

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

磯 将人*, 関 弘和, 堀 洋一 (東京大学)

Sensorless power assist method using impedance control considering load characteristics

Masahito Iso, Hirokazu Seki, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

Aging problem is becoming more and more serious in Japan. Power assist technique is very useful in various cases such as assisting for aged people's work and for carer's motion. In this paper, as one of such supports, a sensorless power assist system based on impedance control is proposed.

In this method, impedance controllers are respectively designed to imposed force by human and operated force to environment considering characteristic of the load. In addition, either of these forces can be measured without force sensor using disturbance observer. Some experimental results show the effectiveness of the proposed method.

キーワード: パワーアシスト装置, インピーダンス制御, カセンサレス, 外乱オブザーバ, 負荷特性

(Keywords: power assist system, impedance control, force sensorless, disturbance observer, characteristic of load)

1 はじめに

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。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。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。

我々は、「福祉制御工学」という分野を提唱し、その工学的支援の可能性を検討している。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。

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、本論文では、パワーアシスト法の一つとして、負荷特性を考慮したセンサレスパワーアシスト法を提案する。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つにする手法を提案している。

2 パワーアシストの基礎的事項とそれに伴う分類

2.1 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する。

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、(1) 式のように定義する。

$$(\text{アシスト比} : \alpha) = \frac{F_{ld}}{(F_{in} - F_{in0})} \quad (1)$$

(1) 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。

2.2 パワーアシストにおける負荷

2.2.1 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1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。

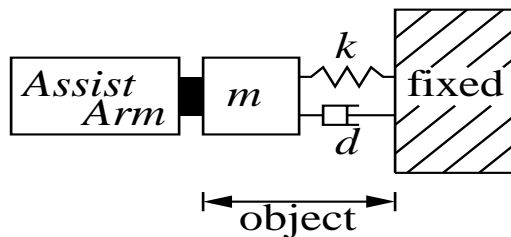


図1: 線形な負荷のモデル

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。

2.2.2 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、かつアシストアームが動いている場合。

負荷空間 負荷があり、かつアシストアームが動いている場合。

拘束空間 負荷があり、かつアシストアームが動いていない場合。

なお、無負荷で、かつアシストアームが動いていない場合は考えないこととする。

2.3 パワーアシストにおける制御手法の分類

2.3.1 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。

$$\alpha(F_{in} - F_{in0}) + F_{ld} \rightarrow 0 \quad (2)$$

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。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) 式の運動方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned} u_{in} - F_{in} &= M\ddot{x} + D\dot{x} + K(x - x_0) \\ &= H(x) \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 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) 式と同様に (4) 式の運動方程式が成り立つ。

$$u_{ld} - F_{ld} = E(x) \quad (4)$$

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2が考えられる。ただし、図2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” [1] も図2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)、(4) 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1の様に書ける。表2において、 \circ 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。

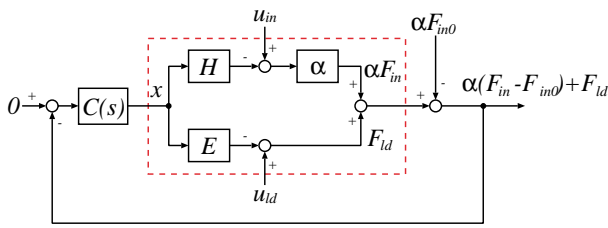


図 2: 力制御ベース法の 1 例

表 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	×	×	—

2.3.2 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 [2][3][4][5]。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。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

制御量 アシストアームの位置、速度、加速度等の挙動

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 に代表的な位置制御ベース法のブロック図を示す。図 3 において、 α はアシスト比、 C はインピーダ

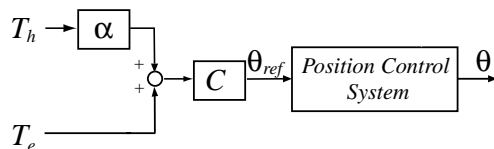


図 3: 位置制御ベース法の 1 例

ンス制御器で (5) 式で表される。

$$C = \frac{1}{Ms^2 + Ds} \quad (5)$$

ここで、 M, D はインピーダンスパラメータである。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 (6) 式で表される。(1次元の場合)

$$\theta_{ref} = \frac{\alpha T_h + T_e}{Ms^2 + Ds} \quad (6)$$

負荷がない場合は、 $T_e = 0$ となり、次の (7) 式が導かれる。

$$M\ddot{\theta}_{ref} + D\dot{\theta}_{ref} = \alpha T_h \quad (7)$$

また、負荷がありアシストアームが動いていないときは、 $\dot{\theta}, \ddot{\theta} = 0$ となり (8) 式が導かれる。

$$\frac{T_e}{T_h} = \alpha \quad (8)$$

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。(8) 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 2 の様に書ける。表 2 において、 \times は実現可

表 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			—

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 2 の右上隅はとした。

2.3.3 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 1, 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。

3 カセンサを減らした新しいパワーアシスト手法の提案

3.1 ロバスト位置制御ベースのインピーダンス制御

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。

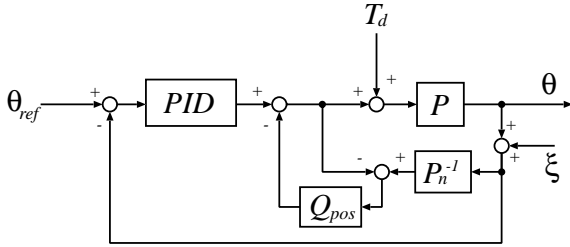


図4: 位置制御系

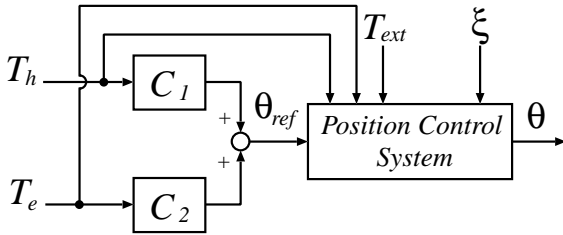


図5: 双方向インピーダンス制御のブロック図

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5)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5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。

$$C_1 = \frac{1}{M_1 s^2 + D_1 s} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{1}{M_2 s^2 + D_2 s + K_2} \quad (10)$$

(9), (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(11)式で表される。(1次元の場合)

$$x_{ref} = \frac{F_{in}}{M_1 s^2 + D_1 s} + \frac{F_{ld}}{M_2 s^2 + D_2 s + K_2} \quad (11)$$

(11) 式を変換することにより、次の(13)式が導かれる。

$$\begin{aligned} & 2\ddot{x}_{ref} + D_2 \dot{x}_{ref} + K_2 x \\ &= \frac{M_2 s + D_2 + K_2}{M_1 s + D_1} F_{in} + F_{ld} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで(13)式において、 $\ddot{x}_{ref} \approx 0, \dot{x}_{ref} \approx 0, K_2 = 0$ の場合(つまり、非常にゆっくりと動かす場合)を考えると

$$\frac{M_2 s + D_2}{M_1 s + D_1} F_{in} + F_{ld} \approx 0 \quad (13)$$

となるため、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。(8)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。

3.2 外乱オブザーバによるカセンサレス化

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5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カセンサ省くことを考える。

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6に示す。図6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(14)式で表される。

$$\hat{T}_d = T_d - \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{P_n} \right) \theta + \frac{1}{P_n} \xi \quad (14)$$

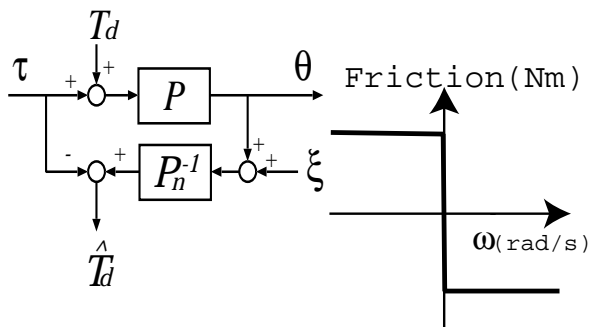


図 6: 外乱オブザーバのブロック図

図 7: 摩擦の特性のモデル

また、外乱トルクは次式で表される。[6]

$$T_d = \tau + T_{ext} + F + D\dot{\theta} \quad (15)$$

(15) 式において、 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、 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、摩擦トルクは図 7 に示すような非線形な特性を持っているが、摩擦トルクの存在を明確にするため、上記の近似式を用いている。図 8 は上式を用いて、人間が加えた力を推定した実験結果である。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。

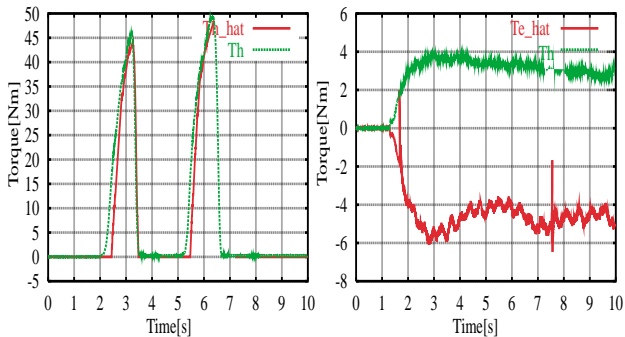


図 8: 外乱オブザーバによる 図 9: 負荷に及ぼす力の推定
負荷側のトルクの推定

図 6, (14) 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 10 のようなブロック図がかけられる。

図 10 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 10 における C_1, C_2 は、(9), (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ある。

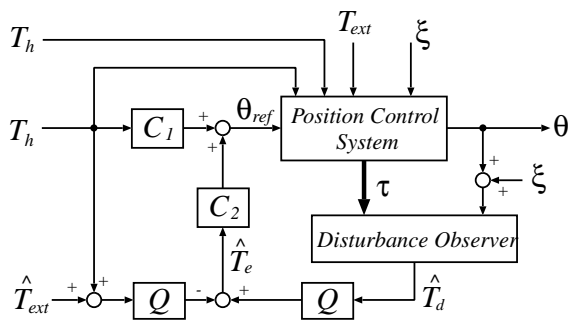


図 10: 入力されたトルクを推定する提案手法のブロック図

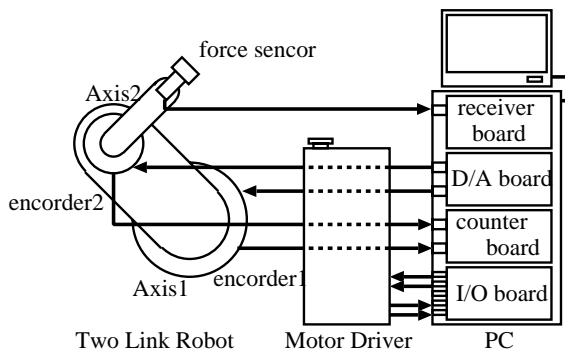


図 11: 実験機の構成

4 実験による比較・検討

4.1 実験機の構成

提案する設計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、力センサをロボットの 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 11 に示す。ロボットの各パラメータは第 1 軸の長さが $L_1 = 0.359[\text{m}]$ 、第 2 軸の長さが $L_2 = 0.24[\text{m}]$ である。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。

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た。また、位置制御系の外乱オブザーバの Q_{pos} は、時定数 $10[\text{ms}]$ 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 $50[\text{ms}]$ 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。

$$C_1 = \frac{1}{0.5s^2 + 20s} \quad (16)$$

負荷としては、重りを入れた段ボールと、ゴムを用いた。

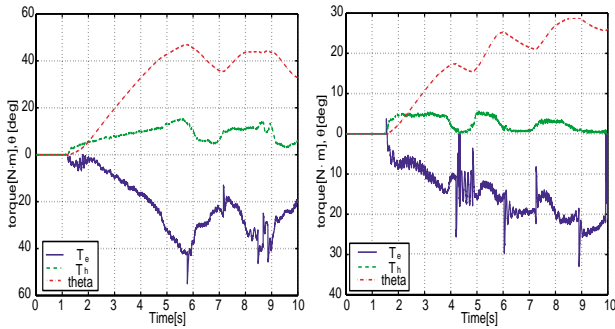


図 12: アシスト比が 3 となるインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: ゴム) 図 13: バネ定数を加えたインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: ゴム)

4.2 実験結果

まず、(13) 式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、

$$C_2 = \frac{1}{1.5s^2 + 60s} \quad (17)$$

として、実験した結果を図 12 に示す。負荷は、簡単な特性を持つものとしてゴムを用いた。これは特性がバネ定数だけである線形な負荷である。ロボットが安定に動いており、また、ほぼ 3 倍のアシストが出来ていることが分かる。

より理想的なパワーアシストを実現するため、負荷を感じるのは最初だけにするように、負荷側のインピーダンス制御器に K を用いた実験の結果を図 13 に示す。負荷側のインピーダンス制御器は次式で与えた。

$$C_2 = \frac{1}{1.5s^2 + 60s + 30} \quad (18)$$

動き始めは、大きな力を要するが、段々軽くなっていく様子が見てとれる。

次に、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。(17) 式の制御器を用いて、実験した結果を図 14 に示す。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。しかし、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、(17) 式の M_2 だけを 0.5 に変えて、実験した結果を図 15 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。

5 まとめ

本論文では、パワーアシストの設計法の 1 つとして、オペレータからの入力トルクと負荷側からのトルクにそれぞれインピーダンス制御をほどこすことにより、安定でかつ自然なパワーアシストを実現する手法

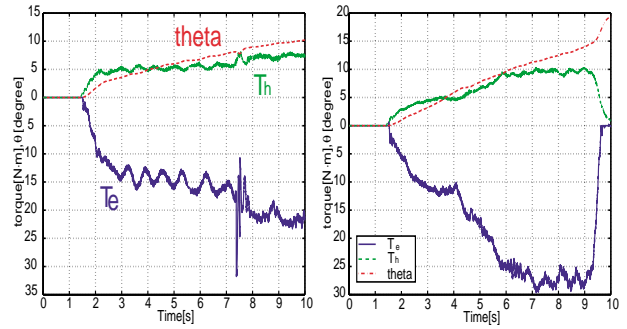


図 14: アシスト比が 3 となるインピーダンス制御をほどこした場合 (負荷: 段ボール) 図 15: $M_2 = 0.5$ に変えた場合 (負荷: 段ボール)

を提案した。この手法の大きな特徴はいろいろな特性を持つ負荷に対して、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。これにより、負荷が人間であったとき、ロボットのどこにあたって安全な制御が実現できる。また、実験によりこの手法の有効性を検証した。本研究では、力制御ベース型パワーアシスト法との実験による比較検討を行わなかったが、これは今後の課題である。

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] 谷江和雄, 林原靖男: "機械の柔らかい制御", 計測と制御, Vol. 34, No. 4, pp. 274-280, 1995.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 谷 理範, 堀 洋一: "ロバスタ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.
- [6] 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.
- [7] 堀洋一, 大西公平: "制御工学の基礎", 丸善, 1997.
- [8] 堀洋一, 大西公平: "応用制御工学", 丸善, 1998.