと解釈される。臨機応変な対応を操作に要求するシステムは、相対的に操作性が劣ることは明らかである。したがって、以上の結果から、アクチュエータにトルク飽和が生じないように、操作者負担率を決定することの重要性が確認される。なお、実験 (a) の操作性が他よりも劣ることは、被験者全員の主観による評価からも確認された。

一方、実験 (b), (c) は事前に操作者負担率を調節したことにより、共にアクチュエータにトルク飽和の生じない負荷操作が可能となっている。その違いは、重力負荷、慣性力負荷の

操作者負担率が異なることであるが，結果的にアーム関節角の変化には大きな差はみられない．これは，実験に用いたアクチュエータのトルクの制限により，比較的軽い負荷（2.5kg）を用いねばならなかったため，両者の操作性に差異を生じさせるほどの負荷負担を操作者に与えることができなかつたことが原因と考える．しかし，Fig.2-9 のトルクの計測値からも明らかのように，実験（b）のアシストトルクは実験（c）よりも小さい（注：実験（b）の重力負荷の操作者負担率 α は 0.5 であるため，重力負荷はすべてカウンタウエイトでアシストされ，結果的に，アクチュエータのトルクは使用されず，0Nm を中心とするトルク変動となっている）．よって，実験（b）では，より多くの負荷を操作者の筋力が負担しなければならない．搬送負荷が増大した場合，この差は操作性に大きく影響することは明らかである．したがって，提案するパワーアシスト法は，アクチュエータのトルク飽和を回避しながら，大きなアシスト力を維持できるため，従来手法に比べ優位性を持つと考える．

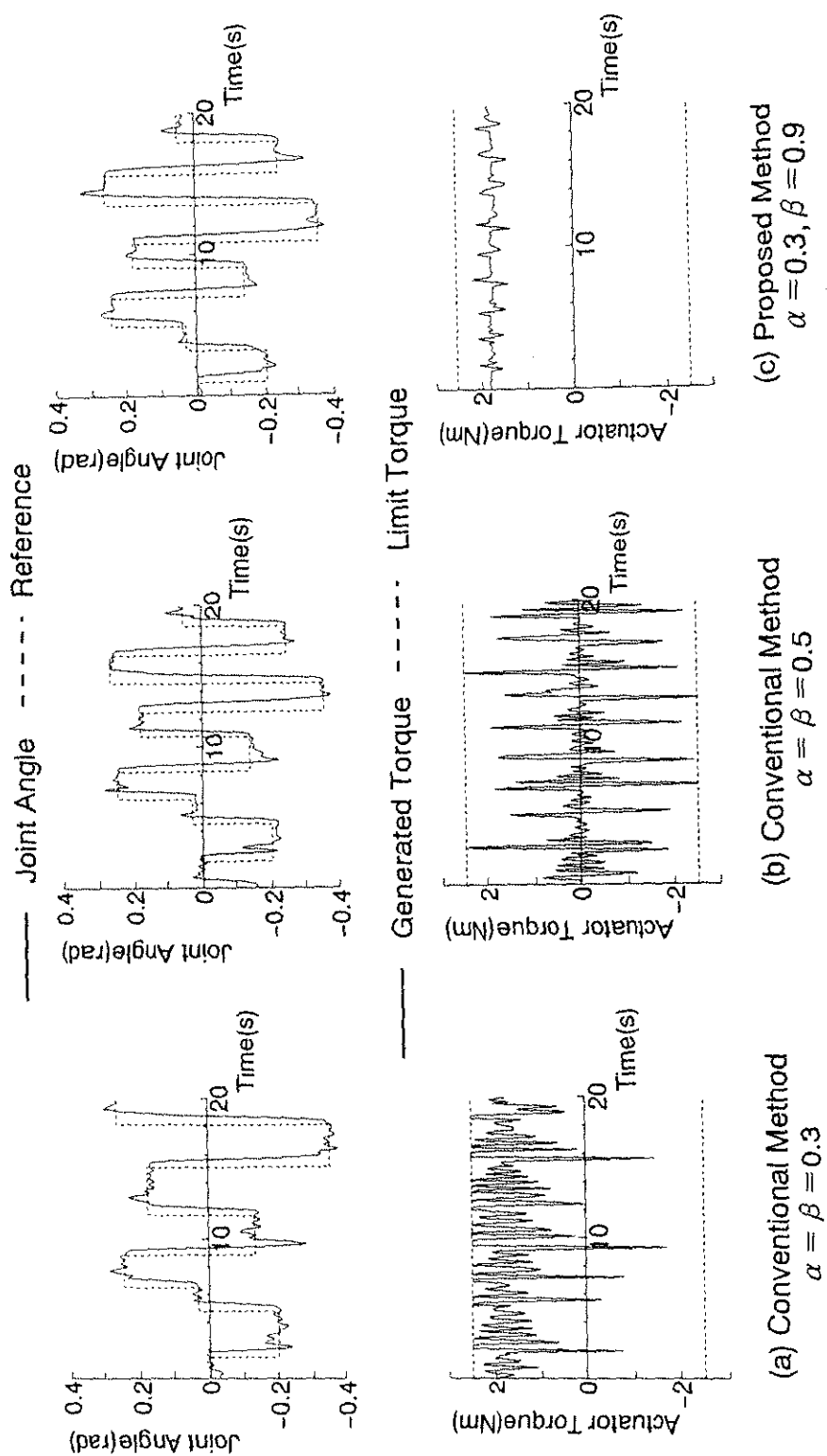


Fig.2-9 実験結果 (被験者 M.K)

2. 8 まとめ

本章では、まず、有限なトルクを生じるアクチュエータからなるパワーアシスト系において、装置の安定性、操作性を維持するためには、アクチュエータの最大トルク制限内で均一なアシスト効果を維持しつつ、動作させることの重要性を指摘した。その後、それを実現するための一手法として、負荷を重力負荷と動的負荷に分け、それぞれ個別に操作者の負担率を設定し、それに基づきアシストを行う手法を提案した。その具体的内容は、重力負荷の負担率を、操作者が負荷を保持できるように、操作者の最大力を考慮しながら設定した後、動的負荷の負担率を、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越えることがないように設定するという考えに基づく。これにより、トルク飽和を回避しながら、従来法よりアシスト効果の高いパワーアシストが実現できる。さらに、操作者の主観に基づいてこれらの負担率を決定することで、操作性の向上が見込まれるが、それについては第5章で検討する。本章では、まず問題を単純化するため、一自由度系を対象に提案手法を定式化し、特徴を論じると共に、実験によりその有効性を確認した。