

第 4 章 操作者負担率の決定法

4. 1 はじめに

前章では，多自由度系において，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の構成を示した．この制御系において，提案するパワーアシスト法に基づくアクチュエータのトルク飽和回避を行い，操作性の優れた装置を実現するためには，さらに重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α ， β を適切に設定することが必要である．よって，本章では，これらの比率 α ， β の決定法について検討する．

多自由度系におけるこれらの負担率 α ， β は，一自由度系と同じように，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される．このように決定される比率は，アクチュエータのトルク飽和を回避しながら，限られたトルクを有効に活用することを可能とする．ただし，多自由度パワーアシスト装置は，一自由度の場合と異なり，多関節アームを用いて装置が構成されるため，一般的に，操作者の挙動に対してアクチュエータが出力しなければならないトルク τ が，複雑かつ非線形に変化する．このようなトルク τ の複雑な変化は，アームの慣性，粘性，重力などの関節座標系に基づく動力学特性が，リンクどうしの力の干渉などによって元々非線形であるのに加え，式(3.7)に示したように，アーム手先におけるアシスト効果を一定とするために，各関節のアクチュエータが出力しなければならないアシストトルク τ が，アームの姿勢に応じて変化するために生じる．提案手法に基づいて，動的負荷の負担率 β を決定するためには，負担率 β に対してアクチュエータが出力しなければならないトルク τ の最大値を求めねばならないが，上記の

ようにトルク τ は操作者の挙動に対し複雑に変化するため、操作者が取り得る全ての挙動、つまり負荷操作時において想定される操作者の手先位置ベクトル \mathbf{X} 、速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ 、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ の全てに対して、このトルク τ を計算しなければならない。結果的に、これは非常に多くの計算コストを要求するため、動的負荷の負担率 β を決定する上で大きな障害となる。本章では、この問題に対する一対処法として、アシストトルク τ を慣性力、摩擦力などの速度に関する力、重力に関するトルクに分解した後、動的可操作性などの概念を用いて^{54),55)}、計算コストを減少させる方法について述べる。

また、一自由度システムでは特に論じなかったが、動的負荷をアシストする比率を決定するにあたり、想定される操作者の挙動の範囲、つまり操作者手先の最大速度、加速度をどのようにして見積もるかということも、負担率 β を決定する上で問題となる。特に問題なのは、負荷の操作者負担率 α 、 β の変更により、操作者に加わる負荷が変化するため、操作者の挙動が変化し、これにより速度、加速度の見積もりを再度やり直す必要が生じることである。つまり、負担率 α 、 β の変更毎に、見積もりをやり直さなくてはならないという問題が生じる。この問題に対しては、現実問題として様々な対処法があると考えられるが、本章では、その中の一つとして考えられる対処法を示す。

なお、本章では、さらにインピーダンス制御のパラメータである目標慣性行列と粘性摩擦係数行列を決定する指針についても検討する。そのため、これらの目標慣性、粘性摩擦係数行列が、先ほどから論じているアクチュエータの出力トルクにどのように影響を及ぼすかを述べた後、デカルト質量行列などの概念を用いた^{45),51)-53)}、これらの値の一決定法を示す。

さらに、操作者負担率 α , β の決定に際して、操作者の主観を加味するために、前章の多自由度パワーアシスト実験装置を用いた心理物理実験を行い、どのような負担率 α , β にするのが、操作者の主観という観点から望ましいのかを明確にする。

本章の構成は、まず始めに、重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β を決定する指針について論じ、それを定式化する。次に、操作者の挙動に対してアクチュエータが出力しなければならないトルクを、前章の多関節アーム及びパワーアシスト制御系を対象として定式化する。そして、求めた式に基づいて、アクチュエータがトルク飽和を生じるかどうかを判別する手法について論じる。さらに、この判別法を用いた負担率 α , β の決定法について述べ、本手法におけるトルク飽和有無の判別が有効であることを一例について検証するため、前章の実験条件でトルク飽和が生じるかどうかを確認する。また、負担率 α , β の決定法に操作者の主観を加味するための心理物理実験を行い、その実験結果について述べる。

4. 2 操作者負担率の決定指針

本節では、Fig.3-3 に示した提案するパワーアシスト法に従い、それぞれの操作者負担率 α 、 β を適切に決定する指針を明らかにする。また、インピーダンス制御のパラメータ M_d 、 B_d を適切に決定する指針も同時に明らかにする。なお、具体的な決定法についてはここでは論じず、後節において論じることとする。

4. 2. 1 重力負荷の操作者負担率の決定指針

提案するパワーアシスト法の一つの特徴は、負荷を重力成分と動的成分に分離し、重力成分の操作者負担率 α を、操作者の最大搬送負荷を考慮しながら優先的に決定することにある。以後、この負担率 α の決定法について述べる。ここで、この負担率 α の決定法を明らかにするためには、負荷によりアームに加わる力・トルクベクトル F_L を定式化することが必要となるため、まずこのベクトル F_L の定式化から行う。なお、負荷は Fig.3-7 に示したような、自由空間内で力・トルクセンサに固定された剛体であるとする。このような負荷がアームに加える力・トルクベクトル F_L は、ベース座標系に基づいて記述されたアーム手先位置 \mathbf{X} を中心とする 6×6 の負荷の慣性行列を $M_L(\mathbf{X})$ 、 6×1 の重力加速度ベクトルを $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g \ 0 \ 0 \ 0]^T$ とすると、

$$\mathbf{F}_L = -(\mathbf{M}_L(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{M}_L(\mathbf{X})\mathbf{g}) \quad (4.1)$$

と表される。上式より、この負荷における重力成分 \mathbf{F}_{Lg} と動的成分 \mathbf{F}_{Ld} は、

$$\mathbf{F}_{Lg} = -\mathbf{M}_L(\mathbf{X})\mathbf{g}, \quad \mathbf{F}_{Ld} = -\mathbf{M}_L(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} \quad (4.2)$$

と表される。したがって、この負荷の重力成分 $-\mathbf{M}_L(\mathbf{X})\mathbf{g}$ により操作者に加わる力は、式(3.7)と式(4.2)から、 $\alpha\mathbf{M}_L(\mathbf{X})\mathbf{g}$ となる。ここで、行列 $\mathbf{M}_L(\mathbf{X})$ は想定される負荷の内、最大負荷の慣性行列であるとし、その (i,j) 要素を m_{Lij} とすると、最大負荷の重力成分により操作者に加わる力は、

$$\alpha\mathbf{M}_L(\mathbf{X})\mathbf{g} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11}m_{L13}g \\ -\alpha_{22}m_{L23}g \\ \vdots \\ -\alpha_{66}m_{L63}g \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

と表すことができる。操作者がこの負荷を保持するためには、これ以上の力を常に発生することが条件となる。したがって、操作者が各方向について持続的に発生を許容できる力・トルクの最大値を $\mathbf{F}_{h\max} = [f_{h\max 1} \quad f_{h\max 2} \quad \cdots \quad f_{h\max 6}]^T$ とすると、重力負荷の操作者負担率 $\alpha = \text{diag}(\alpha_{11}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{66})$ は、

$$f_{h\max i} \geq |\alpha_{ii}m_{Li3}g| \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4.4)$$

を常に満たすよう決定する。ただし、 $0 \leq \alpha_{ii} \leq 1$ である。また、アーム手先の位置ベクトル \mathbf{X} に依存して、慣性行列 $\mathbf{M}_L(\mathbf{X})$ が変化するため、上式は作業領域内 ($\mathbf{X} \in \text{Working Space}$) で常に成り立つことが要求される。以上が、まず、負担率 α が満たすべき一つの条件である。

α が満たすべきもう一つの条件は、アクチュエータの出力トルクの最大値 τ_{max} に関するものである。この出力トルクの最大値 τ_{max} が十分に大きくないアクチュエータを用いて負荷をアシストする場合、たとえ動的成分に対するアシストを全く行わないとしても、重力成分に対するアシストだけでトルク飽和が生じると予想される。したがって、これを回避するためには、重力負荷に対するアシストトルクが、アクチュエータの出力トルクの最大値 τ_{max} に対して、過大とならないように α を決定しなければならない。それには、まず重力負荷をアシストするために必要なアクチュエータのトルクを求めなければならないが、これは後節で詳しく求めることとし、ここでは $\tau_{g,rv}(\mathbf{X}, \alpha)$ とする。ここで、ベクトル $\tau_{g,rv}(\mathbf{X}, \alpha)$ は、 $(i, 1)$ 要素を τ_{g,rv_i} とする 6×1 のトルクベクトルで、式からも分かるように、アーム手先の位置ベクトル \mathbf{X} 、負担率 α に依存する変数である。したがって、これらのベクトルを用いて、重力負荷の操作者負担率 α が満たすべき条件は、

$$\tau_{max_i} \geq |\tau_{g,rv_i}| \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4.5)$$

と表される。ただし、上記の不等式も、作業領域内で常に成り立つことが要求される。これが、 α の第二の条件である。ここで、式(4.4)は α の上限を規定し、式(4.5)は下限を規定するため、これにより α の適切な値が求められないといった場合がありえるが、これはアクチュエータの能力が、操作対象とする負荷を持ち上げるのに不十分ということであり、アクチュエータ及び操作対象負荷を見直すことが必要であることを示している。以上が重力負荷の操作者負担率 α の決定指針である。

4. 2. 2 動的負荷の操作者負担率の決定指針

提案するパワーアシスト法においては、先のように、優先的に α を決定した後、動的負荷のアシストに用いることのできるアクチュエータの最大出力トルクを求め、それに応じて動的負荷の操作者負担率 β を決定することにより、アクチュエータのトルク飽和を回避することを意図している。ここで、この動的負荷をアシストするために用いることのできるアクチュエータの最大トルクベクトルは、先の重力負荷をアシストするトルクベクトル $\tau_{grv}(\mathbf{X}, \alpha)$ を用いて、そのベクトルの成分を $\tau_{\max i} - |\tau_{grvi}|$ と表すことができる。したがって、アクチュエータのトルク飽和を未然に防ぐためには、動的負荷をアシストするトルクベクトルが、このトルクベクトルを超えないように、負担率 β を決定すればよい。ここで、この動的負荷に対するアシストトルクベクトルは後節で詳しく求めることとし、ここでは単に $\tau_{dyn}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \beta, \mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d)$ とする。このベクトル $\tau_{dyn}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \beta, \mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d)$ は、 $(i, 1)$ 要素を τ_{dyni} とする 6×1 のトルクベクトルで、式からも分かるように、アーム手先の位置ベクトル \mathbf{X} 、速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ 、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ 、動的負荷の負担率 β 、アーム手先の目標慣性行列 \mathbf{M}_d 、粘性摩擦係数行列 \mathbf{B}_d に依存して変化する変数である。これらのパラメータによりベクトル $\tau_{dyn}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \beta, \mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d)$ は、複雑かつ非線形に変化する。これが、動的負荷の負担率 β を決定する際に、計算コストの肥大化という問題を引き起こすが、これについての対処法は後に示すこととする。これらのベクトルを用いて、アクチュエータのトルク飽和を回避するために、動的負荷の負担率 β が満たすべき条件は、

$$\tau_{\max i} - |\tau_{grvi}| \geq |\tau_{dyni}| \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (4.6)$$

となる。ただし、 $0 \leq \beta_i \leq 1$ である。また、上式は作業領域 ($\mathbf{X} \in \text{Working Space}$)、速度領域 ($\|\dot{\mathbf{X}}_p\| < \dot{x}_{hp \max}$, $\|\dot{\mathbf{X}}_r\| < \dot{x}_{hr \max}$)、加速度領域 ($\|\ddot{\mathbf{X}}_p\| < \ddot{x}_{hp \max}$, $\|\ddot{\mathbf{X}}_r\| < \ddot{x}_{hr \max}$) で常に成り立つことが要求される。ここで、 $\dot{\mathbf{X}}_p$, $\dot{\mathbf{X}}_r$ はそれぞれ、速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ の並進成分と回転成分を表す 3×1 のベクトルで、 $\ddot{\mathbf{X}}_p$, $\ddot{\mathbf{X}}_r$ はそれぞれ、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ の並進成分と回転成分を表す 3×1 のベクトルである。なお、これらのパラメータ \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$, $\ddot{\mathbf{X}}$ で形成される領域で、式(4.6)が成り立つかどうかを各点において判別しなければならないことが、先のベクトル τ_{dyn} がパラメータ \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$, $\ddot{\mathbf{X}}$ に対して複雑に変化することと併せて、計算コストを増加させる一因となる。また、上で示した $\dot{x}_{hp \max}$, $\dot{x}_{hr \max}$, $\ddot{x}_{hp \max}$, $\ddot{x}_{hr \max}$ は、それぞれ負荷操作時の操作者の手先最大速度、角速度、加速度、角加速度を表しているが、この値は負担率 α , β の変更に伴い変化するため、これが問題をさらに複雑にしている。以上、詳しい計算については後節に譲るが、このような指標に基づいて操作者負担率 α , β の値は決定される。

4. 2. 3 目標慣性行列、粘性摩擦係数行列の決定指針

動的負荷をアシストするために必要なトルクベクトル $\tau_{dyn}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \beta, \mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d)$ の値は、前記したように、動的負荷の操作者負担率 β によって変動するが、他に、アーム手先の目標慣性行

列 \mathbf{M}_d や粘性摩擦係数行列 \mathbf{B}_d によっても変動する。これらの行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d は、元来非線形であるアーム手先の動力学特性を、操作者が加える力に対して、線形化する上で用いられる目標インピーダンスであるが、その値を小さく設定することにより、等価的にアームの操作力を減少させることができるため、アームのアシストに関するパラメータとも解釈することができる。ただし、本研究では、負担率 α , β をアシストに関するパラメータとし、行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d を線形化に関するパラメータと明確に定義するため、これらの行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の値を決定するにあたり、アーム手先が本来有するインピーダンスをできるだけ変化させることなく、アーム手先の非線形な挙動を抑制するように値を決定する。具体的には、まず、アーム手先における慣性、摩擦などの動力学特性をベース座標系に基づいて求め、この動力学特性の線形成分を抽出し、その線形成分に基づいて、これらの値に近い値を行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d に設定する。これが行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の決定指針であるが、具体的にどのようにして、これらの行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d を決定するかという議論については次節において行う。

4. 3 目標慣性行列，粘性摩擦係数行列の決定法

前節において，目標慣性行列 \mathbf{M}_d 及び粘性摩擦係数行列 \mathbf{B}_d の決定指針について示したが，本節では，この指針を基に，行列 \mathbf{M}_d ， \mathbf{B}_d を具体的にどのように決定するかについて論じる．それにはまず，ベース座標系に基づく，アーム手先の動力学特性を定式化することが必要となるため，これについて述べる．

4. 3. 1 アーム手先の動力学特性

関節座標系に基づくアームの動力学特性については，既に式(3.4)に示したが，目標慣性，粘性摩擦係数行列 \mathbf{M}_d ， \mathbf{B}_d を決定するためには，さらにベース座標系に基づくアーム手先の動力学特性を求めることが必要となるため，これを定式化する．まず，関節座標系に基づくアームの動力学特性を，式(3.4)で示したように $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ とし，ベース座標系に基づくアーム手先に加わる 6×1 の力・トルクベクトルを \mathbf{F} とすると，その関係は，

$$\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \quad (4.7)$$

と表すことができる．次に，力・トルクベクトル \mathbf{F} に関する等式とするため，式(3.10)を変形した式

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})(\ddot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (4.8)$$

と式(3.2)を用いて，式(4.7)を

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}_x(\boldsymbol{\theta}) \quad (4.9)$$

と変形する。ただし、 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ 、 $\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ 、 $\mathbf{G}_x(\boldsymbol{\theta})$ はそれぞれ、ベース座標系に基づくアーム手先の慣性行列、摩擦力などの速度に関する力・トルクベクトル、重力による力・トルクベクトルを表しており、

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\theta})\left(\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}\right) \\ \mathbf{G}_x(\boldsymbol{\theta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

である。なお、この $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ は、デカルト質量行列と呼ばれ、アームの操作性を評価する指標として用いられることがある⁵¹⁾⁵²⁾。以上のように、式(4.10)からアーム手先が本来有している動力学特性を表す行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ 、及びベクトル $\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ が得られる。

4. 3. 2 線形成分の抽出

次に、アーム手先の動力学特性を表す式(4.9)の慣性項 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})\ddot{\mathbf{X}}$ 、及び摩擦力などの速度に関する項 $\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ から、アーム手先の速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ 、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ に対して線形である成分を抽出する。

式から分かるように、慣性力ベクトル $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})\ddot{\mathbf{X}}$ の値は、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ に対して線形である。したがって、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ に対する線形成分の係数は $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ となる。一方、摩擦力などの力・トルクベクトル $\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ の値は、式(4.10)から察せられ

るように，速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ に対して非線形である．ここで，このベクトル $\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ について考えると，ベクトル $\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ は，粘性摩擦力，クーロン摩擦力，遠心力，コリオリ力から構成されるベクトルである．これらの力の内，クーロン力，遠心力，コリオリ力については，アーム手先の速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ に対して明らかに非線形であるため，アクチュエータのトルクを用いてできるだけ補償する．一方，粘性摩擦力はアームの角速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ に対して線形であり，式(3.2)により角速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ は速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ に線形変換できるため，結果的に，粘性摩擦力は速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ に対して線形となる．したがって，関節座標系に基づくアームの粘性摩擦係数行列を $\mathbf{B}(\boldsymbol{\theta})$ とすると，ベース座標系に基づくアーム手先の粘性摩擦係数行列 $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ は，

$$\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{B}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \quad (4.11)$$

となり，この行列 $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ が，速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ に対する線形成分の係数となる．

4. 3. 3 目標慣性行列，粘性摩擦係数行列の決定法

式(4.10)，式(4.11)に示した，アームの手先における慣性行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ ，粘性摩擦係数行列 $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ に基づいて，インピーダンス制御に用いる目標慣性行列 \mathbf{M}_d ，粘性摩擦係数行列 \mathbf{B}_d を決定する．ただし，行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ ， $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ はアームの姿勢 $\boldsymbol{\theta}$ により値が変化するため，行列 \mathbf{M}_d ， \mathbf{B}_d を決定するために，作業領域内における行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ ， $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ のどの値を参照するのかをまず定める．ここ

で、参照する値の候補としては、例えば作業領域内における行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$, $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ の平均値などが考えられるが、本研究では、アームの手先における操作力をできるだけ小さくすることが望ましいという判断から、作業領域内における行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$, $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ の最小値を参照する。つまり、行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$, $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ の (i,j) 成分を、それぞれ m_{xij} , b_{xij} とし、作業領域内におけるこれらの成分の最小値を $m_{x\min ij}$, $b_{x\min ij}$ とすると、

$$m_{x\min ij} = \min A_{mxij}, A_{mxij} = \{m_{xij} \mid \mathbf{X} \in \text{Working Space}\} \\ (i=1,2,\dots,6, j=1,2,\dots,6)$$

$$b_{x\min ij} = \min A_{bxij}, A_{bxij} = \{b_{xij} \mid \mathbf{X} \in \text{Working Space}\} \\ (i=1,2,\dots,6, j=1,2,\dots,6) \quad (4.12)$$

により求められる $m_{x\min ij}$, $b_{x\min ij}$ を参照することとする。ここで、求めた値 $m_{x\min ii}$, $b_{x\min ii}$ をインピーダンス制御に用いる行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の (i,j) 成分に設定することにより、作業領域内におけるアームの手先の最小の慣性、粘性摩擦で、操作者はアーム手先を操作できるようになる。

ただし、行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の非対角成分に 0 以外の値が設定されると、操作者が力を加える方向とアーム手先が加速する方向の間に不一致が生じるため、さらに行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の非対角成分を 0 とし、行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d を対角行列とする。また、アーム手先の操作に必要な力が各方向に異なることが、操作者に違和感として感じられる恐れがあるため、各方向の慣性、粘性の値が極端に異なる場合、つまり行列 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$, $\mathbf{B}_x(\boldsymbol{\theta})$ の対角成分から求めた $m_{x\min ii}$, $b_{x\min ii}$ の各値が極端に異なる場合は、これらの値の平均値を、行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の対角成分に設定する。ただし、これは並進力成分とトルク成分で個別に処理する。これを式で

表すと、まず、行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の非対角成分には 0 を設定し、 (i, i) の対角成分 m_{dii}, b_{dii} には、

$$\begin{aligned}
 m_{d11} = m_{d22} = m_{d33} &= (m_{x \min 11} + m_{x \min 22} + m_{x \min 33})/3 \\
 m_{d44} = m_{d55} = m_{d66} &= (m_{x \min 44} + m_{x \min 55} + m_{x \min 66})/3 \\
 b_{d11} = b_{d22} = b_{d33} &= (b_{x \min 11} + b_{x \min 22} + b_{x \min 33})/3 \\
 b_{d44} = b_{d55} = b_{d66} &= (b_{x \min 44} + b_{x \min 55} + b_{x \min 66})/3
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

を設定する。なお、以上述べた行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d を決定する手順を Fig.4-1 に示す。

以上、インピーダンス制御に用いる、目標慣性行列 \mathbf{M}_d , 粘性摩擦係数行列 \mathbf{B}_d の決定法を示した。

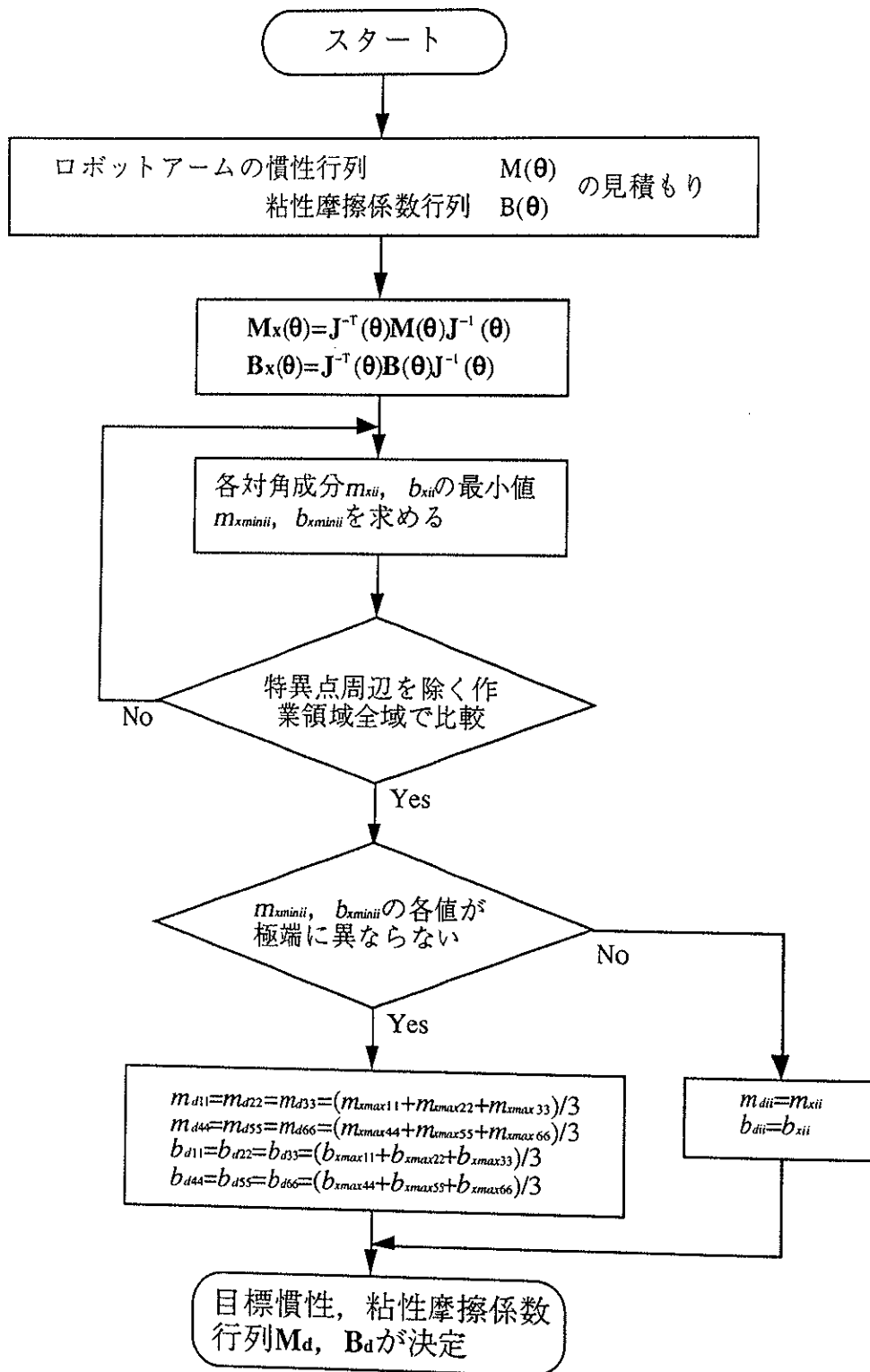


Fig.4-1 目標慣性行列 M_d , 目標粘性係数行列 B_d の決定手順

4. 4 アクチュエータのトルク飽和の有無の判別法

式(4.5)及び式(4.6)で表される，アクチュエータのトルク飽和を回避するための条件を満たすよう負担率 α , β を決定するためには，まず，試行錯誤的に選択される負担率 α , β に対して，重力負荷のアシストトルクベクトル τ_{grv} と，動的負荷のアシストトルクベクトル τ_{dyn} を求め，これらのベクトルが式(4.5)及び式(4.6)を満たすかどうか，つまりアクチュエータのトルク飽和が生じるかどうかを判別することが必要となる．本節ではこれらのトルク飽和有無の判別法について論じる．これらの判別における問題点としては，先にも述べたが，動的負荷に対するアクチュエータの出力トルクベクトル τ_{dyn} が，各パラメータにより複雑かつ非線形に変化し，さらに操作者の取り得る挙動が多彩であるため，トルク飽和の有無の判別に多大な計算コストを費やさねばならないことがある．この問題に対する対処法については，本節の中で論じる．まず，重力負荷に対するアシストトルク τ_{grv} と，動的負荷に対するアシストトルク τ_{dyn} を定式化することから始める．

4. 4. 1 操作者の挙動とアクチュエータの出力トルク

重力負荷及び動的負荷をアシストするために必要なアクチュエータのトルクベクトル τ_{grv} , τ_{dyn} を定式化する．ここで，これらのトルクベクトル τ_{grv} , τ_{dyn} は，アクチュエータが出力すべき

トルクベクトル τ の重力成分及び動的成分に相当するため、まず、トルクベクトル τ を定式化し、後にこれらのベクトル τ_{grv} , τ_{dyn} を定式化することとする。

まず、式(3.7)で示した制御系の規範が、Fig.3-3 で示した制御系で実現されているとすると、式(3.7), 及び式(3.4), 式(3.6), 式(4.2)より、アクチュエータが出力するトルクベクトル τ は、

$$\tau = J^T(\theta) \left\{ (I_6 - \alpha) M_L(X)g + (I_6 - \beta) M_L(\theta)\ddot{X} \right. \\ \left. + M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) - \beta(M_d\ddot{X} + B_d\dot{X}) \right\} \quad (4.14)$$

と求められる。ただし、行列 I_6 は 6×6 の単位行列である。さらに、式(3.2)と式(4.8)を、式(4.14)に代入することにより、トルクベクトル τ は、

$$\tau = M_a(\theta, X, \beta, M_d)\ddot{X} + V_a(\theta, \dot{\theta}, \beta, B_d) + G_a(\theta, X, \alpha) \quad (4.15)$$

と求められる。ただし、行列 $M_a(\theta, X, \beta, M_d)$, 及びベクトル $V_a(\theta, \dot{\theta}, \beta, B_d)$, $G_a(\theta, X, \alpha)$ はそれぞれ、アクチュエータによりアシストされる慣性行列、及び摩擦などの速度に関する力、重力を表しており、

$$M_a(\theta, X, \beta, M_d) = J^T(\theta)(I_6 - \beta)M_L(X) + M(\theta)J^{-1}(\theta) - J^T(\theta)\beta M_d \\ V_a(\theta, \dot{\theta}, \beta, B_d) = -M(\theta)J^{-1}(\theta)J(\theta)\dot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) - J^T(\theta)\beta B_d J(\theta)\dot{\theta} \\ G_a(\theta, X, \alpha) = J^T(\theta)(I_6 - \alpha)M_L(X)g + G(\theta) \quad (4.16)$$

である。ここで、式(4.15)は、ベクトル θ , X , $\dot{\theta}$, \ddot{X} をパラメータとして、アクチュエータが出力しなくてはならないトルクベクトル τ を表している。トルクベクトル τ_{grv} , τ_{dyn} を定式化するためにはさらに、アーム手先の位置ベクトル X , 速度ベク

トルク $\dot{\mathbf{X}}$, 加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ をパラメータとするトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ を求めることが必要となるが, アーム手先の位置ベクトル \mathbf{X} と速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ は, それぞれ逆運動学及び式(3.2)により, 容易にアームの関節変位角ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ と角速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ に変換できるため, このような変換を介することにより求めることができる. つまり, アームの逆運動学を表す関数を,

$$\boldsymbol{\theta} = f_{ik}(\mathbf{X}) \quad (4.17)$$

と定義すると, 上式と式(3.2), 式(4.15)から, 重力負荷と動的負荷をアシストするために必要なトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{grv}$, $\boldsymbol{\tau}_{dyn}$ は,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{grv}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\alpha}) &= \mathbf{G}_a(f_{ik}(\mathbf{X}), \mathbf{X}, \boldsymbol{\alpha}) \\ \boldsymbol{\tau}_{dyn}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d) &= \mathbf{M}_a(f_{ik}(\mathbf{X}), \mathbf{X}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{M}_d) \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{V}_a(f_{ik}(\mathbf{X}), \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \dot{\mathbf{X}}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{B}_d) \end{aligned} \quad (4.18)$$

と定式化される.

4. 4. 2 重力負荷の操作者負担率に関する判別法

式(4.18)で得られる重力負荷のアシストトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{grv}$ に基づいて, 式(4.5)により, アクチュエータのトルク飽和の有無を判別する. 一般的に, このベクトル $\boldsymbol{\tau}_{grv}$ は, 式(4.16)と式(4.18)から分かるように, アーム手先の位置ベクトル \mathbf{X} に対して複雑かつ非線形に変化する. したがって, トルク飽和の有無を判別するためには, ベクトル \mathbf{X} が取り得る値, つまり作業領域内 ($\mathbf{X} \in \text{Working Space}$) の全ての点において, このトルクベ

ベクトル τ_{grv} を求め、アクチュエータが出力可能な最大トルクベクトル τ_{max} との比較を行うことが必要となる。実際には、ベクトル \mathbf{X} が取り得る全ての値に対してベクトル τ_{grv} を求めることは不可能であるため、目標慣性、粘性摩擦係数行列を求めた場合と同じく、ベクトル \mathbf{X} の領域を十分に細かく分割し、各点においてベクトル τ_{grv} を求め、式(4.5)が成り立つかどうかの判別を繰り返す。これが作業領域内の全ての点で成り立つ場合、重力負荷の操作者負担率 α は、式(4.5)を満たす適切な値であると判別される。

4. 4. 3 動的負荷の操作者負担率に関する判別法

次に、式(4.18)で得られる動的負荷のアシストトルクベクトル τ_{dyn} に基づいて、式(4.6)より、アクチュエータのトルク飽和の有無を判別する。これを行うにはまず、先ほど求めたベクトル τ_{grv} から、作業領域内の各点 \mathbf{X} において、動的負荷のアシストに用いることのできるアクチュエータの最大トルクベクトル $\tau_{res}(\mathbf{X}) = [\tau_{res1} \ \tau_{res2} \ \cdots \ \tau_{res6}]^T$ を求める。

$$\tau_{resi} = \tau_{maxi} - |\tau_{grvi}| \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (4.19)$$

なお、上式のトルクベクトル τ_{res} は、式(4.6)の左辺に相当するベクトルである。以後、この動的負荷のアシストに用いることのできる残存トルクベクトル τ_{res} の値に基づき、動的負荷のアシストトルクベクトル τ_{dyn} の値がこれを超えるかどうかで、式

(4.18)が成り立つかどうかを判別する.

これを判別する最も簡単な方法としては, 先ほどの判別法をそのまま拡張し, アーム手先の位置ベクトル \mathbf{X} , 速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$, 加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ で形成される領域 ($\mathbf{X} \in \text{Working Space}$, $\|\dot{\mathbf{X}}_p\| < \dot{x}_{hp \max}$, $\|\dot{\mathbf{X}}_r\| < \dot{x}_{hr \max}$, $\|\ddot{\mathbf{X}}_p\| < \ddot{x}_{hp \max}$, $\|\ddot{\mathbf{X}}_r\| < \ddot{x}_{hr \max}$) の全ての点で, 式(4.6)が成り立つかどうかを判別する方法が考えられる. しかし, ベクトル \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$, $\ddot{\mathbf{X}}$ はそれぞれ6次元からなり, 判別を行う領域は合わせて18次元となるため, 粗雑に分割したとしても計算点は膨大な数になり, 現実的な問題として, 計算時間が非常に長くなる. 本研究ではこの問題を踏まえ, 計算コストが上記のように膨大にならない判別法を, 以下において提案する.

トルクベクトル τ_{dyn} は, 式(4.18)に示したように, 慣性力に関するアシストトルクベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$ と, 摩擦力などの速度に関する力のアシストトルクベクトル \mathbf{V}_a の和で表される. このベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$ 及びベクトル \mathbf{V}_a は, それぞれ速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$, 加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ に依存しない変数である. したがって, 作業領域内の各点 \mathbf{X} におけるこれらのベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$, \mathbf{V}_a の最大値を求めるには, それぞれ6次元の領域内で変化する加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$, 速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ の各値に対するこれらのベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$, \mathbf{V}_a の各要素の最大値を求めればよい. その後, これらのベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$, \mathbf{V}_a の最大値の和算することで, トルクベクトル τ_{dyn} の最大値を求めることができる. このように, トルクベクトル τ_{dyn} をベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$, \mathbf{V}_a に分割し計算することにより, これを求めるために計算しなければならない領域の次元が18次元から12次元に減少し, 計算コストをある程度減少させることができる. 本研究では, さらにこの計算コストを減少させるため, 作業領域

内の各点 \mathbf{X} におけるベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$, \mathbf{V}_a の最大値を, 以下に示すような手順を用いて求める.

(a) 速度に関する力のアシストトルク

まず, この2つのトルクベクトル $\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}}$, \mathbf{V}_a の内, 摩擦力などの速度に関する力をアシストするトルクベクトル \mathbf{V}_a の最大値から求める. ここで, 作業領域内の各点 \mathbf{X} におけるベクトル \mathbf{V}_a の最大値を示すベクトルを $\mathbf{V}_{a \max} = [v_{a \max 1} \ v_{a \max 2} \ \dots \ v_{a \max 6}]^T$ とすると, ベクトル $\mathbf{V}_a = [v_{a1} \ v_{a2} \ \dots \ v_{a6}]^T$ を用いて, この $\mathbf{V}_{a \max}$ は,

$$v_{a \max i} = \max |A_{va}|, A_{va} = \left\{ v_{ai} \left\| \dot{\mathbf{X}}_p \right\| < \dot{x}_{hp \max}, \left\| \dot{\mathbf{X}}_r \right\| < \dot{x}_{hr \max} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4.20)$$

と表すことができる. 先にも述べたように, ベクトル $\mathbf{V}_{a \max}$ を求める最も簡単な方法は, アーム手先の速度が取り得る全てのベクトル ($\left\| \dot{\mathbf{X}}_p \right\| < \dot{x}_{hp \max}$, $\left\| \dot{\mathbf{X}}_r \right\| < \dot{x}_{hr \max}$) で, トルクベクトル \mathbf{V}_a を計算し, その最大値を求める方法である. しかし, この方法は, ベクトル \mathbf{X} も含めると, 結果的に12次元で構成される空間内の全ての点について計算を行わなければならないため, 計算コストがかかりすぎるのが問題となる.

トルクベクトル \mathbf{V}_a によりアシストされる力の成分には, 粘性摩擦力, クーロン摩擦力, コリオリ力, 遠心力が挙げられる. しかし, これらの力の大きさを比較すると, 減速機を用いたアームでは, 粘性摩擦力及びクーロン摩擦力が, コリオリ力や遠心力に比べて, 一般的にかなり大きい. つまり, 先のトルクベクトル \mathbf{V}_a の大部分が, この2つの摩擦力をアシストするた

めに費やされると考えられる。ここで、これら粘性摩擦力、クーロン摩擦力の性質について考えると、これらの摩擦力の和は、角速度 $\dot{\theta}$ の増加に対して単調に増加するため、角速度 $\dot{\theta}$ が最も大きいときに最大となる。また式(3.2)より、速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ と角速度ベクトル $\dot{\theta}$ は比例関係にあり、速度 $\dot{\mathbf{X}}$ が最大のとき角速度 $\dot{\theta}$ も最大となる。以上のことから、一般的に、減速機を用いたアームを用いてパワーアシスト装置を構成した場合、アーム手先を最大速度で操作したときに、速度に関する力のアシストトルクベクトル \mathbf{V}_a は最大になると考える。ただし以上のことは、速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ の方向を固定し、ノルムのみを変化させる場合に成り立つ議論であるため、実際にベクトル \mathbf{V}_a の最大値 $\mathbf{V}_{a\max}$ を求めるためには、ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ が取り得る全ての方向において、ベクトル $\dot{\mathbf{X}}$ の最大値に対するベクトル \mathbf{V}_a を求めることが必要となる。以上述べたトルクベクトル $\mathbf{V}_{a\max}$ の算出法を、式で表すと、

$$v_{a\max i} = \max |A_{va}|, A_{va} = \left\{ v_{ai} \left\| \dot{\mathbf{X}}_p \right\| = \dot{x}_{hp\max}, \left\| \dot{\mathbf{X}}_r \right\| = \dot{x}_{hr\max} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4.21)$$

と表すことができる。上式は、トルクベクトルの最大値 $\mathbf{V}_{a\max}$ を求める際に、トルクベクトル \mathbf{V}_a の要素 v_{ai} の比較を速度領域の外周でのみ行うことを示している。これにより、計算コストを格段に減少させることができる。以上、作業領域内の各点 \mathbf{X} における摩擦などの速度に関する力をアシストするために必要な最大トルクベクトル $\mathbf{V}_{a\max}$ の算出法について述べた。

(b) 慣性力に対するアシストトルク

このように、トルクベクトル $\mathbf{V}_{a\max}$ を求めた後、このベクトルを、式(4.19)に示した残存トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{res}$ から減ずることにより、慣性負荷をアシストするために用いることのできるアクチュエータの最大トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{iner}(\mathbf{X}) = [\tau_{iner1} \ \tau_{iner2} \ \dots \ \tau_{iner6}]^T$ を求めることができる。

$$\tau_{ineri} = \tau_{resi} - v_{x\max i} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4.22)$$

最終的に、慣性力をアシストするために必要なアクチュエータのトルクベクトル $\mathbf{M}_a\ddot{\mathbf{X}}$ が、このトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{iner}$ を超えるかどうかを判別することで、式(4.6)が成り立つかどうか、つまりアクチュエータのトルク飽和が生じるかどうかを判別できる。ここで、このベクトル $\mathbf{M}_a\ddot{\mathbf{X}}$ は、アーム手先の加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ に対し線形であるため、作業領域内の各点 \mathbf{X} におけるベクトル $\mathbf{M}_a\ddot{\mathbf{X}}$ の最大値を求めるに、先ほどベクトル $\mathbf{V}_{a\max}$ を求めた手法をそのまま用いることができる。ただし、本研究では、この計算コストをさらに減少させるため、動的可操作性の概念を用いた判別手法を提案する。

それは、トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{iner}$ の値を基に、動的可操作性の概念を用いて^{54),56)}、このトルクによって生じさせることのできるアーム手先の加速度 $\ddot{\mathbf{X}}$ の領域を、負荷操作時の操作者の手先最大加速度 $\ddot{x}_{hp\max}$ 、角加速度 $\ddot{x}_{hr\max}$ の値で正規化した状態で求め、この領域の最小半径が1を超えるかどうかでトルク飽和の有無を判別するという方法である。これが、1を超えない場合は、このアクチュエータの出力トルクでは希望する加速度が得られないということを示しており、また、操作者が最大加速度でこの

装置を操作したときに、トルク飽和が生じることを示している。これは、つまり、式(4.6)が成り立たない場合に相当する。この判別法について、以下に具体的に示す。

まず、アーム手先の加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ と、それを生じさせるために各関節のアクチュエータが出力しなければならないトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_a = [\tau_{a1} \ \tau_{a2} \ \cdots \ \tau_{a6}]^T$ の関係は、式(4.15)より、

$$\boldsymbol{\tau}_a = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}} \quad (4.23)$$

と表される。ここで、このトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_a$ 及び加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ を、アクチュエータの最大トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{a \max}$ 、及び操作者の手先最大加速度 $\ddot{x}_{hp \max}$ 、角加速度 $\ddot{x}_{hr \max}$ を用いて、

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\tau}}_a &= [\tau_{a1}/\tau_{a \max 1} \ \tau_{a2}/\tau_{a \max 2} \ \cdots \ \tau_{a6}/\tau_{a \max 6}]^T \\ \hat{\ddot{\mathbf{X}}} &= [\ddot{x}/\ddot{x}_{hp \max} \ \ddot{y}/\ddot{x}_{hp \max} \ \ddot{z}/\ddot{x}_{hp \max} \ \vdots \ \ddot{\phi}_x/\ddot{x}_{hr \max} \ \ddot{\phi}_y/\ddot{x}_{hr \max} \ \ddot{\phi}_z/\ddot{x}_{hr \max}]^T \end{aligned} \quad (4.24)$$

と正規化し、さらに、これらのベクトル $\hat{\boldsymbol{\tau}}_a$ 、 $\hat{\ddot{\mathbf{X}}}$ を用いて式(4.23)を変形すると、

$$\hat{\ddot{\mathbf{X}}} = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{M}_a^{-1} \mathbf{T}_\tau \hat{\boldsymbol{\tau}}_a \quad (4.25)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_\tau &= \text{diag}(\tau_{a \max 1}, \tau_{a \max 2}, \dots, \tau_{a \max 6}) \\ \mathbf{T}_x &= \text{diag}(\ddot{x}_{hp \max}, \ddot{x}_{hp \max}, \ddot{x}_{hp \max}, \ddot{x}_{hr \max}, \ddot{x}_{hr \max}, \ddot{x}_{hr \max}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

である。次に、 $\|\hat{\boldsymbol{\tau}}_a\| \leq 1$ を満たすベクトル $\hat{\boldsymbol{\tau}}_a$ により実現される正規化された加速度ベクトル $\hat{\ddot{\mathbf{X}}}$ の集合を求める。このベクトル $\hat{\ddot{\mathbf{X}}}$ の集合はつまり、アクチュエータの最大トルク $\boldsymbol{\tau}_{a \max}$ により、

アーム手先に生じさせることのできる正規化された加速度 $\ddot{\mathbf{X}}$ の集合を表す。これを求めるために、ベクトル $\hat{\mathbf{r}}_a$ の係数行列である行列 $\mathbf{M}_a^{-1}\mathbf{T}_r$ を特異値分解する。

$$\mathbf{M}_a^{-1}\mathbf{T}_r = \mathbf{U}_d\boldsymbol{\Sigma}_d\mathbf{V}_d^T \quad (4.27)$$

ただし、行列 \mathbf{U}_d , \mathbf{V}_d は、 6×6 の直行行列で、行列 $\boldsymbol{\Sigma}_d$ は、 6×6 の対角行列である。ここで、これらの行列 \mathbf{U}_d , $\boldsymbol{\Sigma}_d$ の成分を、

$$\boldsymbol{\Sigma}_d = \begin{bmatrix} \sigma_{d1} & & & & & \mathbf{0} \\ & \sigma_{d2} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ \mathbf{0} & & & & & \sigma_{d6} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\mathbf{U}_d = [\mathbf{u}_{d1} \quad \mathbf{u}_{d2} \quad \cdots \quad \mathbf{u}_{d6}]^T$$

とすると、求める動的可操作性を表す楕円体の主軸を表すベクトルは、 $\sigma_{d1}\mathbf{u}_{d1}, \sigma_{d2}\mathbf{u}_{d2}, \dots, \sigma_{d6}\mathbf{u}_{d6}$ で与えられる。以上の手順に従い、Fig.4-2 に示したような、アクチュエータのトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}_{iner}$ により生じさせることのできる正規化された加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ の最大値の集合を示す楕円体が求められる。さらに、楕円体の主軸方向の半径 σ_{di} を比較することにより、正規化された加速度の最小値が求められるため、この値と 1 を比較することにより、アクチュエータのトルク飽和の有無の判別が行える。以上示したように、動的可操作性の概念を用いてアクチュエータのトルク飽和の有無を判別することにより、加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{X}}$ については、領域の各点でおこなわなければならない計算を回避できるため、計算コストを大幅に減少させることができる。最終的には、さらに、このような判別を作業領域内の各点 \mathbf{X}

について行い，全ての点でトルク飽和が生じないときに，動的負荷の操作者負担率 β は適切な値である，つまりこのを選択した場合，操作者がどのような操作を行ってもトルク飽和が生じないであろうと判別できる．

なお，本判別法では，慣性力のアシストに用いることのできる残存トルク τ_{iner} を求めるために，アクチュエータの最大トルク τ_{max} から，重力 $G_a(\theta)$ ，摩擦力 $V_a(\theta, \dot{\theta})$ の絶対値の最大値を減じたが，クーロン摩擦力などに異方性が顕著に現れる系では，このトルク τ_{iner} を最大，最小と分けて求め，その絶対値の小さい方を τ_{iner} として用いることで，より正確な判別を行うことができる．

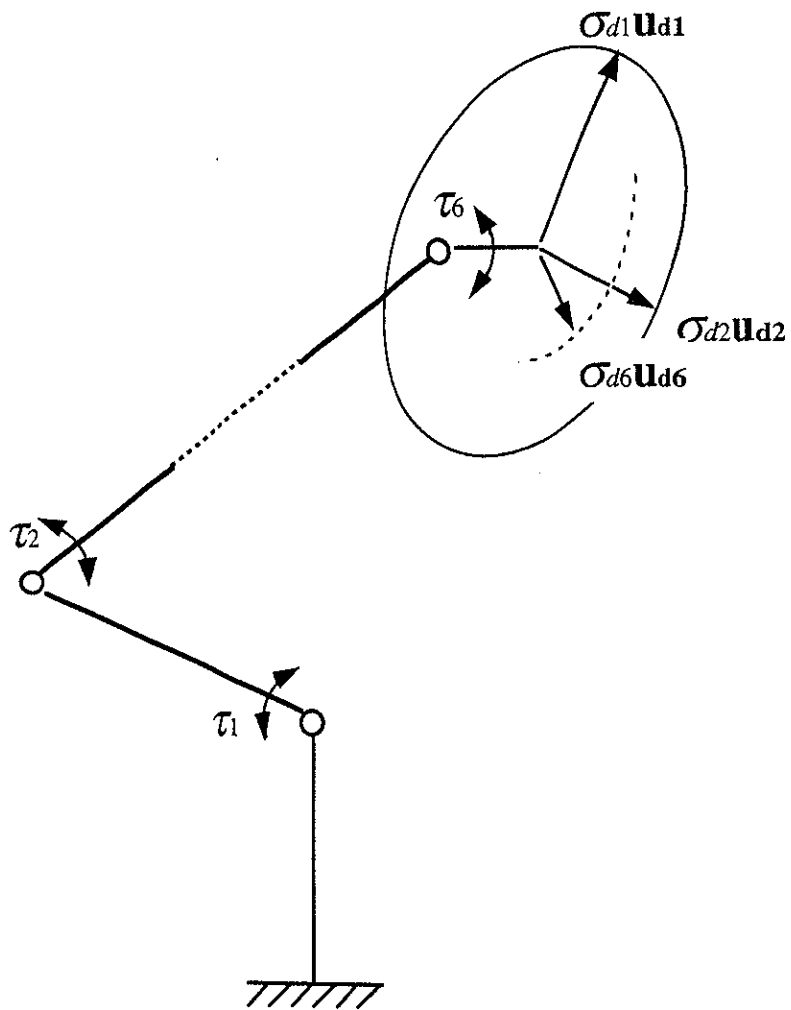


Fig.4-2 動的可操作橢圓體

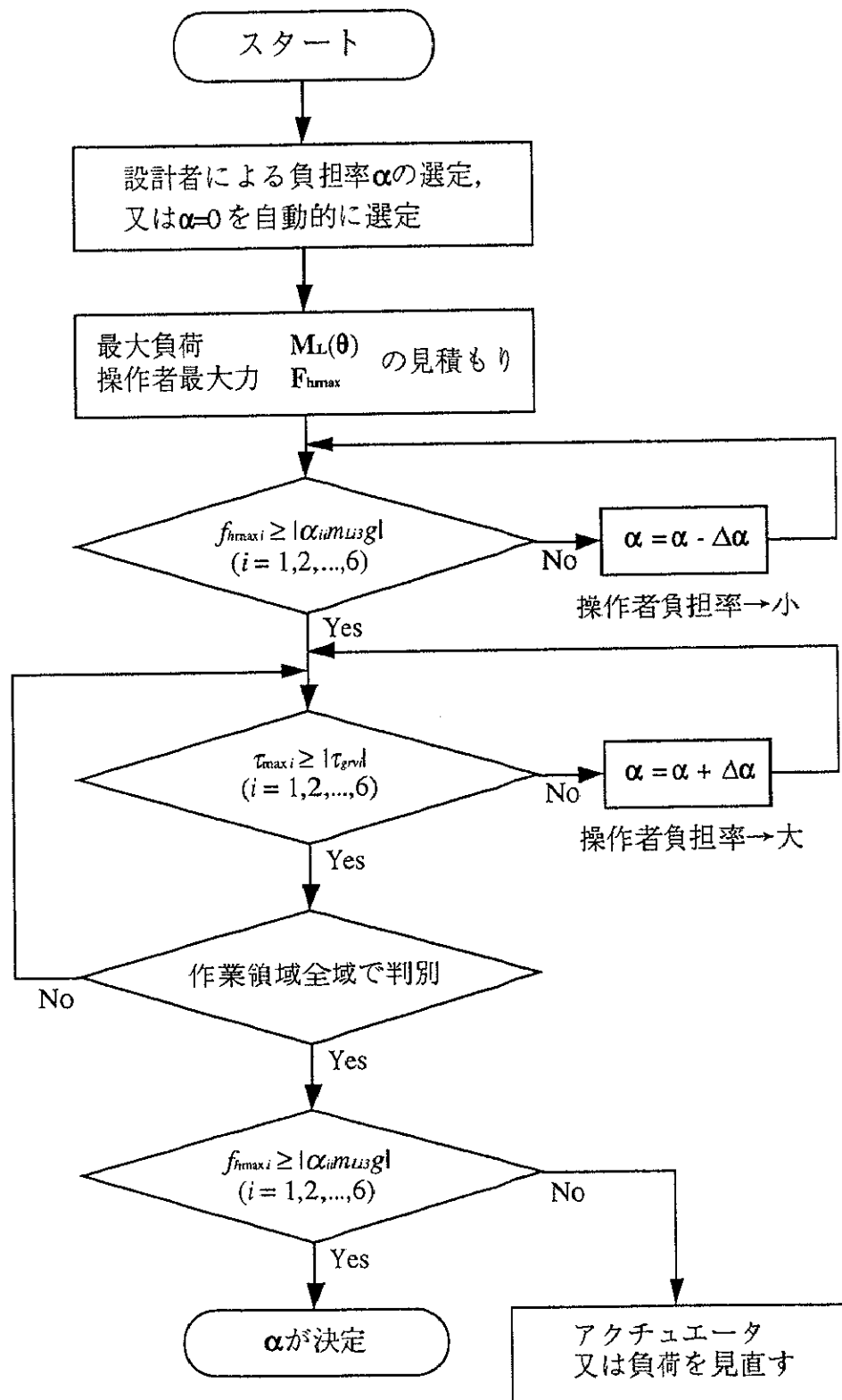
4. 5 操作者負担率の決定法

本章では，提案するパワーアシスト法に基づいて，重力負荷及び動的負荷の操作者負担率 α ， β を決定する指針と，その指針に基づき具体的に負担率 α ， β の妥当性を判別する方法を示した．つまり，これまでの議論の内容は，与えられた負担率 α, β に対し，その値が適切であるかどうかを判別することに絞られていた．本節では，さらに，この判別結果に基づき操作者負担率をどのように決定すればよいかについて論じる．なお，この負担率 α, β の決定に伴い最も問題となるのは，負荷操作時の操作者の最大速度 $\dot{x}_{hp \max}$ ，角速度 $\dot{x}_{hr \max}$ ，加速度 $\ddot{x}_{hp \max}$ ，角加速度 $\ddot{x}_{hr \max}$ をどのように見積もるかということである．つまり，負担率 α, β の変更により操作者に加わる負荷が変動し，それによって操作者の挙動も変化するため，上記の値 $\dot{x}_{hp \max}$ ， $\dot{x}_{hr \max}$ ， $\ddot{x}_{hp \max}$ ， $\ddot{x}_{hr \max}$ を負担率 α, β を変更する毎に見積もり直さなければならぬことが問題となる．例えば，この見積もりを，実際の操作者の挙動を毎回計測し，その計測値から行うとすると，負担率 α, β の変更に対し，操作者は頻繁に負荷を操作しなければならず，操作者に多大な負担をかけることになる．この問題に対する対処法も含めた，負担率 α, β の決定法を以下に示す．

4. 5. 1 重力負荷の操作者負担率の決定法

まず，重力負荷の操作者負担率 α の決定法から述べる．これを決定する手順を表した図を Fig.4-3 に示す．この図に沿って負担率 α の決定法を述べる．

まず始めに、負担率 α の候補を選定する。これは設計者が任意に選定してもよいし、またはできるだけアシスト効果が大きい値が望ましいとして、負担率 α の値の候補として自動的に 0 、つまり重力負荷が操作者に加わらない状態を選定してもよい。次に、想定される負荷の内、最大負荷の慣性行列 $M_L(\mathbf{X})$ と、持続的に発生を許容できる操作者の最大力・トルクベクトル F_{hmax} を見積もる。なお、操作者の最大力 F_{hmax} の計測は、パワーアシスト装置に付加した力センサにより行うことができる。さらに、負担率 α が式(4.4)に示した条件を満たすかどうかを判別し、満たさない場合は、つまり操作者に加わる力が過大であることを表しているため、これを満たすまで負担率 α を下げながら、この判別を繰り返す。このように求めた負担率 α に対し、式(4.5)に示した条件を満たすかどうかを、前節で述べたように判別し、満たさない場合は、つまりアシスト効果が過大でアクチュエータにトルク飽和が生じることを表しているため、これを満たすまで負担率 α を上げながら繰り返す。これで、式(4.4)、式(4.5)で示した負担率 α の条件を同時に満たす α が求められるが、最終的にこれが本当にこれらの条件を同時に満たすかどうかを判別するためには、もう一度、式(4.4)の条件で負担率 α の妥当性を判別することが必要となる。これが成り立たない場合、式(4.4)と式(4.5)の条件を同時に満たす負担率 α が存在しない、つまりこのアクチュエータの出力トルクでは負荷を持ち上げることができないことを示しているため、アクチュエータ及び操作対象となる負荷を、もう一度選定し直すことが必要となる。以上の手順を経ることにより、適切な重力負荷の負担率 α を求めることができる。

Fig.4-3 重力負荷の操作者負担率 α の決定手順

4. 5. 2 動的負荷の操作者負担率の決定法

次に、動的負荷の操作者負担率 β を決定する手順について述べる。Fig.4-4 に、この負担率 β の決定手順を示す。ちなみに、この時点で既に重力負荷の負担率 α 、及びアーム手先の目標慣性行列 \mathbf{M}_d 、粘性摩擦係数行列 \mathbf{B}_d は定まっているとする。

まず始めに、先に求めた最大負荷 $\mathbf{M}_L(\mathbf{X})$ 、及び重力負荷の負担率 α を参考に、操作者が最大速度 $\dot{x}_{hp\max}$ 、 $\dot{x}_{hr\max}$ 、加速度 $\ddot{x}_{hp\max}$ 、 $\ddot{x}_{hr\max}$ で負荷を操作したときに、作業領域内の一部でアクチュエータのトルク飽和が生じるように、動的負荷の負担率 β を選定する。これは、経験によって見積もってもよいし、また、負荷に対する人間の挙動を予め計測した標準データを用いてもよい。また、実際に負荷を操作して見積もるといった方法も考えられる。次に、選定した動的負荷の負担率 β に基づいて駆動されるパワーアシスト装置を用いて、最大負荷 $\mathbf{M}_L(\mathbf{X})$ を操作し、アーム手先の最大速度 $\dot{x}_{hp\max}$ 、角速度 $\dot{x}_{hr\max}$ 、加速度 $\ddot{x}_{hp\max}$ 、角加速度 $\ddot{x}_{hr\max}$ を計測する。そして、これらの計測値に基づき、選定された負担率 β を起点とし、前節に示したトルク飽和有無の判別法を用いて、トルク飽和が全領域にわたり生じないと判別されるまで、負担率 β を徐々に増加させる。以上の手順により、アクチュエータのトルク飽和を回避する負担率 β を決定することができる。

この時、負担率 β が増加するという事は、つまり操作者に加わる負荷が増加するという事であるため、上記で求めた最大速度 $\dot{x}_{hp\max}$ 、 $\dot{x}_{hr\max}$ 、加速度 $\ddot{x}_{hp\max}$ 、 $\ddot{x}_{hr\max}$ は減少することになる。この最大速度、加速度の減少は、つまり、トルク飽和が生じる

かどうかを判別する速度，加速度領域（ $\|\dot{\mathbf{X}}_p\| < \dot{x}_{hp\max}$ ， $\|\dot{\mathbf{X}}_r\| < \dot{x}_{hr\max}$ ），（ $\|\ddot{\mathbf{X}}_p\| < \ddot{x}_{hp\max}$ ， $\|\ddot{\mathbf{X}}_r\| < \ddot{x}_{hr\max}$ ）が減少することを意味する．この減少が顕著な場合，判別する領域を再度見積もり直すことが必要となると考えるが，新たに見積もり直す領域は，始めに見積もった領域に常に含まれるため，この減少が小さな場合は，始めに見積もった領域を，他の負担率 β を判別する領域として代用できると考える．このように始めに領域を少し大きめに見積もることにより，頻繁な速度，加速度の見積もりを回避することができる．つまり，以上の手順を用いて動的負荷の負担率 β を決定することにより，動的負荷の各負担率 β 毎に操作者の最大速度，加速度を見積もり直す必要がなくなり，負担率 β 決定時の負担を軽減できる．以上，重力負荷と動的負荷の負担率 α ， β の決定法を示した．これらの決定法を用いることにより，アクチュエータのトルクを有効に活用しながら，作業領域内で操作者が最大速度，加速度で負荷を操作しても，アクチュエータにトルク飽和が生じないパワーアシスト装置が実現できる．

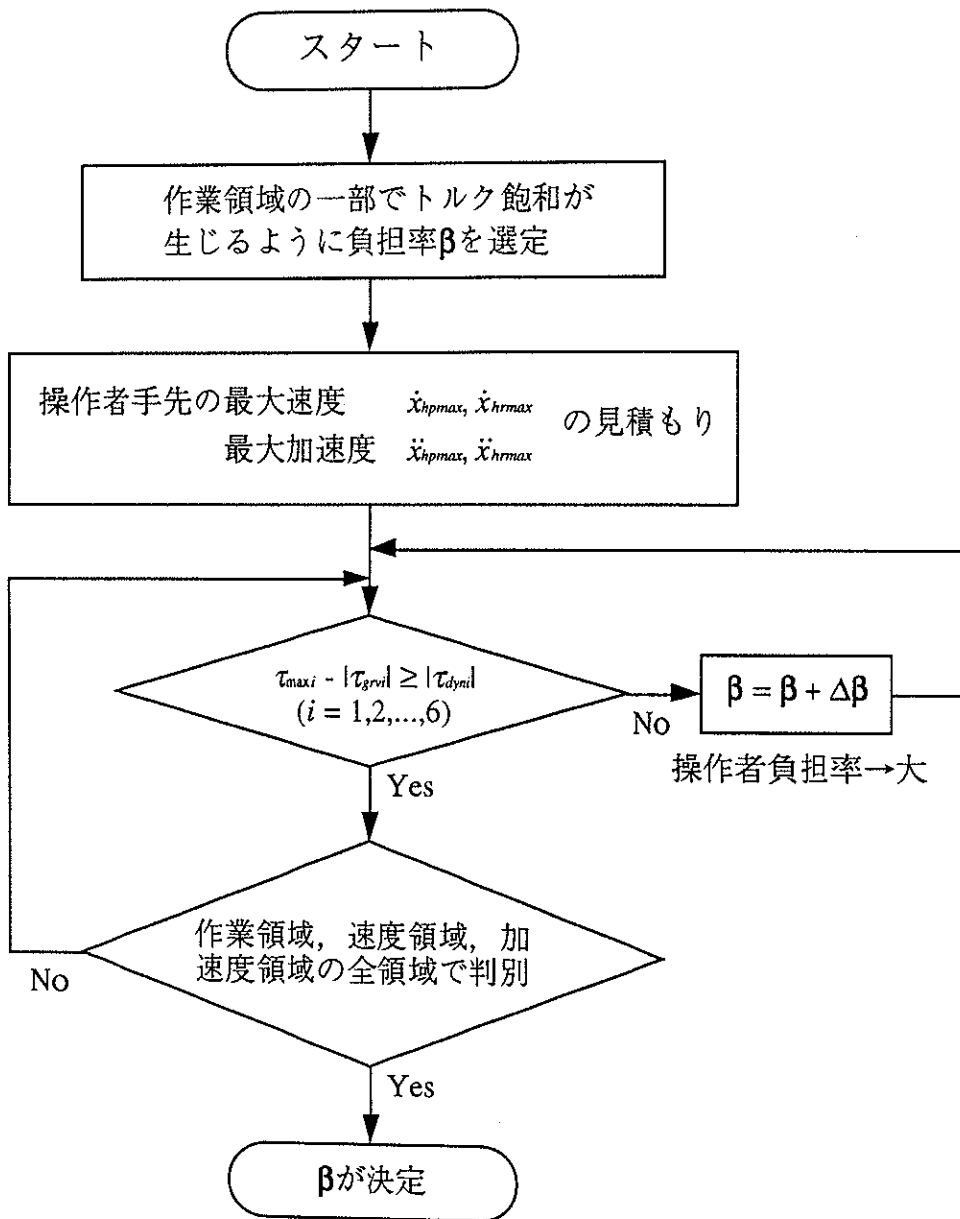


Fig.4-4 動的負荷の操作者負担率 β の決定手順

4. 6 数値例

以上述べた，重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β の決定法の中で，その中核をなす，アクチュエータのトルク飽和の有無の判別法が妥当であるかを検証するため，前章の実験条件を用いてトルク飽和の有無を判別したので，以下に示す．

4. 6. 1 各パラメータの値

ここで，前章の実験条件を確認すると，操作負荷の重量は 10kg で，重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β は，実験 (a) $\alpha_{ii}=0.2$, $\beta_{ii}=0.2$, 及び実験 (b) $\alpha_{ii}=0.2$, $\beta_{ii}=0.5$ であった．また，その他のパラメータに関しては，第 3 章において示した通りである．実験 (a) では，アームがある一定の姿勢になると，トルク飽和が生じ，一方，実験 (b) では，どのような姿勢でも，トルク飽和は生じなかった．これらアクチュエータのトルク飽和の有無が，本判別法により推定できるかどうかを検証し，本判別法の有効性を確認する．

前章の実験では，式(3.27)に示したように，一定の円軌道を等速で負荷を操作するように指示しているため，アーム手先の最大速度 $\dot{x}_{hp\max}$, 加速度 $\ddot{x}_{hp\max}$ は，式(3.27)を微分することにより，

$$\dot{x}_{hp\max} = 0.48, \quad \ddot{x}_{hp\max} = 1.92 \quad (4.29)$$

と求められる．

以上の条件で，作業領域内の各点でトルク飽和が生じるかどうかを，式(4.6)に示した指針により判別する．なお，前章の実

験では、負荷のトルク成分はアシストしていないため、トルク成分については無視した。また、本アームのクーロン摩擦力には顕著な異方性が見られたため、先に述べたように、慣性力のアシストに用いることのできるアクチュエータのトルク τ_{iner} を、最大と最小に分けて求める手法を選択した。

4. 6. 2 計算結果

計算結果を Fig6-5 に示す。図の黒く塗りつぶされた部分は、その位置において式(4.6)が成り立たない、つまり操作者が最大速度、加速度で負荷を操作した場合、アクチュエータにトルク飽和が生じる可能性があることを示している。また、図中の円は前章の実験で被験者に与えた目標軌道を示している。これらの図は、実験 (a) の負担率 α , β の条件では、頻繁にトルク飽和が生じることを示しており、また実験 (b) の条件では、ほとんどトルク飽和が生じないことを示している。これは、先程述べた実験結果と非常によく合致する。したがって、この計算結果から、本章で述べたアクチュエータのトルク飽和有無の判別法が有効であることが、一例ではあるが確認することができる。

さらに、この Fig.4-5 を注意深く観察すると、どのようにアクチュエータのトルク飽和が生じるかも、ある程度推測することができる。実験では、操作者が左回りに負荷を操作するが、一般的に負荷操作に必要な力が最大となるのは持ち上げ時であり、この円軌道では重力と逆方向に加速する右下の部分にそれに相当するため、この部分で、要求されるアクチュエータ

の出力トルクが最も大きくなると考えられる。ここで、実験（a）の計算結果を見ると、円軌道の右下もトルク飽和が生じる可能性のある領域に含まれるため、予想されるようにトルク飽和が生じている。一方、実験（b）の計算結果では、円軌道の右下はトルク飽和の生じる可能性のある領域に含まれないため、トルク飽和は生じていない。

なお、実験（b）の条件でも、この円軌道全体を見ると、円軌道内にはアクチュエータのトルク飽和が生じる可能性のある領域が含まれているため、例えばこの条件で、負荷を反対の右回りに操作したとすれば、トルク飽和が生じる可能性があることを示している。したがって、この結果から、操作者の全ての挙動に対してトルク飽和を回避するためには、実験（b）の負担率 β でもまだ小さいことが分かる。先に論じたように、本決定法においては、このトルク飽和が生じる可能性のある領域が、作業領域内でなくなるまで負担率 β を大きくしていくことにより、アクチュエータのトルク飽和を回避する負担率 β を決定する。

以上、本章で述べた、アクチュエータのトルク飽和の判別法の有効性を確認した。

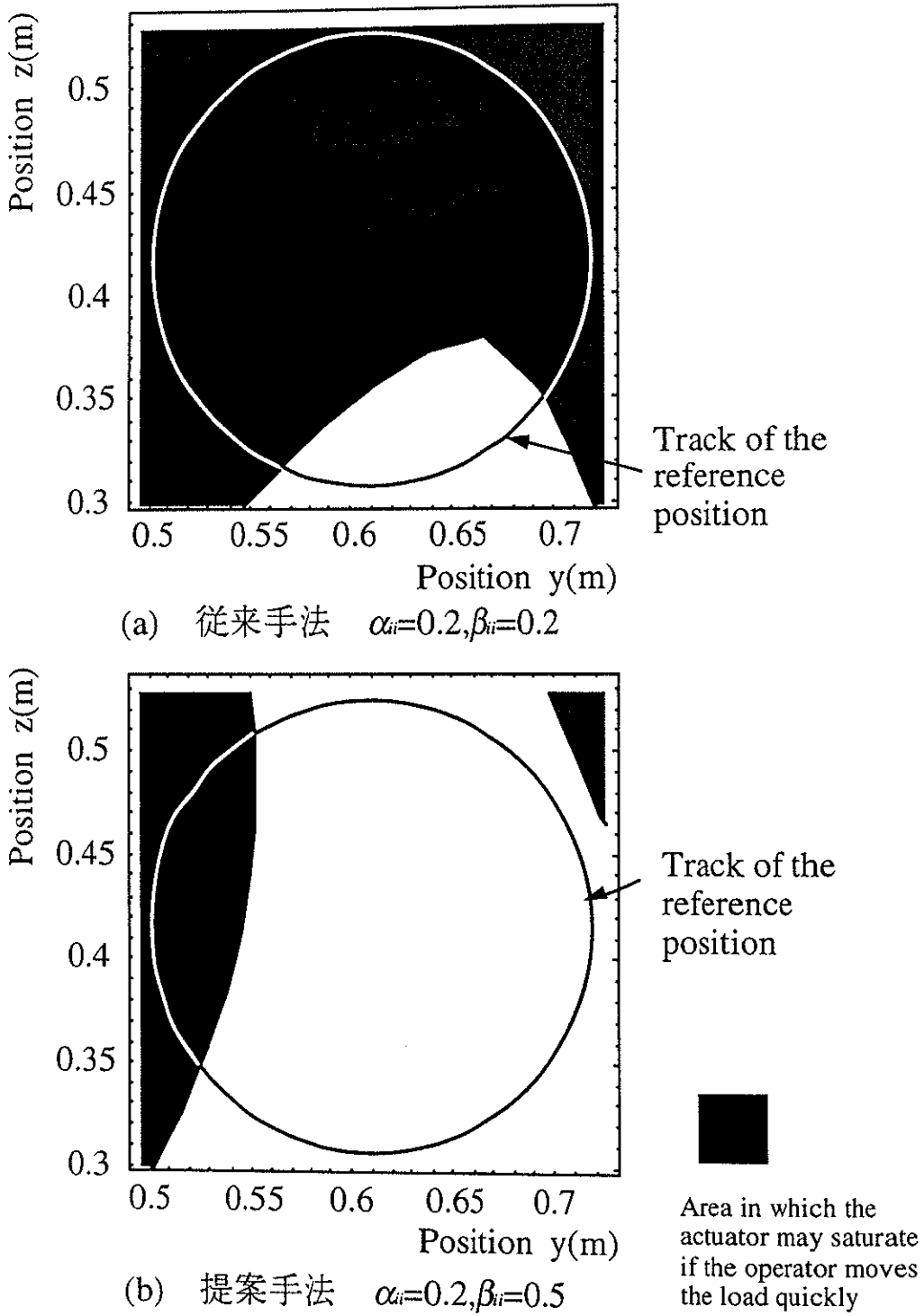


Fig.4-5 操作者が負荷をすばやく操作したときにトルク飽和が生じる領域

4. 7 操作者の主観を加味した操作者負担率の決定法

本章では、重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β を、アクチュエータのトルク飽和を回避することを指針として決定する方法について述べてきた。ここで、このように負担率 α , β を決定したのは、アクチュエータのトルク飽和が操作性、安定性を劣化させると推測されたからである。実際、これまでの実験において、アクチュエータのトルク飽和が、アームの挙動を振動的にさせること、臨機応変かつ試行錯誤的な操作を要求すること、意図した軌道の追従を困難にすることなどを確認した。本論文では、これらの実験結果から、装置の操作性は劣化するであろうと推測し、アクチュエータのトルク飽和の生じない提案手法の優位性を論じてきた。しかし、これらの議論の中には、操作者自身の主観が欠けていたため、さらに操作者の主観に基づいた負担率 α , β の決定法を検討することが必要と考える。なぜならば、例えば、アクチュエータが少々トルク飽和しても、アシスト効果を大きくしたいというような操作者の要求が存在することがありえるからである。したがって、これを確認するため、第3章に示した実験装置を用いて、いくつかの負担率 α , β の組み合わせで操作者に負荷を操作させ、このときの負荷の操作感と操作に対する負担を主観的に評価してもらい、これによりアクチュエータのトルク飽和が操作者の主観にどのように影響を及ぼすのかを検討する。

また、本章で示した負担率 α , β の決定法では、始めに設計者が任意に重力負荷の負担率 α を選定することにより、それに

対応する動的負荷の負担率 β が決定されるが、今までの議論の中には、これらの負担率 α , β の値のバランスを、どのようにすれば操作者に、より操作感のよいパワーアシスト装置が提供できるかについてははっきりした指針はなかった。アクチュエータのトルクを有効に活用することだけを考えると、できるだけ重力負荷を大きくアシストした方がよく、できるならば重力負荷を完全にアシストして無重力状態で負荷を操作した方がよいということになる。たしかに、これにより操作者に加わる力は小さくなるが、自然界の中では水平方向はともかく、鉛直方向に慣性力しか働かない負荷はほとんど存在しないため、これが操作者にとって違和感となる可能性がある。これらのことを念頭において、先の実験を行うにあたり、この重力負荷と動的負荷の負担率 α , β の値のバランスを、どのようにするのが望ましいかの指針についても同時に検討することとする。

4. 7. 1 実験方法

第3章で示した実験装置を用いて、いくつかの操作者負担率 α , β の組み合わせで、被験者に10kgの負荷を操作してもらい、そのときの操作感と操作に対する負担を各自に評価してもらった。評価する操作者負担率 α , β の組み合わせは、重力負荷の負担率 $\alpha_{ii}=0.0, 0.2, 0.4$ と動的負荷の負担率 $\beta_{ii}=0.3, 0.5, 0.8$ をそれぞれ組み合わせることで、全部で9組とした。ただし、負担率は各方向で同じとし、また、トルク方向のアシストは行わないとした。さらに、最もアシスト効果の大きな負担率の組み合わせ ($\alpha_{ii}=0.0, \beta_{ii}=0.3$) を用いて負荷を操作した場合、操

作者のゆっくりした動きに対してもアクチュエータのトルク飽和が生じるように、アーム第3関節のアクチュエータが出力可能なトルクを、ソフトウェアを用いて100Nmに制限した。なお、アーム手先の目標慣性、粘性摩擦係数行列 \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d の対角成分は、第3章で求めたアームの特性と、本章において論じたこれらの値の決定法に基づき、 $m_{dii}=16, b_{dii}=49$ とした。

以上のような実験条件で、被験者に作業領域内で任意に負荷を操作してもらい、そのときの操作感、及び感じた負担を、0点から10点までの11段階で評価するよう指示した。なお、各負担率 α , β の提示はランダムな順番で行い、実験の順番による影響をできるだけ排除するよう心がけた。以上のべた実験を、20才代の男女5人について行った。

4. 7. 2 実験結果及び考察

実験結果を Fig.4-6 に示す。Fig.4-6(a), (b)はそれぞれ、各負担率 α , β で負荷を操作したときの、各被験者が感じた操作感及び負担を評価した結果を円の大きさと表している。なお、Fig.4-6(a)中の、操作感の評価値を示す円が黒く塗りつぶされているのは、このとき目で見えて分かる程度に、アクチュエータのトルク飽和による振動現象が生じていたことを表している。

まず、Fig.4-6(a)より、操作者負担率 α , β が減少すると、つまり負荷に対するアシスト効果が大きくなると、全体的に操作感の評価値が増加する傾向が見られる。しかし、アクチュエータがトルク飽和するまで負担率 α , β を小さくすると、先程とは反対に、大半の被験者の操作感の評価値は急激に減少し

ている。これらの結果から、アクチュエータのトルク飽和が、操作者の主観的な操作感に悪影響を及ぼしていることが分かる。したがって、本章で論じた、アクチュエータのトルク飽和を回避することを一つの指針とする、重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β の決定法は、操作者の主観的な操作感という観点からも妥当であることが分かる。

なお、被験者 H.T においては、アクチュエータのトルク飽和による操作感の評価値の減少があまり見られなかった。これは被験者 H.T が他の被験者と比べて長い間この実験装置を操作し、アクチュエータのトルク飽和によるアームの振動的な挙動に、ある程度慣れたことが原因の一つとして挙げられる。また、その他の原因としては、Fig.4-6(b)から分かるように、負担率 α , β の増加に対して被験者が感じる負担の増加が急激であるため、アクチュエータのトルク飽和による操作性の劣化より、負荷が増加することの方が被験者にとって深刻な問題であったことが挙げられる。この例から察せられるように、ある程度装置に慣れることにより、アクチュエータのトルク飽和による操作感の低下は防げるとは考えるが、そのためには、トルク飽和時のアームの挙動に慣れることが必要であり、このような作業を要求するシステムはそもそも操作性のよいシステムとはいえない。

次に、アクチュエータがトルク飽和を生じない負担率 α , β の組み合わせの中で、どの組み合わせが操作者の主観という観点から望ましいかを論じる。先に述べたように、負担率 α , β が減少すると、全体的に操作感の評価値が増加する傾向が見られる。しかし、アクチュエータのトルク飽和を回避するためには、これらの負担率 α , β を共に減少させることはできないため、どちらかの負担率を優先して減少させることが必要となる。

なお，本章で示した操作者負担率の決定法においても，アクチュエータのトルク飽和回避を一つの指針としているため，このような各負担率 α ， β の値のトレードオフが生じる．つまり，重力負荷の負担率 α を小さくすると，動的負荷の負担率 β が大きくなり，反対に負担率 α を大きくすると負担率 β は小さくなる．ここで，どちらの負担率を優先すべきかは，Fig.4-6(a)中の操作感の評価値を比較することにより判断することができる．比較する負担率 α ， β の組は，負担率 ($\alpha_{ii}=0.0$ ， $\beta_{ii}=0.3$)，($\alpha_{ii}=0.0$ ， $\beta_{ii}=0.5$)，($\alpha_{ii}=0.2$ ， $\beta_{ii}=0.3$) でアクチュエータにトルク飽和が生じていることから，トルク飽和が生じない程度に負担率 α ， β を小さく設定している負担率 ($\alpha_{ii}=0.0$ ， $\beta_{ii}=0.8$)，($\alpha_{ii}=0.2$ ， $\beta_{ii}=0.5$)，($\alpha_{ii}=0.4$ ， $\beta_{ii}=0.3$) である．これらの評価値を比較すると，一般的に重力負荷の操作者負担率 α を優先的に小さくした方が評価値が大きいことが分かる．ただし，多くの被験者では，2組の負担率 ($\alpha_{ii}=0.0$ ， $\beta_{ii}=0.8$)，($\alpha_{ii}=0.2$ ， $\beta_{ii}=0.5$) の操作感及び負担の評価値の間に，いずれも顕著な差が見られないため，少々の重力負荷は操作者にとって負担にならないことが分かる．また，重力負荷を完全にアシストし，無重力状態で負荷を操作しても違和感が生じないことも確認された．

したがって，このように操作者が負担と感じない範疇で，重力負荷の負担率 α を優先的に決定し，動的負荷の負担率 β については，本章で述べた手法を用いてアクチュエータにトルク飽和が生じないように決定することにより，操作者の主観という観点からも望ましい負担率 α ， β の組み合わせを求めることができる．

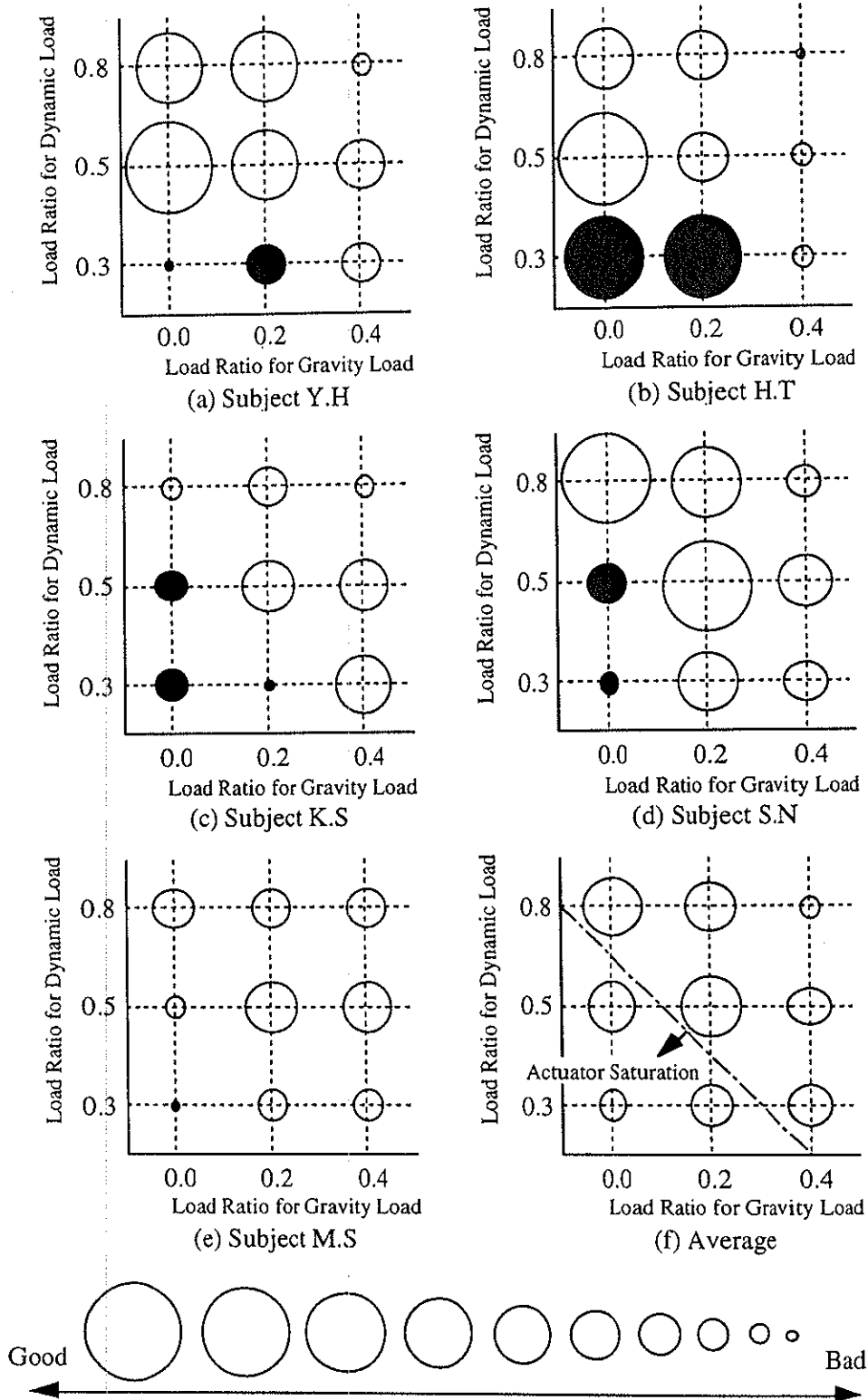


Fig.4-6(a) パワーアシスト装置を用いた負荷操作時の操作者の主観（操作感）

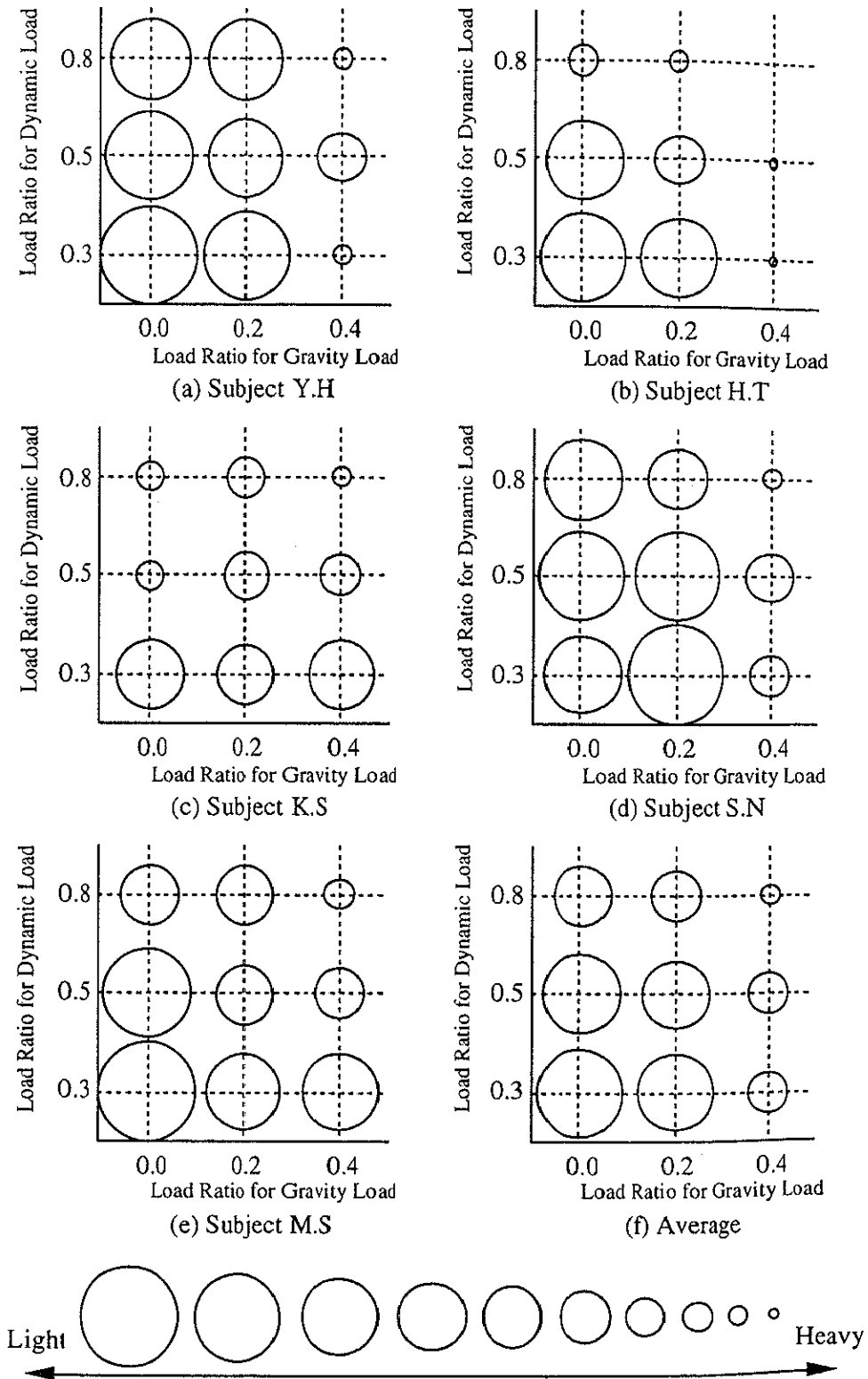


Fig.4-6(b) パワーアシスト装置を用いた負荷操作時の操作者の主観 (感じた負担)

4. 8 まとめ

本章では、前章に示した制御系において、提案するパワーアシスト法に基づく、アクチュエータのトルク飽和回避を行うため、重力負荷と動的負荷の操作者負担率 α , β の決定法を示した。ここで、重力負荷の操作者負担率 α は、操作者の持続的に発生を許容できる最大力とアクチュエータの出力可能な最大トルクに従い決定され、動的負荷の操作者負担率 β は、先の重力負荷をアシストした後のアクチュエータの残存トルクに従い決定された。なお、これを求めるときに主に問題となるのは、まず、アクチュエータのトルク飽和の有無の判別に要する計算コストが膨大になることであるが、これについては、式を計算する領域の次元を下げた後、動的可操作性の概念を用いることにより、この計算コストを下げる方法を示した。もう一つの問題は、負荷に対する負担率 α , β を変化させることにより、操作者の挙動が変化するため、これを頻繁に見積もり直さなければならないことであるが、これについては、予め少し大きめの操作者最大速度、加速度を見積もることにより、回避できることを示した。さらに、負担率 α , β の決定し際して操作者の主観を加味するため、心理物理実験を行い、アクチュエータのトルク飽和が操作感の劣化を生むこと、重力負荷を優先して大きくアシストすることが望ましいことを確認した。以上のことを全て考慮して、重力負荷と動的負荷の負担率 α , β を決定することにより、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し、操作感も良好であるパワーアシスト装置が実現できる。