

— 卒業論文 —

負荷特性に応じたインピーダンス制御を用いた
センサレスパワーアシスト法

平成13年2月13日提出

指導教官： 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

00471 磯 将人

内容梗概

わが国において、高齢化問題はますます深刻のものになってきている。パワーアシスト技術は高齢者の作業や、介護者の動作を補助するのに非常に有効である。本論文では、そのような支援の一つとしてインピーダンス制御に基づく、センサレスパワーアシスト法を提案する。

本手法では、人間からの入力トルク、負荷側から加わるトルクのそれぞれにインピーダンス制御を施すことにより、様々な特性を持つ負荷に対応できるようになる。加えて、外乱オブザーバを用いて、負荷側から加わるトルクを推定することにより、力センサを1つにすることができる。

最後に、実験により本手法の有効性を示す。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
第2章	パワーアシストの基礎的事項の整理	3
2.1	パワーアシストの定義	3
2.2	パワーアシストの関連研究	3
2.3	パワーアシスト技術に求められる条件	5
2.4	パワーアシストにおける負荷	5
2.4.1	負荷の特性	5
2.4.2	負荷とロボットの関係	6
第3章	パワーアシストにおける制御手法の分類	7
3.1	力制御ベース型パワーアシスト法	7
3.2	位置制御ベース型パワーアシスト法	8
3.3	本研究で用いる手法	10
第4章	インピーダンス制御に基づく新しいパワーアシストの提案手法	11
4.1	ロバスト位置制御系	11
4.2	インピーダンス制御系	12
第5章	外乱オブザーバによる力センサレス化	14
5.1	外乱オブザーバによる外乱の推定	14
5.2	摩擦を考慮した負荷側トルクの推定	14
第6章	実験による比較・検討	16
6.1	実験機の構成	16
6.2	実験結果	18
第7章	結言	24
	参考文献	25
	発表文献	26
	謝辞	27

第1章 序論

1.1 研究の背景

わが国の高齢化は諸外国に例を見ない早さで進んでいる。図 1.1 はわが国の年少（0～14 歳）、人口生産年齢（15～64 歳）、人口老年（65 歳以上）人口を平成 12 年国勢調査の第一次基本集計結果、ならびに同年人口動態統計の確定数が公表されたことをふまえ、新たに全国将来人口推計を実施し、その結果を国立社会保障・人口問題研究所がとりまとめたものである。国立社会保障・人口問題研究所によると、21 世紀の半ばには国民の 3 人に 1 人が 65 歳以上であるという超高齢社会の到来が予測されている。

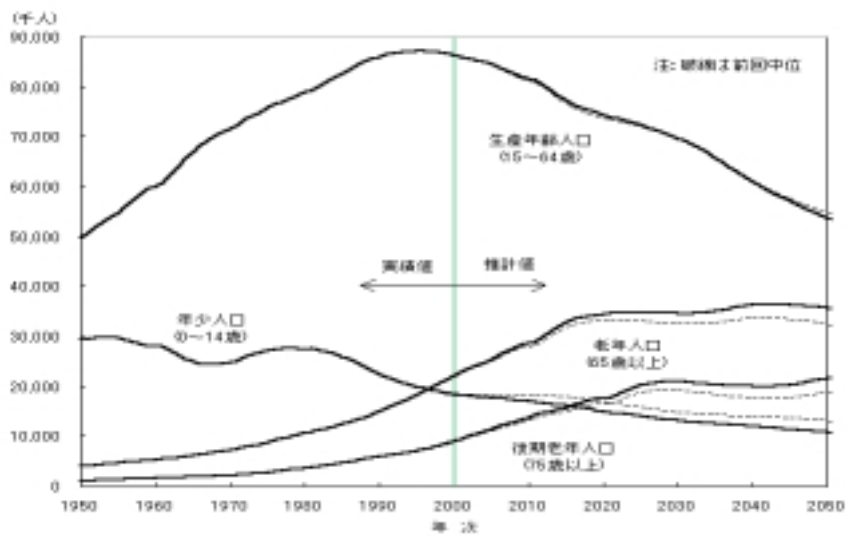


図 1.1: わが国の年齢別人口の割合

一方、結婚や出産年齢が年々高まり、生まれてくる子どもの数も減少している。そうした少子高齢化社会により医療介護の容量、高齢労働者の増加、社会全体の活気などさまざまな問題を引き起こすと考えられる。このような問題に対して、高齢者の自立が必要不可欠である。そのためには、医療からの支援はもちろんのこと工学的な見地からの支援による対処も必要になってくる。その工学的な見地からの支援の 1 つとして、パワーアシスト技術がある。

パワーアシスト技術は、高齢者介護の様々な動作における補助や、高齢者自身の動作を補助するものとして期待できる。パワーアシストロボットは人に対して働きかける機械であるため要求される安全性は非常に高い。そのため、安全性、操作性を考慮したパワーアシストロボットの実現が求められている。

そこで、本研究ではパワーアシスト法を対象とした研究を行う。

1.2 研究の目的

本論文では、様々な特性の負荷に対して安定かつ操作性に優れたパワーアシスト法の実現を目的とする。

例えば介護用ロボットの場合、高齢者をベットから抱き起こすときに高齢者が暴れても柔軟に対応できることが望ましい。そのためには、どのような負荷に対しても安定にパワーアシストする手法が求められる。

そこで、本研究では、人間がパワーアシスト装置に加えるトルクと、負荷が人間がパワーアシスト装置に加えるトルクの両方に独立したインピーダンス制御を施すことにより、それを実現する手法を用いる。

また、どのような負荷にでも対応するためには、ロボットのどこに負荷が加わっても、それを制御することが望ましい。

そこで、センサレスパワーアシスト法を用いる。センサレスとは全くセンサがないわけではない。今までのパワーアシスト関係の研究では、その多くが、力の入力方向・出力方向の二箇所にかセンサを用いて、パワーアシストを実現している。それに対し、本論文では、出力方向の力を推定することによって、力センサを1つにすることができる。

第2章 パワーアシストの基礎的事項の整理

2.1 パワーアシストの定義

操縦者(オペレータ)の動きと同じ動きをし、その力だけを補助する動きをするロボットを一般にパワーアシストロボットと呼ぶ。

ロボットは人間と同じように仕事を達成することができるが、人間であれば簡単にできる作業でさえロボットには困難な場合がある。例えば人間は、障害物を避けたり、複雑で細かい部品を組み合わせたたり、壊れやすい物体を扱ったりできるが、ロボットにそのような動きを正確に、かつ迅速に行わせるのは非常に難しい。しかし、人間と比べてロボットは力の面で大きく勝っている。ロボットの出力する力は、モータ、または油圧アクチュエータによるものだが、小さなアクチュエータでさえ、人間と比べて大きな力を出すことが可能である。このように、ロボットが持つ利点である強大な力と、人間が持つ利点である器用さを組み合わせたものが、パワーアシストロボットといえる。

2.2 パワーアシストの関連研究

パワーアシストロボットの開発の歴史は比較的早く、1960年代に General Electric が提案した“Hardiman”や Cornell 航空研究所の“Myotoron”に遡る。これらの装置は“Man-Amplifier”と呼ばれ、外骨格型のマスタシステムに重ね合わせる形でスレーブシステムを構成した、二重の構造を持つ一種のバイラテラルマスタスレーブシステムで、人間がそのパワーアシストシステムを着る事を前提としていた。マスタを装着する人の四肢の動きと一体化して動くスレーブを動かすことで、人に重作業を遂行させる事を意図した装置であったが、予備的な研究が行われただけで終了した。

これに対し1989～1993年、Kazerooni は操作者と負荷からアシストアームに加わる力を一定比率になるよう制御する事で、パワーアシストを1組みのアームとモータで実現する手法を提案した[1]。“Extender”と名付けられたこのロボットは、人間がそのパワーアシストシステムを着るタイプのもので、環境(負荷)や人間からの反力である、アシストアームに加わる力の比を制御することを目的としていたため、環境(負荷)や人間の特性が分からないと制御系を設計できず、また、目標とするアシスト比のパフォーマンスと、環境(負荷)や人間の特性の変化に対してのロボットの安定性との間にトレードオフが生じてしまうという問題があった。

それとほぼ同じ時期である1991～1993年頃、小菅らは人間・機械・環境系の制御という、オペレータが意図する動き通りに動くシステムを考え操作性について議論した。しかし、これも“Extender”と同様に人間と環境(負荷)の特性が分からないと制御系を設計できないという欠点があった。

小菅らはまた1994年に、「仮想ツールダイナミクス」という概念を提案し、人間と環境

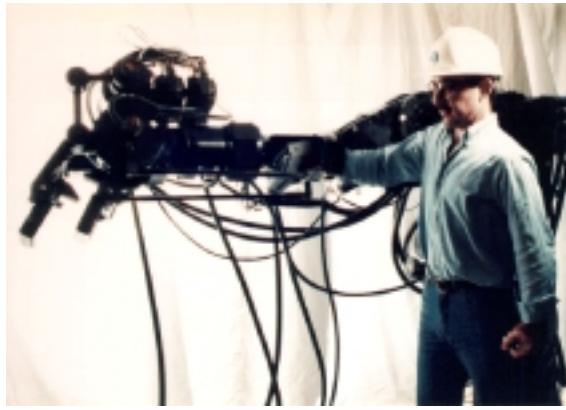


図 2.1: 実際の “Extender” の写真

(負荷) の特性が分からなくても、また、作業によって変化する場合でも制御系の設計が可能になることを示した [2]。

「仮想ツールダイナミクス」とは、力を増幅する働きをする道具を想定し、そのような道具と同じ挙動をするようにアシストアームを制御することで、結果的に力の増幅を実現するという手法である。言い換えると、人間－道具、環境(負荷)－道具間での力のやり取りと、人間－機械、環境(負荷)－機械間の力のやり取りが同等と見なせるように、アシストアームを制御する手法である。

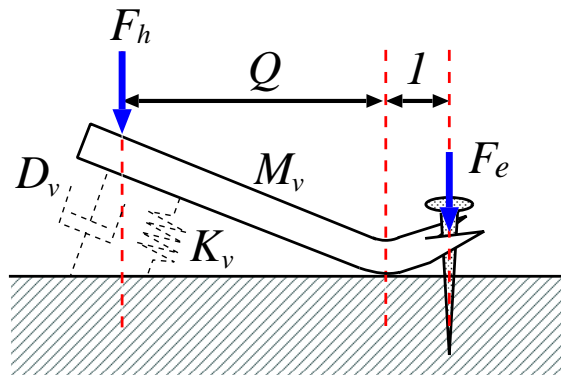


図 2.2: 道具の特性

小菅らは図 2.2 に示すテコのような道具を想定し、(2.1) 式で表される運動方程式に従う挙動をするようにアシストアームを制御することにより、パワーアシストの実現を目指した。

$$M_v \ddot{x} + D_v \dot{x} + K_v x = Q F_h + F_e \quad (2.1)$$

この手法では、設計に必要となるのは真似をする道具のダイナミクスだけであり、環境(負荷)・オペレータの特性をモデリングする必要がなくなる。また、オペレータがロボットを着る必要がなくなり、環境(負荷)・オペレータ・ロボット全てを含めた系の安定性は Popov の超安定定理で証明されている。

その他にも、田窪らの長尺物の協調運搬をするロボット [3] [4]、永井らの上腕をアシストするロボット装具 [5] [6]、林原らのアクチュエータの飽和を考えたパワーアシストロボットの研究 [7]、谷のロボスタビリティを考慮したセンサレスパワーアシストロボットに関する基礎研究 [8] などがある。

2.3 パワーアシスト技術に求められる条件

パワーアシスト技術において必要な要素の中に、アシスト比と操作性がある。本論文では次のように定義付ける。

1. アシスト比： α

オペレータがアシストアームに加える力 F_{in} と、負荷がアシストアームに加える力 F_{ld} の比率。手法によっては、アシストアームを保持するための力 (F_{in0}) を考えているときもあり、(2.2) 式のように定義する。

$$(\text{アシスト比} : \alpha) = \frac{F_{ld}}{(F_{in} - F_{in0})} \quad (2.2)$$

(2.2) 式より、アシスト比が大きいほど、オペレータは軽い力で操縦できるということが分かる。

2. 操作性

操作をする上で直接人間の感覚に影響するパラメータとして、慣性・摩擦・バネ定数等のインピーダンスパラメータがある。特に、操作する人間(オペレータ)側からのインピーダンスパラメータに注目し、操作性はそれら3つのパラメータによって決定されるとする。また、これらのインピーダンスパラメータの値が小さいこと(動かしやすいこと)を「軽い」と表現し、その値が大きいこと(動かしにくいこと)を「重い」と表現することにする。

3. 負荷の感覚

また、もう1つ大切な要素として”負荷を感じる事ができる”ことが挙げられる。パワーアシストをするときにアシスト比を大きくしすぎると、オペレータが負荷を感じる事ができなくなる。負荷がしっかり固定されている場合はいいのだが、そうでない場合は負荷が急激に移動したりすることが予想され非常に危険である。そのため、オペレータがある程度負荷を感じながらパワーアシスト装置を操作する、ということが望ましいと考えられる。また、負荷の感覚は、負荷側からのインピーダンスパラメータによって決定されるものとする。

2.4 パワーアシストにおける負荷

2.4.1 負荷の特性

工場などで、大きな力を必要とする作業の補助のために、アシスト比や操作性を適切に調整することで、パワーアシストロボットは有用なものとなり得る。また、介護の場においては、パワーアシスト技術は、寝たきりの高齢者のオムツを交換する際の補助、ベットから抱き起こす際の補助、お風呂にいれる際の補助、リハビリをする際の補助等さまざまな用途に使える可能性がある。

そのとき、パワーアシストロボットの操作者が介護者であるとき、負荷は被介護者と考えられる。一方、操作者が高齢者のとき、負荷は重い荷物などの物体、もしくは装着型の場合は高齢者自身となり得る。つまり、パワーアシストの対象となる負荷には、人間、物

体など様々なものが考えられる。人間の場合、姿勢あるいは個人個人で特性は異なると考えられ、また、物体の場合でも硬いもの、軟らかいものなどいろいろな特性がある。

特性としては、図 2.3 の様にインピーダンスパラメータを使って表すことができるような特性をもつものもあれば、容易に表現することのできない非線形な特性を持つものもあると考えられる。図 2.3 において、 m, d, k はそれぞれ慣性、粘性、剛性を表すインピーダンスパラメータである。

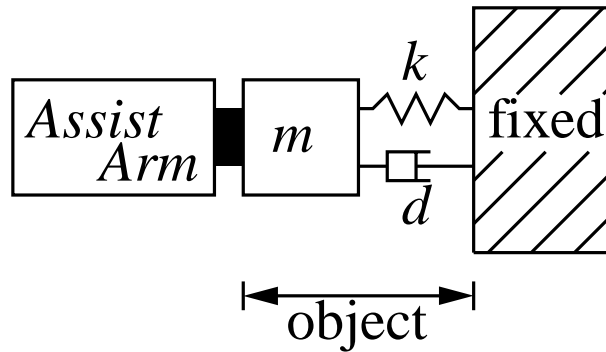


図 2.3: 線形な負荷のモデル

このように、負荷として、様々な特性を持つものが考えられ、それらに応じた制御系が望ましいと考えられる。

2.4.2 負荷とロボットの関係

負荷とロボットの関係により想定されるケースを以下のように分類する。

自由空間 無負荷で、かつアシスタームが動いている場合。

負荷空間 負荷があり、かつアシスタームが動いている場合。

拘束空間 負荷があり、かつアシスタームが動いていない場合。

なお、無負荷で、かつアシスタームが動いていない場合は考えないこととする。

負荷とロボットの関係において、パワーアシストをする際に求められることは、

自由空間 操作性がよいこと。

負荷空間 オペレータがある程度負荷を感じながら操作できること。

拘束空間 オペレータがほとんど程度負荷を感じないこと。

と考えられる。また、全空間でパワーアシストをすることが求められるのは言うまでもない。

第3章 パワーアシストにおける制御手法 の分類

3.1 力制御ベース型パワーアシスト法

力制御をベースとした制御手法として以下のような制御系を考え、それを力制御ベース型パワーアシスト法と名付ける。

操作量 アシストアームの位置・速度・加速度等の指令値

制御対象 オペレータの体および負荷の特性

制御量 負荷およびオペレータからのアシストアームへの反力

すなわち、オペレータと負荷を対象にアシストアームの挙動を操作し、オペレータと負荷からの反力を制御する。

$$\alpha (F_{in} - F_{in0}) + F_{ld} \rightarrow 0 \quad (3.1)$$

を目標とした制御を力制御ベース型パワーアシスト法ということにする。以下、力制御ベース法と書く。この時、 F_{in} , F_{ld} は力センサを用いて測定が可能であり、 α , F_{in0} はあらかじめ決められている。

F_{in} はオペレータがアシストアームに加える力であり、オペレータが発する力 u_{in} はまた別に存在することに注意すると、(3.2) 式の運動方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned} u_{in} - F_{in} &= M\ddot{x} + D\dot{x} + K(x - x_0) \\ &= H(x) \end{aligned} \quad (3.2)$$

(3.2) 式において、 x はアシストアームおよびオペレータの位置、 H はオペレータの体の特性を表す関数である。ここで $-F_{in}$ がアシストアームがオペレータに対して加える力となっている。また u_{ld} をアシストアーム以外から負荷に加わる力、 E を負荷の特性とすると、 $-F_{ld}$ がアシストアームが負荷に対して加える力となるため、(3.2) 式と同様に (3.3) 式の運動方程式が成り立つ。

$$u_{ld} - F_{ld} = E(x) \quad (3.3)$$

以上のことを踏まえると、力制御ベース法のブロック図として図 3.1 が考えられる。

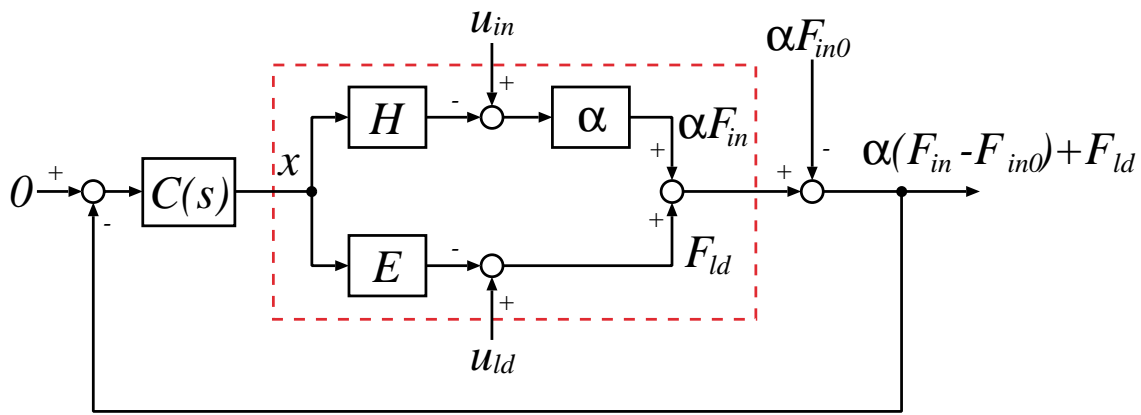


図 3.1: 力制御ベース法の 1 例

ただし、図 3.1 において、 $x_{ref} = x$ の理想的な位置制御系を仮定した。力制御ベース法を用いているパワーアシスト装置として代表的な、Kazerooni の “Extender” も図 3.1 のブロック図で表すことができる。力制御ベース法では、制御対象として (3.2), (3.3) 式の H, E を考慮にいれている。このため、人間や負荷の特性が分からないと制御系を設計できないこと、および、負荷が大きく変動する場合 (例えばいきなり無負荷になった場合) の安定性などが問題とされている。

また、負荷とロボットの関係における実現可能性は、表 3.1 の様に見える。表 3.2 におい

表 3.1: 力制御ベース法における実現可能・不可能の区別

	自由空間	負荷空間	拘束空間
アシスト比の制御	—		
操作性の実現	×	×	—

て、 — は実現可能であること、× は実現不可能であることを示す。

3.2 位置制御ベース型パワーアシスト法

位置制御をベースとした制御手法に、インピーダンス制御を用いる手法が存在する。インピーダンス制御とは、機械システムの機械的インピーダンスパラメータを能動的に制御する技術であり、目的とするインピーダンスパラメータを持った物体の挙動を模擬する制御ということができる。

このインピーダンス制御と位置制御を組み合わせることにより、パワーアシストを実現することを考えた手法がいくつかある。このような制御手法を一般化して位置制御ベース型パワーアシスト法と呼ぶことにする。(以下、位置制御ベース法と書く。) アシスト比制御が考えている制御系と違い、位置制御ベース法では次の制御系を考えている。

操作量 モータへのトルク指令値

制御対象 アシストアーム

この手法の利点は、オペレータと負荷の特性を考えずに制御系を設計できることである。

図 3.2 に代表的な位置制御ベース法のブロック図を示す。ここで、 T_h, T_e はそれぞれオペレータ、負荷がアームに加えるトルクを表す。図 3.2 において、 α はアシスト比、 C はイン

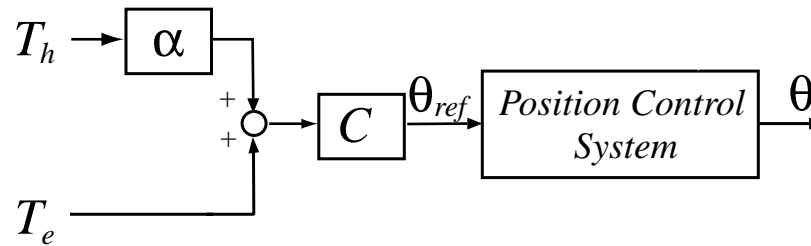


図 3.2: 位置制御ベース法の 1 例

ピーダンス制御器で (3.4) 式で表される。位置制御ベース法を用いた手法で代表的な仮想ツールも図 3.2 のブロック図で表すことができる。

$$C = \frac{1}{Ms^2 + Ds} \quad (3.4)$$

ここで、 M, D はインピーダンスパラメータである。また、 T_h は人間がロボットに加えるトルク、 T_e は負荷が人間がロボットに加えるトルクを表す。なお、パワーアシスト装置として動かす場合を想定しているため、(バネ定数) = 0 の場合について考えている。

位置決めサーボ系への位置指令値 θ_{ref} は (3.5) 式で表される。(1次元の場合)

$$\theta_{ref} = \frac{\alpha T_h + T_e}{Ms^2 + Ds} \quad (3.5)$$

自由空間では、 $T_e = 0$ となり、次の (3.6) 式が導かれる。

$$M\ddot{\theta}_{ref} + D\dot{\theta}_{ref} = \alpha T_h \quad (3.6)$$

また、拘束空間では、 $\ddot{\theta}, \dot{\theta} = 0$ となり (3.7) 式が導かれる。

$$\frac{T_e}{T_h} = \alpha \quad (3.7)$$

負荷空間では、(3.5) 式を変形して、次式のようなアシスト比となる。

$$\alpha = \frac{M\ddot{\theta}_{ref} + D\dot{\theta}_{ref} - T_e}{T_h} \quad (3.8)$$

つまり、負荷がない場合は入力を αT_h としてインピーダンス制御器により位置指令値を作り、負荷があり動いていない場合は、加えた力の α 倍のパワーアシストをする。どれに対し、負荷空間では、速度・加速度によりアシスト比は小さくなる。(3.7) 式はあくまで限られた場合であり、力制御ベース法のようにこの比の値が何らかの目標値になる訳ではない。つまり、 α をアシスト比の目標値とした制御ではない、ということに注意する必要がある。

これより、負荷とロボットの関係における実現可能性は、表 3.2 の様に書ける。表 3.2 において、 \square は実現可能であること、 \times は実現不可能であることを示す。拘束空間の場合、負荷からは、アシストアームの動きを拘束するためのあらゆる反力が返ってくるものと考えることができる。そのため、アシスト比はある程度保たれるものであると考えられるので、表 3.2 の右上隅は \square とした。

表 3.2: 位置制御ベース法における実現可能・不可能の区別

	自由空間	負荷空間	拘束空間
アシスト比の制御	—	×	
操作性の実現			—

3.3 本研究で用いる手法

上で述べたことを整理すると、次のことが分かる。

1. 力制御ベース法では、オペレータと負荷の特性が分からないと制御系を組めない。
2. 位置制御ベース法では、アシスト比は一定にならない。

また、表 3.1, 3.2 において、負荷空間をみると、

1. 力制御ベース法では、アシスト比は実現できるが、操作性は実現できない。
2. 位置制御ベース法では、操作性は実現できるが、アシスト比は実現できない。

ことが分かる。また、オペレータと負荷の特性を考えずに制御系を組むことが可能であること、ゆっくりと動かす場合が多いためアシスト比がある程度保たれるということの2点が、介護用のパワーアシスト装置という仕様に沿うと考えられる。よって、本論文では位置制御ベース法を用いて研究を行うことにする。

第4章 インピーダンス制御に基づく新しいパワーアシストの提案手法

4.1 ロバスト位置制御系

本研究では位置制御ベース法を用いる。ロバスト位置制御系としては図 4.1 に示すような、外乱オブザーバにより外乱に対してロバストにし、それを PID 制御器でフィードバックをかける、といった制御系を用いた。ここで、 P, P_n はプラントとそのノミナル値、 Q_{pos} はローパスフィルタ、 PID は PID 制御機を表す。

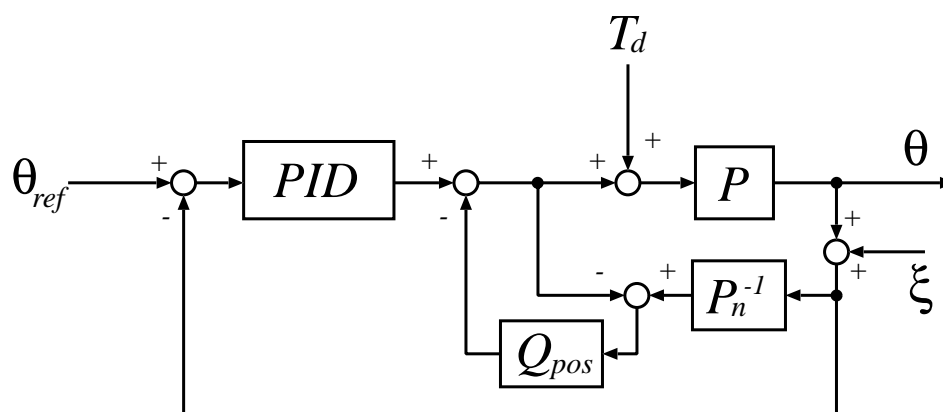


図 4.1: 位置制御系

PID 制御器のパラメータは真鍋の多項式により求めた。真鍋の多項式とは、上手に設計された制御系の特性方程式が持つべき形の 1 つである。実際にどんな形かということ、分母多項式を、

$$P(s) = \sum a_i s^i \quad (4.1)$$

とし、次式のように γ_i を定義する。

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}} \quad (4.2)$$

ここで、

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \dots = 2 \quad (4.3)$$

を満たせばよいというものである。また、

$$\tau = a_1 / a_0 \quad (4.4)$$

は等価定数といわれ、系が1次の場合は τ は本当の定数となる。安定条件は、次式で与えられる。

$$\gamma_i > 1.5 \left\{ \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \right\} \quad (4.5)$$

ここで、図 4.1 の制御系に実際に真鍋の多項式を与える。図中の PID は、

$$PID = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.6)$$

とかける。また外乱オブザーバ全体は P_n とみなすことができ、

$$P_n = J_n s + B_n \quad (4.7)$$

とかける。これより、分母多項式 $P(s)$ は、

$$P(s) = J_n s^3 + (K_d + B_n) s^2 + K_p s + K_i \quad (4.8)$$

となり、(4.3), (4.4) 式とあわせて、PID 制御器のパラメータをきめることができる。

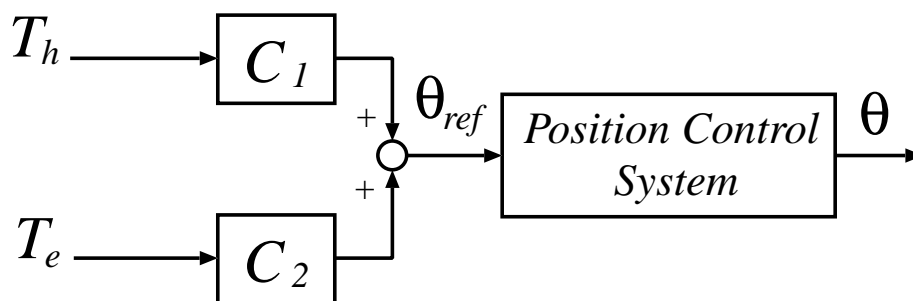


図 4.2: 双方向インピーダンス制御のブロック図

4.2 インピーダンス制御系

インピーダンス制御器は、オペレータ側、負荷側の両方に施したものをを用いる。(図 4.2) インピーダンス制御を、負荷側に施すことによって、負荷側の特性を自由に変えることができる。図 3.2 と比べると自分で設定できるパラメータが 1 つ増えていることが分かる。このようなインピーダンス制御を、双方向インピーダンス制御と呼ぶことにする。

図 4.2 において、 C_1, C_2 がインピーダンス制御器で次式で表される。

$$C_1 = \frac{1}{M_1 s^2 + D_1 s} \quad (4.9)$$

$$C_2 = \frac{1}{M_2 s^2 + D_2 s + K_2} \quad (4.10)$$

(4.9), (4.10) 式において、 M_1, D_1 が目標とするオペレータ側からのインピーダンスパラメータ、 M_2, D_2, K_2 が目標とする負荷側からのインピーダンスパラメータである。

両方向からのインピーダンス制御であるため、位置決めサーボ系への位置指令値 x_{ref} は (4.11) 式で表される。(1次元の場合)

$$\theta_{ref} = \frac{T_h}{M_1 s^2 + D_1 s} + \frac{T_e}{M_2 s^2 + D_2 s + K_2} \quad (4.11)$$

(4.11) 式を変換することにより、次の (4.13) 式が導かれる。

$$M_2 \ddot{\theta}_{ref} + D_2 \dot{\theta}_{ref} + K_2 \theta = \frac{M_2 s + D_2 + K_2}{M_1 s + D_1} T_h + T_e \quad (4.12)$$

ここで (4.13) 式において、 $\ddot{\theta}_{ref} \simeq 0, \dot{\theta}_{ref} \simeq 0, K_2 = 0$ の場合 (つまり、非常にゆっくりと動かす場合) を考えると

$$\frac{M_2 s + D_2}{M_1 s + D_1} T_h + T_e \simeq \frac{-T_e}{T_h} \quad (4.13)$$

となり、入力側のインピーダンスパラメータを軽く、負荷側のインピーダンスパラメータを重く設定することでパワーアシストが実現できる。ここで、インピーダンスパラメータの比は、ゆっくり動かすという限られた場合においてのアシスト比であると言える。(3.7) 式はあくまで限られた場合であり、アシスト比制御のようにこの比の値が何らかの目標値になる訳ではない。つまり、インピーダンスパラメータの比で表される値をアシスト比の目標値とした制御ではない、ということに注意する必要がある。しかしながら同時に、アシスト比を正確には指定できないまでも大まかには決めることができる、と言い換えることもできる。

第5章 外乱オブザーバによる力センサレス化

5.1 外乱オブザーバによる外乱の推定

上述のとおり、本研究ではパワーアシストを実現する手段として双方向インピーダンス制御を用いる。

ここで図 4.2 に外乱オブザーバを適用し、負荷から加わる力を推定することにより負荷側の力センサ省くことを考える。

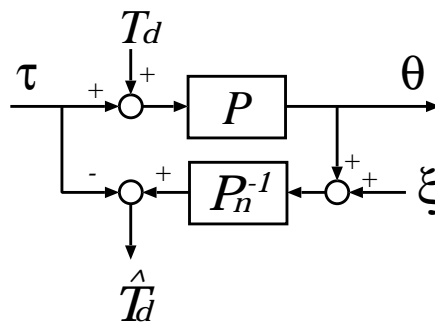


図 5.1: 外乱オブザーバのブロック図

一次元のモータで考えた場合の外乱オブザーバのブロック図を図 5.1 に示す。図 5.1 において、 P はモータの伝達関数、 P_n はモータの伝達関数のノミナル値、 T_d は外乱としてモータに入った外乱トルク、 θ はモータの出力である角度、 τ はモータへのトルク指令値、 ξ は観測雑音、 \hat{T}_d は外乱トルクの推定値である。

このときの、推定外乱の値は (5.1) 式で表される。

$$\hat{T}_d = T_d - \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{P_n} \right) \theta + \frac{1}{P_n} \xi \quad (5.1)$$

5.2 摩擦を考慮した負荷側トルクの推定

外乱オブザーバにより推定される外乱トルクは次式で表される。[9]

$$T_d = T_{int} + T_{ext} + F + D\dot{\theta} + (J - J_n)\ddot{\theta} + (B - B_n)\dot{\theta} \quad (5.2)$$

(5.2) 式において、 T_{int} は加速トルク以外の遠心力、コリオリ力の総和、重力の総和を足したものの、 T_{ext} は反作用トルクでロボットが力制御を行う際に受ける外力、 T_h, T_e がここに含まれる。 $F, D\dot{\theta}$ はモータを含めた駆動系に存在する機械的なクーロン摩擦トルク及び粘性摩擦トルクを表している。実際には摩擦トルクは非常に非線形な特性を持っているが、摩

擦トルクが存在を明確にするため、上記の近似式を用いている。ここで、推定したいトルクは、 T_e である。そのためには、推定された外乱トルクの中から他のトルクを差し引かなければならない。ここで、 $P = P_n$ とみなし、ある程度線形な加速トルク以外のトルクを P 同定する際に、 P_n のなかに含むとする。そのとき T_e は (5.2) 式を変形し、次式のように簡単に表すことができる。

$$T_e = \hat{T}_d - T_h - (F + D\dot{\theta}) \quad (5.3)$$

この中で、 T_h は力センサで測るので、推定するときに厄介な外乱トルクであるのは、非線形な特性を持つ摩擦トルクとなる。

第6章 実験による比較・検討

6.1 実験機の構成

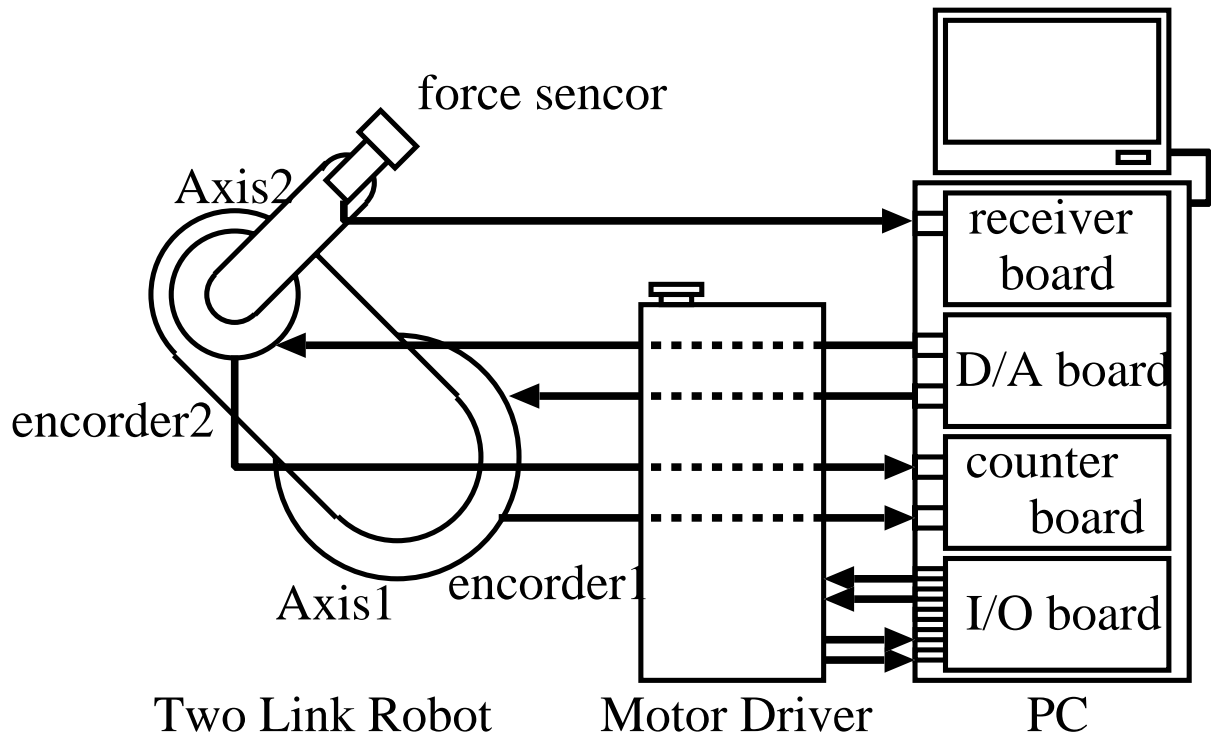


図 6.1: 実験機の構成

提案手法は、負荷側から加わるトルクを測る力センサをセンサレスにしたインピーダンス制御をおこなう。また、オペレータの加えるトルクは力センサで測り、それにインピーダンス制御を施す。負荷側のインピーダンスを重く、オペレータ側のインピーダンスを軽くすることで、パワーアシストが実現できる。この提案する手法の有効性を検証するため、2軸DDロボットを用いた実験を行った。オペレータからの入力トルクを測るための力センサはロボットの2軸の先端に取り付けた。実験システム全体の構成図を図6.1に示す。軸の位置は、ロボットのエンコーダーからカウンタボードを通してパソコンに取り込み、それを制御する。また、オペレータからの入力トルクは、ロボットの2軸の先端に取り付けた力センサからレシーバボードを通してパソコンに取り込み、それを入力とする。出力となるトルクは、D/Aボードを通してロボットにおくる。

ロボットの各パラメータは第1軸の長さが $L_1 = 0.359[m]$ 、第2軸の長さが $L_2 = 0.24[m]$ である。また、プラントの伝達関数のノミナルモデルは、電圧から位置までとし同定した

次式で表されるものを用いる。

$$P_n = \frac{1}{0.16s^2} \quad (6.1)$$

実験では、2軸DDロボットを用いているが、今回は1軸のみに制御をかけ、2軸はフリーにしている。実際の実験機の写真を図 6.2, 6.3, 6.4 に示す。



図 6.2: 実験機

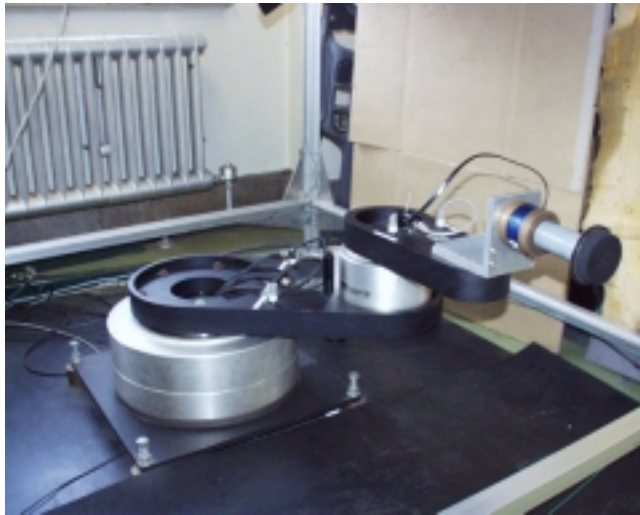


図 6.3: 2軸DDロボット

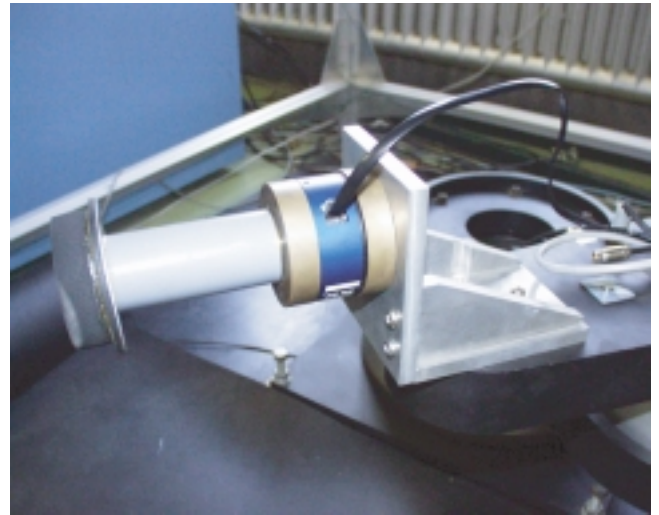


図 6.4: 力センサ

6.2 実験結果

提案するセンサレスパワーアシスト法は、図 5.1,(5.1) 式で示すような外乱オブザーバを適用し、負荷側から加えられる力を推定する制御系を考えると、図 6.5 のようなブロック図がかかる。

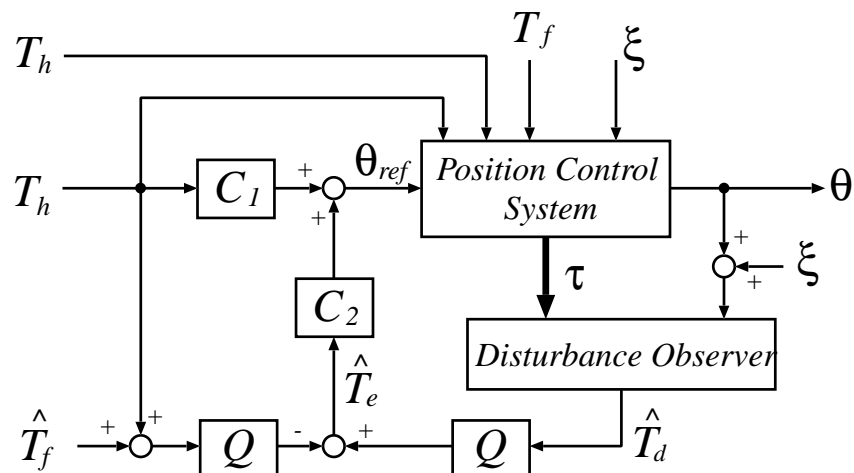


図 6.5: 入力されたトルクを推定する提案手法のブロック図

図 6.5 における Q は外乱オブザーバが内包するローパスフィルタを含むフィルタで、一般的にはバンドパスフィルタの形で与えられる。また図 6.5 における C_1, C_2 は、(4.9), (4.10) 式と同様に、オペレータ、負荷側からの目標とするインピーダンスパラメータによって決まる伝達関数で、 T_f は摩擦トルクを表す。

制御系としては、PID 制御器のパラメータは、真鍋の多項式により求めたものを用いる。第 4 章で述べた方法で $J_n = 0.16, B_n = 0, \tau = 0.1$ として計算する。 $J_n = 0.16, B_n = 0$ を (4.8) 式に代入すると

$$P(s) = 0.16s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i \quad (6.2)$$

となり、これより、

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{K_p^2}{K_i K_d} = 2.5 \\ \gamma_2 &= \frac{K_d^2}{0.16 K_p} = 2 \\ \tau &= \frac{K_p}{K_i} = 0.1 \end{aligned} \quad (6.3)$$

が求まる。これより、PID 制御器のパラメータは、 $K_p = 200, K_i = 2000, K_d = 8$ とした。

また、位置制御系の外乱オブザーバの Q_{pos} は、時定数 10[ms] とした 1 次のローパスフィルタを、トルク推定の外乱オブザーバの Q は、時定数 50[ms] とした 1 次のローパスフィルタを用いた。オペレータ側の制御器は、次式で与えた。

$$C_1 = \frac{1}{0.5s^2 + 20s} \quad (6.4)$$

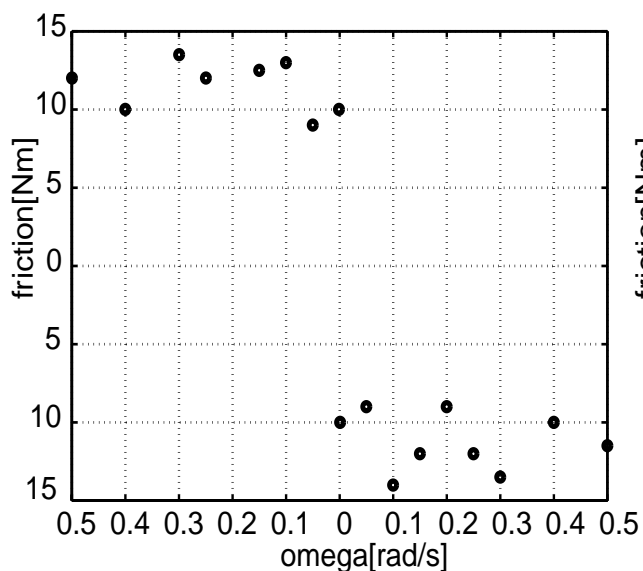


図 6.6: 摩擦の特性の実験結果

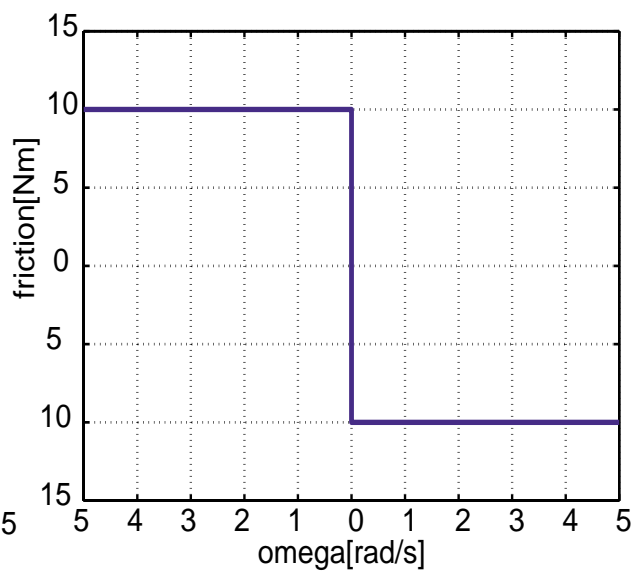


図 6.7: 摩擦の特性のモデル

負荷としては、重りを入れた段ボールと、ゴムを用いた。ゴムは特性がバネ定数だけである線形な負荷である。1本の場合と、2本並列に接続しバネ定数を2倍にした場合の2通りの実験をした。それに対し、よくわからない特性を持つ負荷として段ボールを用いた。この場合、ロボットとの接触面におけるへこみ、その重さ、地面との間にはたらく摩擦、など様々な要素が合わさった特性を持つ。

まず、摩擦トルクのモデル化をおこなう。本研究では負荷側からのトルクを外乱オブザーバにより推定するためである。推定された外乱の中で厄介なものが摩擦トルクであることは前に述べた。

ロボットの角速度を一定にしたときの外乱推定値を実験により求め、それをプロットしたものを図 6.6 に示す。摩擦トルクが角速度 0 付近で非線形な特性を持つこと、それ以外はほぼ一定の値を示すことがわかる。そこで本研究では、図 6.7 で示すような摩擦のモデルを用いる。

ロボットを正弦波の位置指令値で動かしたときの実験結果を、図 6.8 にしめす。 T_d が外乱推定値、 θ_{ref} が位置指令値、 θ がアームの位置、 ω が角速度を表す。位置制御がうまくいっており、摩擦のモデルが有効であることが見てとれる。

図 6.9 はこのモデルと (5.3) 式を用いて、無負荷のときに人間が加えた力を推定した実験結果である。 T_h は力センサによる測定値を表す。オブザーバの出力が力センサによる測定値にほぼ一致していることが分かる。

本研究では、人間からの入力トルクを力センサで、環境に及ぼす力をこの外乱オブザーバで推定する手法をとる。図 6.10 に人間の入力トルクにインピーダンス制御を施し、物体に力を及ぼした際の推定結果を示す。

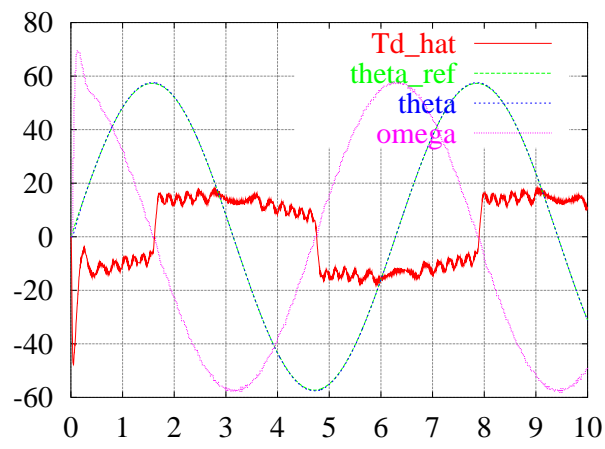


図 6.8: 外乱オブザーバによる摩擦トルクの推定

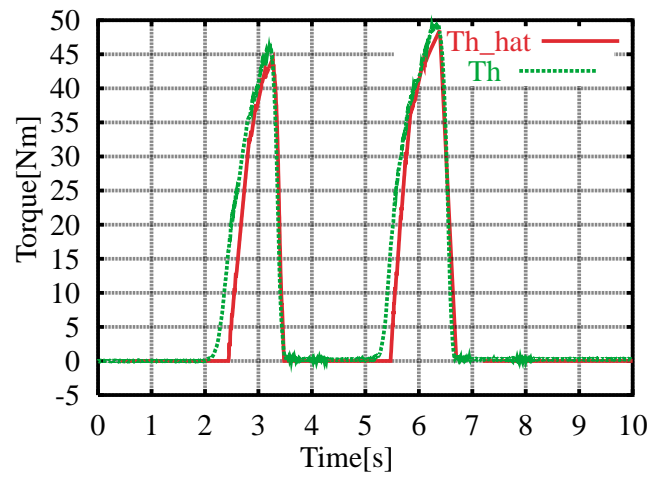


図 6.9: 外乱オブザーバによる入力側のトルクの推定

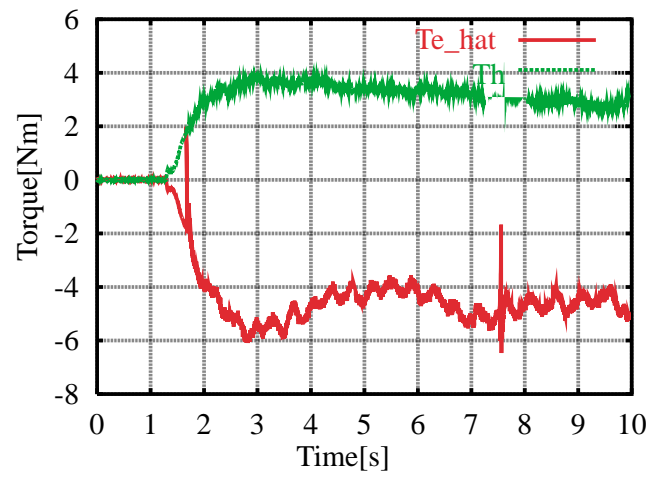


図 6.10: 負荷に及ぼすトルクの推定

次に提案する手法の有効性を示すため、4.13におけるアシスト比が3になるように、負荷側のインピーダンス制御器を、

$$C_2 = \frac{1}{1.5s^2 + 60s} \quad (6.5)$$

として、実験した結果を図6.11, 6.14, 6.17に示す。全ての負荷において、ゆっくりと動かしているため、ほぼ3倍のアシストが出来ていることが分かる。ゴムの方は線形な負荷のため位置も安定している。しかし、段ボールの場合においては負荷側からの反応が遅いため、負荷側からのトルクの推定値が、振動的になり、位置が安定していない。

次に、(6.5)式の M_2 だけを0.5に変えて、実験した結果を図6.12, 6.15, 6.18に示す。負荷側からの反応が速くなり、負荷側からのトルクの推定値も安定し、位置も安定していることが分かる。また、位置の立上りも遅くなっていることがわかる。言い替えると、より負荷を感じやすいといえる。アシスト比も最初は、3にはならないが、段々3にむかっている様子が見てとれる。

最後に、(6.5)式の K_2 だけを0.5に変えて、実験した結果を図6.13, 6.16, 6.19に示す。動き始めは、大きな力を要するが、負荷を保持する力が非常に小さくなっていっていることがわかる。これは、初めは負荷を感じる事ができ、段々軽く負荷を感じることを表していて、人間の感性に沿ったパワーアシストと言える。最初から負荷を感じる事がないと、オペレータの最初の入力トルクが負荷に関わらずに入れられるため、急激な移動が想定される可能性が大きいといえる。

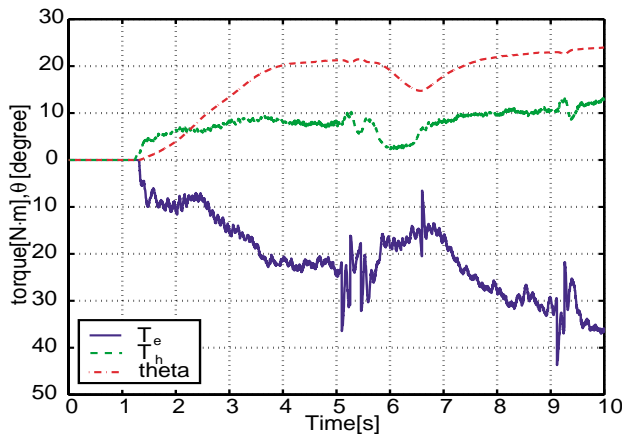


図 6.11: アシスト比が3となるインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: ゴム)

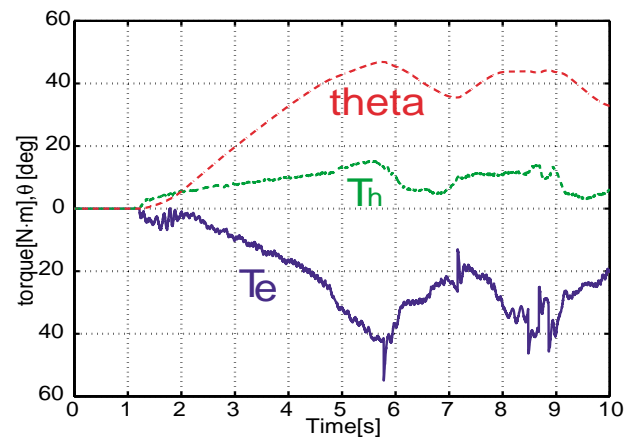


図 6.14: アシスト比が3となるインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: ゴム2本)

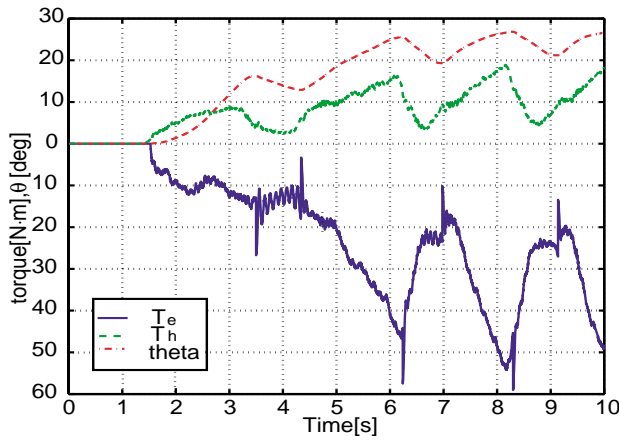


図 6.12: $M_2 = 0.5$ とした場合 (負荷: ゴム)

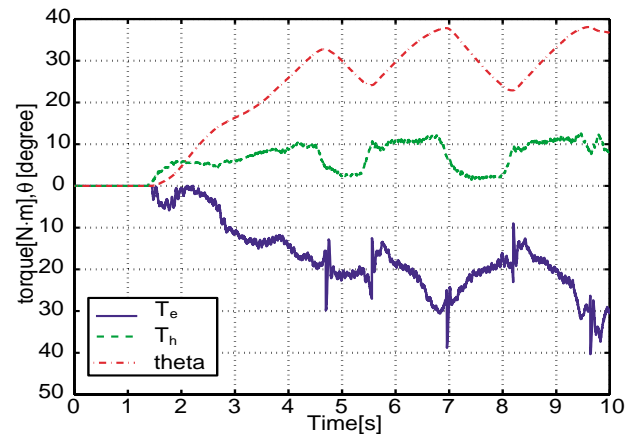


図 6.15: $M_2 = 0.5$ とした場合 (負荷: ゴム2本)

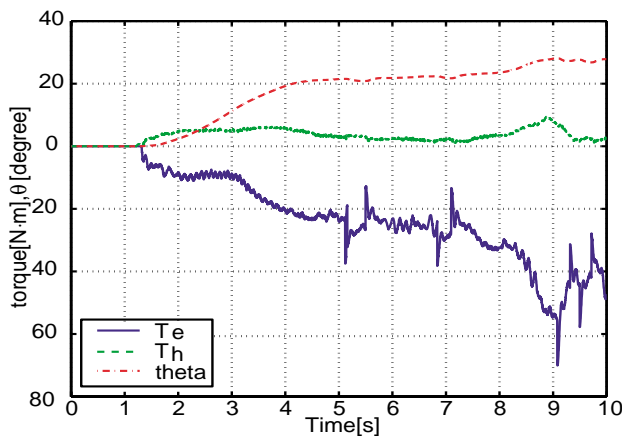


図 6.13: バネ定数を加えたインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: ゴム)

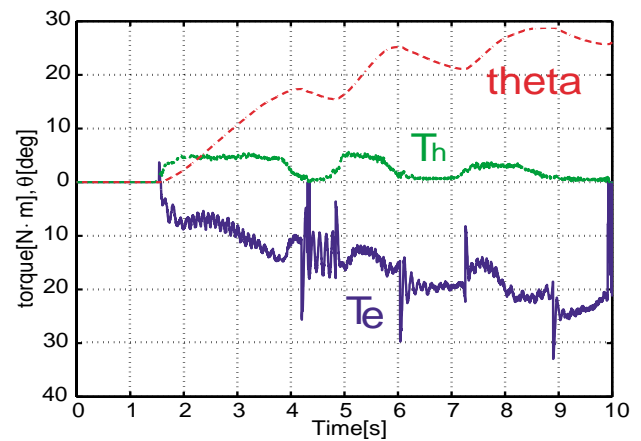


図 6.16: バネ定数を加えたインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: ゴム2本)

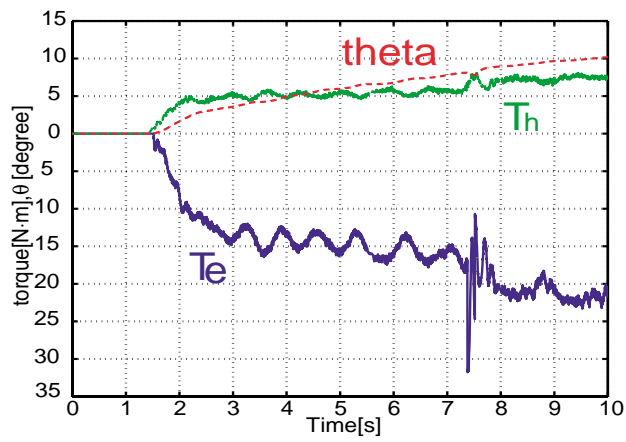


図 6.17: アシスト比が3となるインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: 段ボール)

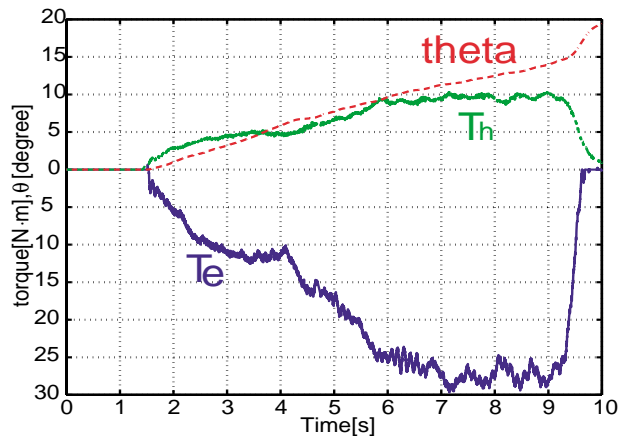


図 6.18: $M_2 = 0.5$ とした場合 (負荷: 段ボール)

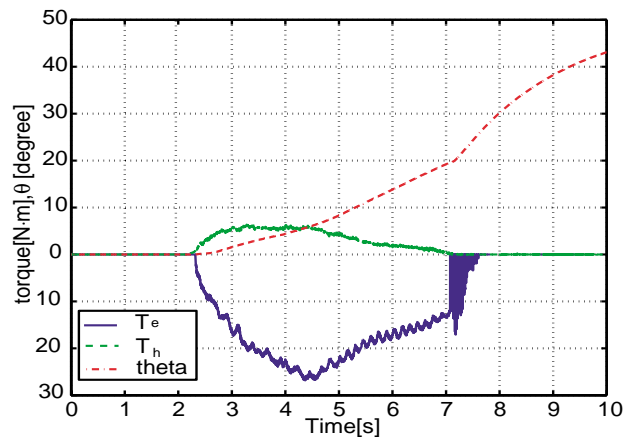


図 6.19: バネ定数を加えたインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: 段ボール)

第7章 結言

本論文では、高齢者に対する一支援として、また、応用の範囲が広い分野として、位置制御ベースによる負荷を考慮したセンサレスパワーアシスト法を提案した。

まず関連研究の紹介をし、パワーアシストを実現する際に必要となってくる事項を、負荷との関係を考慮して整理した。そして、制御の面からパワーアシストする手法の分類をし、負荷を考慮した際に必要となってくる事項に注目し、インピーダンス制御を用いた制御ベースによる制御手法をとった。

そこで、双方向からインピーダンス制御をかけることによりパワーアシストを実現する手法を提案した。この手法の大きな特徴はいろいろな負荷に対して、調節がきくところである。

加えて、外乱オブザーバにより負荷側の力を推定することで、力センサを1つ省く手法を用いた。その際に推定値から摩擦トルクだけを差し引くことで、負荷側の力を推定できることを示した。これにより、負荷が人間であったとき、パワーアシスト装置のどこにあたって安全な制御が実現できる。

最後に、実験によりこの手法の有効性を検証した。負荷側のインピーダンス制御器のパラメータを変えることによって、いろいろな特性を持つ負荷に対して安定な制御ができることを示した。

本論文では、1軸のみを使用して実験を行ったが、一軸では可動範囲が狭い上、単純な動きしかできない。パワーアシストロボットの実現を考えるとこの手法の多軸への応用が必要であるが、これは今後の課題とする。

参考文献

- [1] H.Kazerooni: “Extender: A Case Study for Human-Robot Interaction via Transfer of Power and Information Signals” IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 10-20, 1993
- [2] 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男: “仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御”, 機械学会論文集 C, Vol. 60, No. 572, pp. 1337-1343, 1994.
- [3] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 谷江和雄: “人間とロボットによる長尺物の協調運搬 ~並進力のみによる操作の実現~”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 399-400, (1999).
- [4] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 谷江和雄: “仮想非ホロノミック拘束による人間とロボットの協調搬送”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '99, 1p2-75-106, (1999).
- [5] K. Nagai, I. Nakanishi, S. Kawamura, M. Makikawa, N. Tejima: “Development of an 8 DOF robotic orthosis for assisting human upper limb motion”, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3486-3491, (1998).
- [6] K. Nagai, I. Nakanishi: “Power Assist Control of robotic orthoses with macro-micro structure in human care”, *Proc. of IEEE int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1049-1054, (1999).
- [7] 林原靖男, 谷江和雄, 荒井裕彦, 渡嘉敷浩樹: “パワーアシスト装置の研究”, 機械技術研究所所報, Vol. 53, No. 5, pp. 175-186, 1999.
- [8] 谷 理範, 堀 洋一: ”ロバスト安定性を考慮したセンサレスパワーアシストロボットに関する基礎研究”, 産業計測制御学会, pp. 109-114, 2001.
- [9] 村上俊之, 大西公平: ”外乱オブザーバによる他自由度ロボットの動特性同定法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 131-139, 1993.
- [10] 堀洋一, 大西公平: “制御工学の基礎”, 丸善, 1997.
- [11] 堀洋一, 大西公平: “応用制御工学”, 丸善, 1998.

発表文献

[1] 磯将人, 関弘和, 堀洋一: “負荷特性に応じたインピーダンス制御を用いたセンサレスパワーアシスト法”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-02-40, 2002(発表予定).

謝 辞

私が堀研究室に一年という短い間ながら所属することになったのも、何かの縁、皆さんと出会えたことを嬉しく思うとともにこうして謝辞がかけるのも、堀研究室諸兄のおかげだと思っております。ここに、各人へ御礼の言葉を述べさせていただきます。

堀洋一教授には、この一年いろいろお世話になりました。制御の理論だけでなく、論理の組み立て方を学びました。時に厳しく、時にやさしくご指導頂きここに深く感謝します。

内田利之技官には、電気工学に関する様々な知識を学びました。ここに深く感謝します。

研究員のチャンダン・チャクラボラティさん、宋申民さんには、研究テーマについて、また故郷のことなど、興味深いお話を聞かせて頂きました。博士課程3年の及部七郎齋さんには、研究室に入りたてで何もわからない時分に研究に取り組む姿勢といったものを教えて頂きました。ここに深く感謝します。

博士課程2年の関弘和さんには、本当にお世話になりました。こうして卒業論文を書くことができたのも、親身に私の研究のことを心配して頂いたおかげだと思っております。ここに深く感謝します。

博士課程1年の呉世訓さんには、一緒に過ごしたのは2ヵ月程でしたが、Matlabの使い方などを御指導頂きました。同じく博士課程1年の馬澄斌さんには、地下の実験室で気軽に話かけて頂きました。ここに深く感謝します。

修士課程2年の坂東信尚さんには、UNIXMASTERの実力をかいま見ました。ここに深く感謝します。

同じく修士課程2年の畠直輝さんには、PC関連のことを色々教えて頂きました。また、忙しいにも関わらず私の不用意なミスにも対応して頂き、ここに謝罪の意を表すとともにここに深く感謝します。

修士課程1年の井上友子さんは、中間報告のときに添削して頂きました。同じく修士課程1年の呉俊徳さんは、ピンポンロボット頑張ってください。同じく修士課程1年の岡野隆宏さんは、研究のコツを学びました。同じく修士課程1年の戴建華さんには、研究室対抗バスケのときに骨を折るまで頑張ってください。この出来事は忘れられません。同じく修士課程1年の張炳勳さんには、席が近いこともあり、研究以外のことでも色々お話をさせて頂きました。ここに深く感謝します。

卒論生の大埜健君、佐藤仁彦君、高橋啓君、長瀬啓明君は、共に研究を進める同志であり、心の支えになりました。ここに深く感謝します。

秘書の木村麻里子さんには、お茶の時間にはお菓子やコーヒーを用意して頂きここに深く感謝します。

皆さんどうもありがとうございました。