

- 博士論文 -

高齢者支援を目的とした計測制御システムの研究
- 福祉制御工学の確立を目指して -

Research on Measurement and Control System
Aiming at Support for Elderly People
- Towards Establishment of Welfare Control Engineering -

指導教官 堀 洋一 教授

東京大学 大学院工学系研究科 電気工学専攻

07111 関 弘和

2002年12月

目次

第1章	福祉制御工学の確立を目指して	1
1.1	福祉制御工学の提唱とその背景	1
1.1.1	福祉制御工学の提唱	1
1.1.2	我が国における高齢化の現状とその影響	2
1.1.3	福祉制御工学の目指すもの	3
1.2	福祉工学のいま	4
1.2.1	福祉工学の目指すもの	4
1.2.2	関連学会はいま	4
1.2.3	福祉・介護ロボット開発の現状	5
1.2.4	移動支援技術の現状	6
1.2.5	実際に聞いたこと・感じたこと～福祉機器ユーザの声～	11
1.3	本論文の目的	13
1.3.1	福祉制御工学の確立を目指して	13
1.3.2	人間と計測制御システムのより良い関係性とは	13
1.4	本論文の構成	14
第2章	高齢者支援を目指したパワーアシストロボットとその制御	15
2.1	パワーアシスト動作に登場する三者<操作者・機器・環境>	15
2.2	パワーアシスト技術の定義と要求	16
2.3	高齢者支援を目的としたパワーアシスト技術に関するこれまでの研究例	17
2.4	高齢者支援を目的としたパワーアシストロボットとその制御手法の分類	19
2.4.1	パワーアシストロボットに関する研究例	19
2.4.2	用途と制御手法に基づくパワーアシスト形態の分類	20
2.4.3	パワーアシスト制御における環境の変動	21
2.5	外乱オブザーバを用いた力センサレスパワーアシストロボットの実現	23
2.5.1	力センサを用いないパワーアシストロボットの可能性	23
2.5.2	外乱オブザーバの原理と特性	24
2.5.3	摩擦トルクの同定とその補償	25
2.5.4	ロボットへの作用トルクの推定法	25
2.6	本研究で用いる実験装置の構成	26
2.7	パワーアシスト動作の評価法	27
2.7.1	数学的表現によるパワーアシスト動作の評価	27
2.7.2	被験者を用いたパワーアシスト動作の評価	27

第3章	操作者・ロボット・環境間のインタラクションに注目したパワーアシストロボットの制御法	28
3.1	三者間のインタラクションを考慮する必要性と要求項目	28
3.2	アシストするのは位置か力か	28
3.2.1	両者のアシスト動作における役割	28
3.2.2	位置制御ベース手法と力制御ベース手法の定義	29
3.3	力制御系に内包されるロバスト位置制御系の構造と特性	31
3.4	パワーアシストにおける環境とその負荷特性	33
3.4.1	パワーアシスト動作におけるさまざまな環境とその負荷特性	33
3.4.2	外乱オブザーバを用いた環境との作用力の推定	33
3.4.3	実験に用いる環境とその負荷特性	33
3.5	位置制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御	36
3.5.1	位置制御ベース型パワーアシスト法の基本構成とその特徴	36
3.5.2	仮想ツールダイナミクスによる手法	36
3.5.3	双方向インピーダンス制御を用いたパワーアシスト法	39
3.6	力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御	46
3.6.1	力制御ベース型パワーアシスト法の基本構成とその特徴	46
3.6.2	単純フィードバック制御系による力制御ベース型パワーアシスト	47
3.6.3	環境オブザーバを用いたロバスト力制御系	56
3.6.4	環境オブザーバを用いたパワーアシスト制御	57
3.6.5	インピーダンス制御を導入した力制御ベース型パワーアシスト制御	68
3.7	被験者を用いた各手法の評価実験	70
3.7.1	被験者を用いたアンケート評価の方法	70
3.7.2	環境オブザーバの効果に関する評価実験	71
3.7.3	位置制御ベースと力制御ベースの比較実験	74
3.7.4	環境変動を感じる実験	76
3.8	高齢者支援に対する上記手法の考察	79
3.9	まとめと今後の課題	81
3.9.1	本章のまとめ	81
3.9.2	今後の課題と可能性	82
第4章	操作者が感じる操作性の向上を目指したパワーアシストロボットの制御法	83
4.1	操作性向上における要求事項	83
4.2	インピーダンス制御の原理とその実現手法	83
4.2.1	インピーダンス制御の原理と特性	83
4.2.2	操作者の入力トルクの推定	84
4.2.3	力センサを用いないインピーダンス制御の実現	85
4.3	可変インピーダンスを用いたパワーアシストロボットの操作性の向上	87
4.3.1	インピーダンスパラメータの役割	87
4.3.2	可変インピーダンスによる操作性の向上	88
4.4	可変インピーダンスを用いたパワーアシスト制御の被験者評価による解析	91
4.4.1	被験者を用いたアンケート評価の方法	91
4.4.2	各アシスト制御法に対する被験者評価	92
4.4.3	評価結果に基づく考察	94

4.5	慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法	95
4.5.1	慣性変動の意味とその影響	95
4.5.2	慣性変動とインピーダンスパラメータの安定性における解析	95
4.5.3	慣性モーメントの同定法	104
4.5.4	慣性同定に基づくパワーアシスト法	105
4.6	まとめと今後の課題	108
4.6.1	本章のまとめ	108
4.6.2	今後の課題と可能性	109
第5章	電動パワーアシスト車椅子の現状と多側面からの解析	110
5.1	パワーアシスト車椅子の現状と背景	110
5.1.1	パワーアシスト車椅子の登場と期待	110
5.1.2	パワーアシスト車椅子の基本的なアシスト手法	110
5.1.3	パワーアシスト車椅子に要求されるもの	112
5.2	パワーアシスト車椅子に関わるさまざまな問題点	113
5.3	パワーアシスト車椅子の数学的運動モデル	115
5.4	実験用パワーアシスト車椅子の製作	118
第6章	電動パワーアシスト車椅子の新しいアシスト制御法の検討	119
6.1	パワーアシスト車椅子の基本構成とアシスト制御法の分類	119
6.2	トルク制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法	120
6.2.1	トルク制御ベース型アシスト手法の定義	120
6.2.2	惰性走行を考慮したトルク制御ベース型パワーアシスト法	121
6.2.3	実機を用いた走行実験	122
6.3	位置制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法	125
6.3.1	位置・速度制御ベース型アシスト手法の定義	125
6.3.2	位置制御ベース型アシスト手法の制御系設計	126
6.3.3	実機を用いた走行実験	128
6.4	慣性制御に基づくパワーアシスト車椅子のアシスト制御法	131
6.4.1	慣性制御の実現方法	131
6.4.2	パワーアシスト車椅子のアシスト走行制御への適用	132
6.4.3	シミュレーションによる検討	133
6.5	まとめと今後の課題	134
6.5.1	本章のまとめ	134
6.5.2	今後の課題と可能性	134
第7章	様々な走行場面に対応する電動パワーアシスト車椅子の多機能制御法	136
7.1	後方転倒防止を考慮したパワーアシスト車椅子の走行制御とその実験的検討	136
7.1.1	パワーアシスト車椅子走行時の後方転倒の危険性	136
7.1.2	後方転倒防止を目指したアシスト制御手法	137
7.1.3	被験者を用いたアンケート評価実験	141
7.1.4	アンケート評価実験に対する考察	145
7.2	後方転倒防止を考慮したウィリー動作の実現	146
7.2.1	操作者の入力トルクの解析	146
7.2.2	ウィリー動作の実現手法	147

7.2.3	入力トルク制限による後方転倒防止の実現	149
7.2.4	被験者を用いたウィリー動作実験	150
7.3	まとめと今後の課題	152
7.3.1	本章のまとめ	152
7.3.2	今後の課題と可能性	152
第8章	高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた人間の異常動作検出	154
8.1	カメラを用いた高齢者モニタリングシステムの提案	154
8.2	モニタリングシステムの必要性和背景	155
8.3	カメラ画像による高齢者の異常動作検出	156
8.4	画像系列を用いた人間の動作解析	158
8.4.1	人間の動作解析法の例	158
8.4.2	カメラで検出できる非日常性の分類	158
8.4.3	固有空間法による画像間の距離の抽出	158
8.4.4	固有空間法における学習パターン数について	162
8.4.5	非日常性検出の流れ	163
8.5	正常な動作パターンの学習方法	164
8.5.1	自己組織化マップを用いた代表的な動作の抽出	164
8.5.2	固有空間法による動作の分類	166
8.5.3	2段階固有空間法による動作解析	168
8.5.4	動作ごとの注目領域の決定方法	169
8.5.5	正常な動作パターンの表現	169
8.6	非日常的な動きの検出手法と実験的検証	169
8.6.1	学習にない動きの検出	169
8.6.2	動きの速さと方向の検出	173
8.6.3	非日常的行動パターンの検出	175
8.7	まとめと今後の課題	176
8.7.1	本章のまとめ	176
8.7.2	今後の課題と可能性	177
第9章	カメラ画像を用いた産業用ロボットの異常動作検出	179
9.1	カメラを用いた産業用ロボットモニタリングシステムの提案	179
9.2	カメラを用いた産業用ロボットの異常動作検出	180
9.2.1	モニタリングシステムの実現イメージ	180
9.2.2	カメラで検出可能なロボットの異常動作の分類	181
9.2.3	実験装置の構成と撮影画像	181
9.3	正常な動きの学習	183
9.4	異常な動きの検出	184
9.4.1	固有空間法に基づくロボットの異常動作検出法	184
9.4.2	パラメトリック固有空間法に基づくロボットの速度異常検出	186
9.5	具体的な異常動作検出例	193
9.5.1	オーバーシュート・振動	193
9.5.2	速度異常・停止	194
9.6	まとめと今後の課題	196
9.6.1	本章のまとめ	196

目次

9.6.2 今後の課題と可能性	196
第10章 結言	200
10.1 本論文のまとめ	200
10.1.1 福祉制御工学の確立を目指して	200
10.1.2 人間と計測制御システムのより良い関係性の構築	201
10.2 各研究項目における結論と今後の課題	202
10.2.1 高齢者支援を目指したパワーアシストロボットの制御	202
10.2.2 電動パワーアシスト車椅子のアシスト制御法と様々な走行場面に対応する多機能制御法	202
10.2.3 非日常性検出を目指した高齢者モニタリングシステム	203
10.2.4 産業用ロボットの異常動作を検出するモニタリングシステム	203
10.3 将来にむけての福祉機器	204
10.4 福祉工学と福祉制御工学の将来	206
参考文献	207
研究業績	215
謝辞	217
付録A 主成分分析法	218
A.1 主成分分析とKL展開	218
A.2 主成分分析のデータと目的	218
A.3 主成分の導出	219
付録B 固有値と固有ベクトルの計算法	222
B.1 べき乗法による固有値の計算	222
B.2 特異値分解を用いた固有ベクトルの計算	223
付録C 黄金分割法	225
付録D 各実験装置の詳細	226
D.1 2軸DDロボットとその周辺装置について	226
D.2 画像キャプチャシステムについて	228
D.3 電動パワーアシスト車椅子について	229

内容梗概

本論文では、「福祉制御工学」という新しい学問体系を確立することを目指し、その第一歩を踏み出す。本研究では大きく分けて三つの研究項目を設けている。高齢者支援を目的としたパワーアシストロボットの制御法、電動パワーアシスト車椅子の多機能制御法、高齢者の非日常的動作を検出するモニタリングシステムの提案とその産業用ロボットモニタリングへの応用である。

最初に、高齢者支援技術として様々な可能性をもつパワーアシストロボットについて、用途と制御手法に基づき分類・整理するとともに、位置でアシストするか力でアシストするかという本質的な議論も含めて新しい手法を提案している。特に福祉的応用を意識した場合に要求される項目として、力の増幅や操作性だけでなく、環境の情報を操作者にいかに感じさせるかという点や多くの設計自由度をもち様々な状況に対応させるというこれまでにない観点から制御系を設計し、実験的検討を通してその有効性を確認している。人間と協調して走行する電動パワーアシスト車椅子は、使用者の活動範囲を広げるものとして期待が大きい。これまであまり議論されなかった様々な走行場面に対応するためのアシスト制御法や後方転倒を防止する安全な走行制御法を提案し、製作した実機による検討を行っている。これら人間機械協調系モーションコントロールの一つの枠組を確立することを目指し、多くの被験者を用いたアンケート評価実験による解析を通してこのような様々な提案手法の優位性や特徴を見出すとともに、協調制御系設計の指針を明らかにしている。また計測技術を用いた支援として、高齢者の非日常動作をカメラ画像を用いて自動的に検出するモニタリングシステムとそのアルゴリズムを提案し、さらに福祉の枠を越えて広く用いられるシステムとしての一可能性として、産業用ロボットの異常動作を検出するモニタリングシステムに応用する。

「福祉」という人間の主観や内面的要素が深く関与するものと「制御工学」という客観的なものを結びつける一つの基準を見出すことができたことが「福祉制御工学」の第一歩として得られた成果である。各研究項目はそれぞれ、目、腕、足の支援技術に関する研究と言える。本論文は福祉制御工学の確立への第一歩を踏み出したにすぎないが、将来の福祉制御工学の研究につながるいくらかの可能性を示したことは確かである。

第1章 福祉制御工学の確立を目指して

1.1 福祉制御工学の提唱とその背景

1.1.1 福祉制御工学の提唱

本論文では、「福祉制御工学」という新しい学問体系を確立することを目指し、その第一歩を踏み出す。

高齢者や障害者への支援として、図 1.1 に示すように、法律や経済、社会システム、医学などの分野からの貢献と並び、工学分野からの貢献の期待も大きい。さらに図 1.2 のように、工学分野の中でも、制御、電気、機械、情報、通信、建築、材料などさまざまな分野からのアプローチが考えられ、これらを称して「福祉工学」などと呼ばれている。しかし、それらすべてに取り組むことは難しいことである。そこで我々は、計測や制御の技術を基盤として高齢者や障害者の支援を実現する「福祉制御工学」という新しい枠組み (パラダイム) を確立し、大学の中にその受け皿を作ることを大きな目標とする。

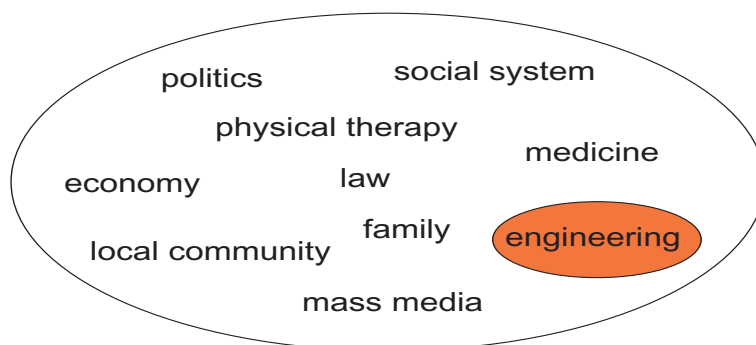


図 1.1: 福祉への貢献

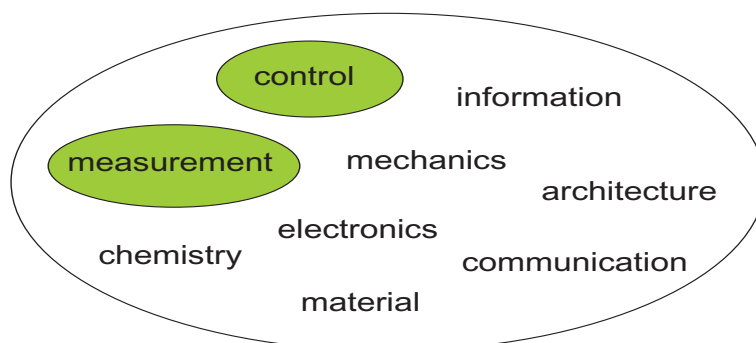


図 1.2: 工学分野からの貢献

1.1.2 我が国における高齢化の現状とその影響

現在のみならず将来にわたる、我が国の大きな問題点の一つが高齢化問題である。すでに我が国は高齢者人口が全体の14%を越えた高齢社会であり、今後さらに高齢化、少子化が進み、平均年齢が上昇しバランスの悪い人口構成(頭でっかち)になることが予想される。

図1.3は我が国の年少人口(0~14歳)、生産年齢人口(15~64歳)、老年人口(65歳以上)、後期老年人口(75歳以上)について、2000年までの実測値と将来の推計値を示したものである(国立社会保障人口問題研究所調べ[1])。このグラフからも明らかのように、年少人口と生産年齢人口は減少していく一方で、65歳以上の人口は増加していき、2050年には3人に1人が高齢者という状況になると予想されている。

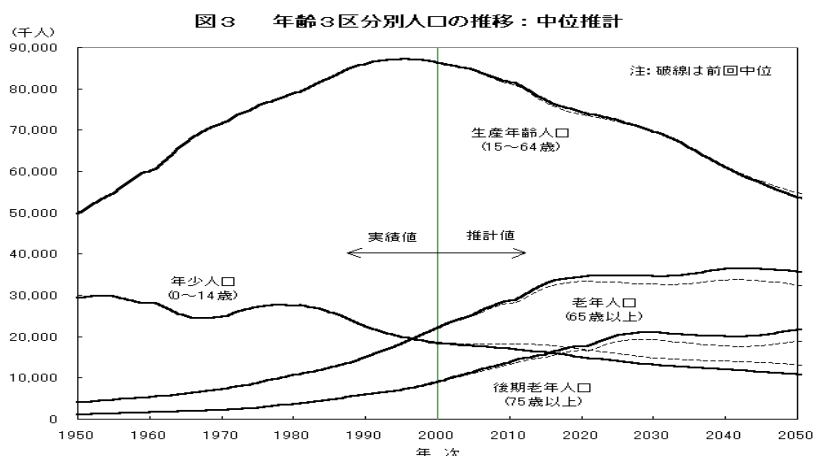


図 1.3: 我が国の年齢別人口の割合 (国立社会保障・人口問題研究所調べ [1]、平成 14 年)

図1.4は、65歳以上人口の割合を諸外国と比較したものであり、1999年までの実測値と将来の推計値を示している[2]。このグラフから、日本の高齢化がどの国よりも著しく、それに諸外国も何年か遅れで追随していることがわかる。この高齢化問題は世界的な問題であると言える。

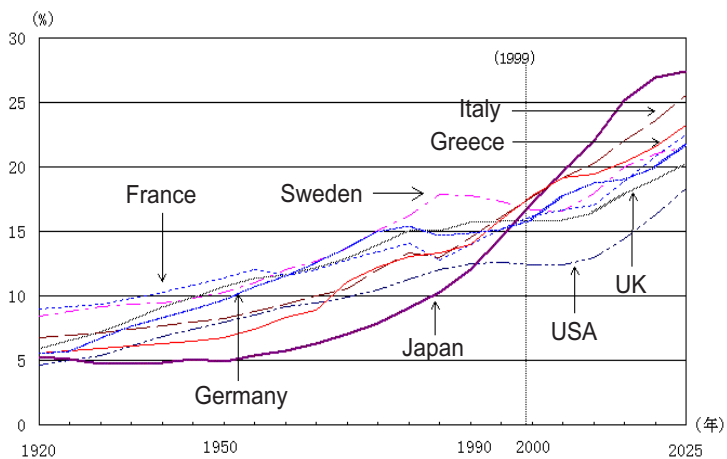


図 1.4: 諸外国と比較した我が国の65歳以上人口の割合 (国立社会保障・人口問題研究所調べ [2]、平成 9 年)

この急激な高齢化現象は例えば、医療、介護の容量、人手が不足してしまうという問題だけでなく、高齢労働者の増加、社会全体の活気などさまざまな面に問題を引き起こす。このような状況の中、高齢者に対する工学的な支援は必要不可欠である。

1.1.3 福祉制御工学の目指すもの

我々は「福祉制御工学」という新しい分野を提唱する。我が国だけでなく諸外国も高齢化という問題を抱えつつあるという世界的な背景が存在する中で、工学的支援はまさに急務であり、多分野における研究が期待される。福祉制御工学はその名の通り、制御あるいは計測技術に基づいて、高齢者・障害者への工学的支援の可能性について探っていくものである。

これまでも、計測制御技術を用いた福祉工学は研究されているが、ローテクの応用であったり、数式を含めた理論展開が不足していたりするものが多い。我々は、実用場面を大いに意識する一方で、理論展開も含めて技術的により深い議論も同時に行い、新しい可能性を見つけていくことを一つの大きな目標としている。実際行った成果は、基礎的研究の段階のものであったり、すぐ実用になるようなものではなかったりするかもしれないが、必ず支援技術の一つとして将来への可能性をもつものにしたい。

「福祉」と「計測・制御」を結びつける重要な要素として、例えば、安全性、使いやすさ、安価、ロバスト性、小電力などが抽出できる。研究の過程で登場する理論展開や各手法について、これらの点から評価を行い、考察を加えていくこととなる。また、多くの被験者に使ってもらい評価をしてもらうこともそれらの要素を考察する上で不可欠である。

近年、「高齢者工学」という分野も提唱されているが、「福祉制御工学」における研究でも、高齢者特有の性質、例えば、年とともに進行する身体状況に合わせた補助装置の開発や、高齢者それぞれの個性に対応するための技術などの研究が課題となる。

1.2 福祉工学のいま

本研究を進める上で、これまで行われてきた福祉技術の開発や実社会での現状について調査しておく必要がある。ここでは特に、これまで行われてきた福祉工学の研究と関連学会、本研究と関連の深い福祉・介護ロボットと移動支援技術の開発、さらにそれらの社会における現状についてまとめ、本研究の一背景として考えていく。

1.2.1 福祉工学の目指すもの

なぜ福祉機器は普及しないのか？ そんな疑問がふと頭に浮かぶ人は少なくはないであろう。パソコンやAV機器等はどんどん新製品や高性能化した製品が誕生し、瞬く間に人々のもとに広がっていく。一方、「福祉」においては、研究開発が盛んになっているにもかかわらず、それほど実用化・普及には至らない。実際に使われる現場との間に何か壁のようなものが感じられる。「なぜ福祉機器は普及しないか？」の本当の答えを見つけるのは容易ではない。そしてまた、答えが見つかったとしても、その問題点を解決することは簡単ではない。

ここで言う「福祉のための技術」とは、限られた人達への支援ではない。さまざまな高齢者・障害者が社会の中で周囲と関係を持ちながら生活していることを考えると、すべての人への支援が必要であると言える。福祉の概念は広がりつつある。そしてこのためには、個人の物理的機能の支援だけでなく、精神面や人間関係の支援も含めなければならない。「福祉制御工学」の目指すところもまた同様である。

注意すべきは、高齢者と障害者では異なる点が多いということである。特に高齢者については、非常に元気な人から不自由な人までさまざまであり、支援の内容も変わってくる。衰え、進行、機械使用に対する積極性、そして人口ははるかに多い。もちろん障害者についても、生活環境や価値観はさまざまであり、それらの個性対応技術がどうしても要求される。これは福祉技術における何よりも大きな要素である。

支援技術を大きくいくつかに分けるとすれば、コミュニケーション支援、移動・移乗支援、入浴・排泄等を含むその他の自立支援、リハビリ支援、などがある。学問分野で言えば、制御、電気、機械、情報、通信、建築、材料など、簡単には網羅できないほど多岐にわたる。まさに福祉技術は総合技術である。

1.2.2 関連学会はいま

ここで、福祉工学に関連する学会について少し触れておく。日本機械学会やロボット学会などでは、講演会の中で福祉工学に関するセッションが設けられており、それぞれ機械、ロボットの側面からの研究発表が行われている。福祉工学全体をカバーするような学会としては、昭和60年にライフサポート学会、平成12年に生活支援工学会がそれぞれ設立さ

れ、幅広い技術分野からの研究が集められている。設立時期を見てもわかるように、やはり歴史は浅く、これからの分野である。

福祉技術は総合技術であることからわかるように、学会活動もいくらかバラバラに行われてきた印象もある。上述の二つの新しい学会のように、多分野の専門家が交わるような場所が今後も重要となってくるはずである。

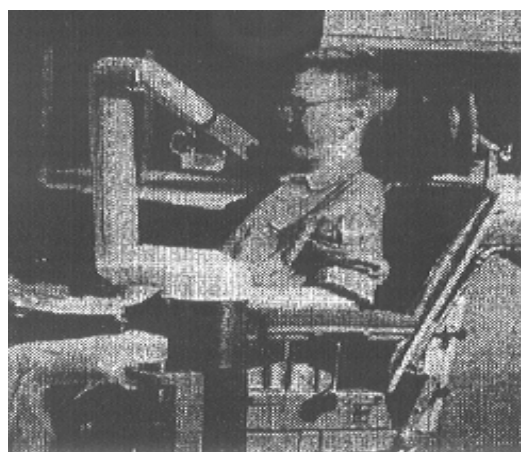
1.2.3 福祉・介護ロボット開発の現状

人間を支援するロボットにはいろいろなものがある。リハビリ機器、介護支援ロボット、さらには家電製品など人間の生活環境を快適にするロボットも含まれる。ここで現在、どのような福祉ロボットがどの程度実用化されているかを紹介する [3][4]。

海外では、特に自立を支援する福祉ロボットがいくつか市販されている。自立支援ロボットに限ってみると、1997年で約250台が販売されている。中でも、図2.2(a)に示すスイッチ1つで好きなものを食べられる食事支援ロボット [5](Handy-1) と、図2.2(b)に示す、物を運ぶ、操作するなど各種作業を実現する車椅子搭載型汎用ロボット [6](MANUS) がその多くを占めている。しかしコスト面や安全性、操作性などの問題点も多く、広く普及するには到っていない。



(a) Handy-1 ([5]より引用)



(b) MANUS ([3]より引用)

図 1.5: 海外で実用化された福祉ロボットの例

一方、日本では福祉ロボットの研究の多くが介護支援に向けられてきた。しかし、抱き上げ介護支援ロボットなどは技術面でも安全面でも困難な点が多く、実用化に至るものは少ない。図1.6(a)(b)は、日本国内で最近実用化に至った、数少ない福祉ロボットの例である。(a)はセコムが開発した食事支援ロボット「マイスプーン」[7]、(b)は日本ロジックマシンが開発した介護支援ロボット「レジーナ」[8]である。



(a) 食事支援ロボット：マイスプーン ([7] より引用) (b) 介護ロボット：レジーナ ([8] より引用)

図 1.6: 国内で実用化された福祉ロボットの例

このように、介護ロボットやサービスロボットなどの研究が行われてきたが、ほとんどは実用化に至っていない。これらの福祉ロボットが家庭に入り、より高齢者に近づくには、ロボットに「柔らかい動き」をさせることが必要である。これは、安全性だけでなく、高齢者の心理的な面にも深く関連するからである。

ソフトネス (柔らかさ) をもったロボットを実現する方法として、機構と制御という二つのアプローチがある [9]。前者は、アクチュエータ、ジョイント、リンクなど構成部品の材料に柔らかいものを選択して柔らかさを実現するものである。一方、後者のアプローチは、拘束力学系においてアクチュエータを力制御することにより対象物にダメージを与えないような柔らかい動作を実現するものである。本論文でも福祉ロボットに関する話題が登場するが、特に制御の側面からいくつかの考察をしている。

1.2.4 移動支援技術の現状

自立を支援する技術として重要な項目となる移動支援技術に焦点を当ててみる。「自立」、すなわち、「自分である程度のことにはできる」というのが本人も我々も理想とするところである。家の中を自由に移動できる、あるいはスーパーなど好きなところに外出できるようになればよい。

高齢者・障害者の自立した生活を考える際、移動と交通の問題は最も重要な課題である。特に高齢者の場合、外出頻度が減ることは身体的な衰えだけでなく痴呆や精神的な面にまで悪影響を及ぼしかねない。外出・就業機会を積極的に増やすことができる環境をつくる上で、移動支援の技術が大きな役割を果たすと言える。

2000年には介護保険法や交通バリアフリー法が施行され、移動支援機器のニーズは今後ますます高まっていく。例えば、従来の車で、車椅子ユーザが楽に乗り降りできるものや、

高齢者の特性を大いに意識した小型電動ミニカー、また、最も普及している福祉機器であろう車椅子に電動アシスト機能を付加したものなど、さまざまな機能、制御技術が取り入れられ始めている。このように、将来的には利用者が幅広く機器選択をでき、豊かな生活を送れるような社会が望まれる。

しかし初めにも述べたように、移動支援機器としてまだまだ十分な普及には至っておらず、改善すべき問題点など多く存在する。もちろんそれは、社会制度や道路交通環境に帰するものもあるが、移動を実現するための制御技術にかかわる部分も大きい。

1990年に国が策定した「ゴールドプラン(高齢者保健福祉推進10ヶ年戦略)」では、従来からの課題であった「寝たきり老人をつくらない」、「社会的入院の解消」などをねらいとして、各地域社会での福祉施設・制度を充実し、在宅福祉・介護に重点をおいたものとなっている。このような変化を踏まえて、公共施設用だけでなく家庭でのケア用としての福祉・介護車両のニーズが増えている。今後さまざまな用途・形式の福祉・介護車両がニーズに応じて開発されるであろう。福祉・介護車両としては、

1. 身体の不自由な人が自分で運転する車両
2. 介護する人がいて、身体の不自由な人を乗せる車両

に分けられる。

最も普及している福祉・介護車両は車椅子であろうが、車椅子では行けないところに行くには自動車を利用するほかない。しかし、高齢者・障害者が利用することを考えたとき、既存の車では難しい。以下に、現在実用化されている、あるいは近付きつつある福祉車両、介護車両の例を紹介する[10][11][12][13]。これらは、例えばタクシーにあったら人気になるはずである。

<介護車両のいろいろ>

前述のゴールドプランでは、ホームヘルプサービス、ショートステイ、デイサービスなどの在宅福祉サービスの充実を図っている。また、老人保健施設、特別養護老人ホーム等の福祉施設の整備も進められつつある。これらの福祉・介護サービスが軌道にのってくると、家庭から各施設への移送はもちろんのこと、旅行やショッピングなど家族と一緒に行動する機会も増えてくる。このような中で介護車両のニーズは高まるが、国や地方自治体では自動車購入資金の貸付などの助成措置も設けられている。

車椅子に人を乗せた状態で移送するための車両として、従来用いられているのは、車椅子乗降のためのリフトを備えたものが多い。しかし、パーソナルユースの高まりとともに、リフトがなくても車椅子を手押しで簡単に乗降・収納できる軽自動車が普及し始めている。図1.7左のように、床面を低くし後部ルーフを高くして、車椅子の乗降性を高めている。介護する人にとっても、ドアからドアというよりもベッドからベッドへの近隣地域の移送手段として、力になってくれるものである。

1.2 福祉工学のいま

さらに、パーソナルユースを中心に急激に増えて来たのが、図 1.7 右に示すような回転シート及びシートリフト付き車両である。車椅子から自動車のシートに移す場合には大変な重労働となり危険でもあるため、前述のような車椅子のまま移送する車両のほうが望ましいが、状況によってはこのような車両のほうが適切な場合もある。

助手席または後席シートを 60°～100°回転させ、車両によっては電動リフトを用いてシートを昇降させ、乗降を容易にしている。もちろん運転席に同様のシートを装備した車両も発売されている。



図 1.7: 介護車両の例

図 1.8 左は寝たきりの人のための巡回お風呂カー（移動入浴車）である。車両に入浴設備を備えており、積載している持ち運び可能な浴槽を在宅介護などの現場に置き、車両に備えたボイラからホースで給湯する。特に一定温度の給湯がポイントとなる。これには、資格のある看護婦やヘルパーが必要であり、パーソナルユースとしては難しい。

この他に活躍している介護車両として、図 1.8 右に示すような、路線バスなどで使われているノンステップバスがある。車椅子のまま中に乗り込めるバスも考えられている。私自身も何回か乗り合わせたことがあるが、身体に不自由のない者にとっても乗降性はよく、室内空間もなんとなくゆとりを覚えられるものである。普及に関してはまだ地域的な偏りもあり、早期の普及が望まれる。



図 1.8: 介護車両の例

<自分で運転したい>

身体の不自由な人で「できることは自分で」と考えている人は多い。車両についてもできれば自分で運転したいというのは当然である。日本では約15年前に、原付免許で運転が出来る原付ミニカー(3・4輪)が一部広まったが、安全確保の点から普通免許が必要との法改正がなされ、ブームは去った。しかし現在では、図1.9左のような免許不要の電動4輪カートも開発されている。軽量コンパクトであり、握りやすいループ型ハンドルなどの工夫も見られる。一方、図1.9右のような電動ミニカーについては、一度撤退したメーカーも最近になって再度参入しており、電気自動車の登場で徐々に活発化している。



図 1.9: 福祉車両の例

一方、図1.10は、今年3月に通信総合研究所が走行実験を公開した電動スクータである。



図 1.10: 高機能型電動スクータ ([14] より引用)

これは市販の電動スクータに複数のセンサと小型カメラを取り付けたものであり、まさに高機能型電動スクータである。以下のような機能が検討されている。

1. 放置自転車や電柱などの障害物を検出し、ぶつからないようにする。
2. 3～5m先の道路状況を常に監視し、石や段差があると運転が手動から電動に切り替わり、よける。

3. GPSにより自分の位置を認識し、無線ネットワークで道路情報を受信する。

路線バスにIT技術が取り入れられようとしている話も聞くが、高機能化のためにIT技術などが福祉機器に入り込んでくることは多いに考えられる。お年寄りがIT技術を使いこなすことは考えにくいいため、両者をつなぐインタフェースが重要なポイントとなる。

福祉車両・介護車両はもはや特殊なものではなく、家庭用、個人用というパーソナルユースへと進んでいる。ここに紹介した車両にもまだ課題は多い。寝たきりなどで介護を必要とする高齢者は200万人以上いるが、介護にあたる人もまた高齢化が進んでいる。しかも、介護している人の約85%は女性である。「高齢者が高齢者を介護する」、しかもその多くが女性であるという現実を考えると、よりシンプルで使いやすいことが望まれるであろう。

< 適温配膳車「デリカート」 >

松下電工は、パワーアシスト機能の付加により運搬操作を簡単にした適温配膳車「デリカート」を販売している[19]。これは、病院や福祉施設などで食事を適温で提供しおいしく食べてもらうことができるようにすると同時に、重量機械を運搬する作業の軽減と操作性の向上を目指して開発されたものである。運搬を行う人は女性、あるいは高齢であることが多く、パワーアシスト技術の応用としての良い例であると言える。

< 話題の福祉タクシー >

福祉タクシーとは、高齢者や体の不自由な人の快適な足となるため、車椅子や寝台でも乗り込めるように開発されたタクシーである。平成14年9月30日付の朝日新聞[16]によると、そのような福祉タクシーの運行が、タクシー会社だけではなく、ボランティア団体にも認められる見通しとなった。現在は、タクシーとしては運行できない「白ナンバー車」や「普通免許」での営業は原則禁止となっているが、平成15年からは、許可を取ればガソリン代などの実費を「料金」として受け取れるようになるかもしれない。

タクシー会社が運行する正規の福祉タクシーは、1200業者の約2340台で、10年前の3倍に増えたものの、まだ供給不足である。一方、ボランティアとして、全国で2200前後の団体や社会福祉協議会が約3500台を走らせている。需要に応えるにはボランティア輸送がかかせない、と国土交通省も認めており、早い時期に規定が設けられるべきである。

< 新しい移動具”kappo” >

高齢社会の新しい移動具として、安全にかつ簡単に日常生活圏内を移動することのできる車両が、東京大学産業機械工学の鎌田実研究室において開発されている[17][18][19]。図1.11はその写真である。現在の自動車のカテゴリを越えたところに位置するものとしての狙いから、「シルバビークル」と呼ばれている。写真のプロトタイプ車は「Kappo(活歩)」と命名されており、高齢者がこれに乗って街を活歩してほしいという願いが込められている。



図 1.11: “kappo”

このシルバビークルの重要なコンセプトの一つは、普通自動車免許を「卒業」した高齢者が、引き続き外出意欲、機会をもって自立した生活を送れるようにする移動具を開発するというものである。

1.2.5 実際に聞いたこと・感じたこと～福祉機器ユーザの声～

これまで私自身が福祉機器のユーザ、あるいは介護を必要としている人の声を聞く機会がいくらかあったが、それらについてここで紹介し、本研究につながる一つの背景として考えていく。

< 機器ユーザの方に >

南浩一さんという方に出会った [20]。南さんは、バルセロナパラリンピックの金メダリストであり、自らも福祉機器やリハビリテーションに関するエンジニアである。若いころ事故で負われた障害のためにパワーアシスト車椅子で生活をされている。福祉工学の研究を目指す私たちにとっても、機器ユーザならではの大変貴重なご意見を随時おうかがいすることができた。

例えば、「健常者が使ってよいものだと思っても、障害者にとっては使いにくいものであり、結局実用化に至らず終わってしまうものが多々ある。研究として素晴らしいものであっても、大きさで使いにくいものであったり、高価であったりすると受け入れられない。また、電動車椅子のように全く自動で動くものに乗るのはみっともないと考える人もいる。できることなら、廉価で便利で、しかも見た目のデザインのいいものがほしい。」とのことである。

さらに、「障害者は抱えている問題も多様で、解決してほしい問題がたくさんある。これが欲しい!、使いたい!と言える環境が公共の場にあると、問題が明確になり、機器を開発する人にも伝わるはず。また、障害者だけでなく、健常者でも使えるようなものもいい。」とおっしゃっていた。

< 国立リハビリセンターで >

前述の南さんのご紹介で、所沢にある国立リハビリテーションセンターに見学を訪れる機会が何度かあった。ここは障害者のための病院や訓練所、福祉機器の研究所などからなる。ここでわかったことは、いわゆる電動で動くような福祉機器はほとんど使われていないということである。見ることができたのは電動車椅子と簡単なリフトぐらいである。やはり安全性も一つの壁となってくる。福祉機器の研究開発が盛んになっているにもかかわらず、このようなリハビリの現場には以前として登場していない。理学療法士や医者がりハビリの現場にいるが、その中に工学的な支援技術がどのように入っていけるかが問題である。

< 近所の散髪屋で >

近所の散髪屋に行った際、手動車椅子で来たおばあさんとその介護人に出会った。順番待ちの間、その介護人の方に特に車椅子に関していろいろとお話をうかがった。最初に言われたのは、やはり個人に合ったものがほしいということである。その手動車椅子は、おばあさんの体のサイズにぴったり合ったものではなく、また介護人にとってもハンドルが低すぎて腰が痛くなるとのことだった。

電動パワーアシスト車椅子の話をしたところ、介護人の方はその存在自体を知らなかった。定期的に行われている福祉機器の展示会にはよく行くらしく、やはりいろいろな人に機器を知ってもらう機会を多くし、知ってもらう努力をする必要が我々にはあるのかもしれない。当然、補助金の問題も含めて、機器は安くあってほしいとも言われていた。

< 祖母の施設で >

私の祖母は今年で99歳になるが、愛媛県のある老人施設で生活をしている。歳から考えれば大変元気であるが、さすがに歩くのが困難であったり、耳が遠かったり、老いによるこのような症状は避けられない。施設には他にも様々な症状の高齢者が入居しており、何人かの寮母さんが面倒を見ることになる。この施設に私も何度か訪れ、その雰囲気を感じた。

まず気付くのが、施設で働いている方々はほとんどが女性で、しかも高齢であることである。20、30歳代の元気な男性女性が介護をしている、というわけではない。車椅子で食堂まで連れていったり、入浴をさせたりするなど、力仕事は多くあるはずである。いわゆる老々介護のようなことは我が国の特有の問題であり、工学的支援においても重要なキーワードとなるはずである。

実際に私の祖母の部屋に行き、まわりの掃除をしたり、ベッドから起き上がるのを手伝ったりした。部屋の狭さを感じたこともあるが、もし機器による支援をすれば、コンパクト、軽量、女性にも使いやすい、安心できる、というようなものでなければならぬだろう。

1.3 本論文の目的

本論文の目的を、以下のような観点から述べる。

1.3.1 福祉制御工学の確立を目指して

本論文の大きな目的の一つは、福祉制御工学という新しい学問体系の確立を目指し、その第一歩を踏み出すことである。先にも述べたように、これまでの福祉工学研究と異なり、実用場面を大いに意識する一方で、理論展開も含めて技術的により深い議論も同時に行い、必ず将来につながるような可能性をもつものを生み出していくことを目標としている。

本論文は、福祉制御工学の確立を目指した最初の一步であり、手探りの段階に近い。本論文をもってその確立が達成されるわけではない。今後、福祉制御工学にたずさわる研究者が、引き続きさまざまな可能性を示していき、支援技術研究における何らかの指針を見つけれられたときその確立がなされたと考えるべきであろう。本論文の目的は、そのような福祉制御工学の将来を見据えつつ、その確立につながる一つの道を見つけることである。

1.3.2 人間と計測制御システムのより良い関係性とは

本論文では、高齢者や障害者を支援する新しい計測制御システムを検討していく。これらの支援システムは当然ながら人間を相手とし、そのインタラクションが重要な意味をもつ。そこで、計測制御システムそのもののはたらきを考えると同時に、それらと関わり合う人間とのより良い関係性も検討し明らかにしていきたい。

特に、本論文で一つのキーワードとなる「パワーアシスト技術」は、人間・制御融合システムとしてのよい一例である。そして福祉用ということ意識すれば、その融合のし方、人間と機械の距離、関係性、などがより重要な要素となる。なぜならば、福祉用を意識すると、自立、リハビリ、精神的要素、など特有の項目が生まれ、人間と機械の関係性がいっそう重要な意味をもってくるからである。ここでいう人間と機械の距離とは、物理的な意味ではなく、どちらがシステムの中で主体的にはたらいているか、機械が人間に歩み寄り人間がどれほど身をまかせているか、逆に人間が主体的にはたらき、機械はさりげなく補助するだけであるか、などの意味である。そしてこれは制御系設計にすべて依存してくるものであると考えている。

本論文で取り組む各研究項目はすべて、人間が計測制御システムの中に含まれる、あるいは対象となる、システムの設計に際して考慮される、ようなものである。コンピュータシミュレーション等ではなく、実際に被験者を用いての実験的検討が唯一の検討手段となる場合も多い。本研究では、数学的、理論的な解析とともに、実際に被験者を用いて、人間がどう感じるかの評価も行っていく。

1.4 本論文の構成

本論文は、大きく分けて三つの研究項目からなるが、構成は以下のとおりである。

最初に、高齢者支援を目的としたパワーアシストロボットの制御法に関する研究について、第2章にその用途や制御法の分類、関連研究を、第3章に位置でアシストするか力でアシストするかという議論と各制御法の提案を、第4章に操作者の操作感の向上を目指した制御法の検討について記す。第3,4章ではそれぞれ被験者を用いたアンケート評価実験の詳細や人間と機械の距離という観点からの新しい考察についても記述している。

次に、電動パワーアシスト車椅子に関する現状と様々な側面からの解析、さらに基本となるアシスト走行制御法やその他さまざまな走行場面に対応するための多機能制御法の提案と実際に製作した実機を用いた実験的検討について、第5章、第6章、第7章に記す。多くの被験者による評価実験とその考察についても詳細に述べている。

また、一人暮らしの高齢者の非日常性検出を目的としたカメラを用いたモニタリングシステムと、その産業用ロボットのモニタリングシステムへの応用について、第8章、第9章に記す。すべて実験的検討と他のシステムへの応用の可能性も論じている。

最後に、本論文全体を通しての結論や成果、今後の課題・可能性を示す。さらに福祉工学と福祉制御工学の将来について議論する。

第2章 高齢者支援を目指したパワーアシストロボットとその制御

2.1 パワーアシスト動作に登場する三者< 操作者・機器・環境 >

パワーアシスト動作においては、操作者である人間、アシスト機能をもつデバイス、アシスト作業の対象となる負荷(環境)、の最大三者が存在しうる。このような人間を含めたパワーアシスト制御システム全体の構成図を図 2.1 に示す。

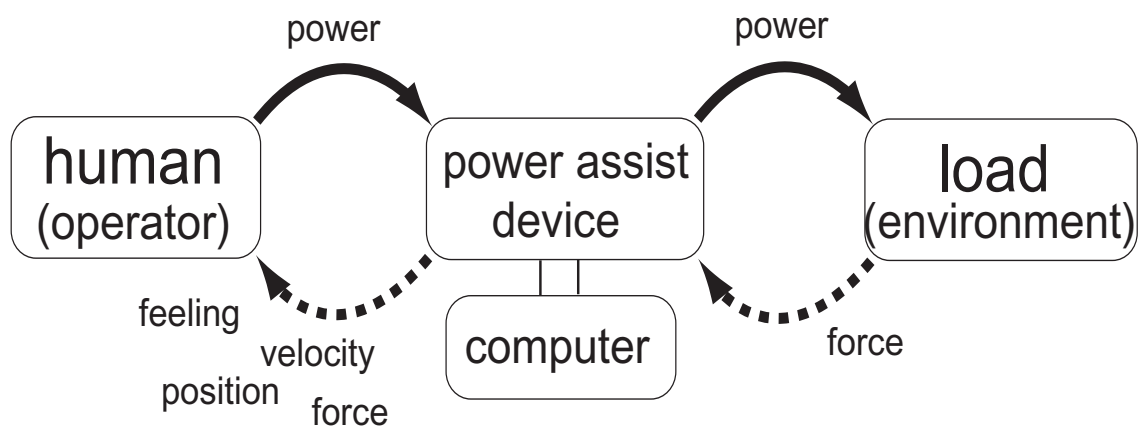


図 2.1: 人間を含んだパワーアシスト制御系の概念図

最初に、人間がアシストデバイスに力を与え、デバイスはその力情報を受け取る。その情報に基づきコンピュータを介してアシストする力が決定され、デバイスは負荷に力を与える。この結果負荷からデバイスに作用する力もまたセンシングしてアシスト量の決定に用いられることもある。

例えばパワーアシストロボットの場合、デバイスはロボット、負荷は患者などの人間自身であったり、重い荷物であったりする。またパワーアシスト車椅子の場合は、デバイスは電気モータを備えた車椅子、負荷は路面との間にはたらく駆動力や空気抵抗などと考えられる。

2.2 パワーアシスト技術の定義と要求

パワーアシストとは、「人が作業・動作を行う場合に、その能力を増大させる、あるいは状況に適応させること」と定義できる [21]。特に高齢者や障害者の支援を考えた場合、その目的は QOL(Quality of Life) の向上、つまり生活レベルでの動作・行動の支援と言える。この中でも、自立した日常動作を支援するもの、介護者の負担を軽減するために支援するものがある。いずれも結果としては、

不可能であった作業・動作を行うことができる

作業・動作を楽に行うことができる

ことを期待している。また、パワーアシスト装置を考える場合の要求事項は以下の四つであると考えられる。特に、二つ目までは従来も考えられてきたが、第三、四要求事項はこれまであまり考慮されておらず、本論文で大きく注目していく項目である。

< 第一要求事項 > : 力の増幅、動作の補助

これはパワーアシストそのものの実現であり、その実現方法や、人間・ロボットの系の安定性が問題となる。操作者の力を何倍増幅したいかという要求をある程度正確に実現する必要がある。

< 第二要求事項 > : 安全性、安心感、操作性、使いやすさ

第一要求事項ほど具体的な形では現れないが、それだけ考慮されにくいものと言える。しかし、パワーアシスト機器を実際に使用できるものにするためには、第一要求事項よりもむしろ重要である。

振動や脈動を起こさず常に安定した動作をすることは、操作者に大きな安心感を与え、それは特に女性や高齢者の場合重要である。操作性と使いやすさはあいまいな言葉であるが、パワーアシスト動作におけるこの要素は、このように動かしたいという操作者の意志を、あたかも機器を介さず直接手で動かしているかのように思いどおりに動かせるかどうかの基準である。

< 第三要求事項 > : 操作者に環境の情報を感じさせること

環境の情報、例えば、重さ軽さ、あるいは環境の挙動、変動などを、操作者の側にきちんと返し、それに起因する感覚、感触を操作者にある程度感じさせることが、より自然なパワーアシスト動作になるのではないかと考えられる。

例えばパワーアシストロボットの場合、環境が介護される患者であれば、その人の動きを介護者に感じさせることは重要なことである。また、環境がパワーアシスト車椅子であれば、常に同じ感覚ではなく、上り坂で少し大変だとか、少し走りにくい路面だとかいう感覚をある程度は操作者に感じさせることが大事である。

つまり、図 2.1 に示した三者が操作者から環境への一方向だけではなく、環境から機器を通してまた操作者に返ってくるような、双方向に情報が伝わるようなパワーアシスト動作が実現できることが望まれる。

< 第四要求事項 > : 幅広く対応できること

パワーアシスト技術の福祉的応用を考えると、あらゆる場面、状況が存在すると考えられる。ならば当然、操作者や環境もさまざまであり、ある一元的な手法だけでは対応できないことは目に見えている。はっきりとした特徴をもついろいろな制御手法を生み出すと同時に、例えば制御系内の各パラメータなど、多くの要素を自由に随時設定できる、つまり多くの自由度をもつような手法を考えていくことも要求されるであろう。

ここで、パワーアシスト機器に重要となるいくつかの構成要素を以下に簡単に示す。

< アクチュエータ >

精度の高い制御のできる電気モータ、高出力である油圧アクチュエータ、柔らかく軽いラバチュエータなどがある。例えば、バイラテラル油圧力伝達機構を用いてオムツ交換動作の補助をするロボット [22] などが考えられている。

< 制御 >

インピーダンス制御に代表されるような力制御を応用する可能性がある。

< ヒューマンインタフェース >

操作性、柔軟性、ノイズ、重量など。

< 安全性・信頼性・耐久性・社会性 >

実際に実用化され広く用いられるためには、これらの壁を越えなければならない。

パワーアシストロボットや車椅子に限らず福祉機器全般に渡り、実用化に向けてこれらの要素における工夫、改善が必要になる。

本研究では、電気モータを搭載したロボットを扱い、とくに制御系設計の面に焦点をあてて深く検討していく。

2.3 高齢者支援を目的としたパワーアシスト技術に関するこれまでの研究例

高齢者において、減退した運動機能を機械的に補助、代行することは、生活の自立やQOL(Quality of Life)の改善に役立つ。また介護者において、入浴などの際の抱き起こし、抱き下ろしといった介護動作の身体的負担を少しでも減らしたい。近年、移動や移乗、大きな筋力を必要とする作業などの補助にいろいろなパワーアシスト機器が考えられてきた。介護者へのアシストでは図 2.2(a) のようなパワーアシストリフト [23]、高齢者自身へのアシストでは図 2.2(b) のような走行の補助を行う車椅子 [24] などが考えられている。



(a) パワーアシストリフト：東京
電機大学理工学部福井研究室・
舟久保研究室 ([23] より引用)



(b) パワーアシスト車椅子：ヤマハ製
JWII ([24] より引用)

図 2.2: 高齢者支援のためのパワーアシスト技術の例

この他に、特に空気圧式アクチュエータを介護ロボットに応用する例も多く見られ、空気圧ゴム人工筋を用いた機能回復訓練支援ロボット [25]、人間装着型の介護用パワーアシストスーツの開発 [26]、立ち上がり動作補助を行うパワーアシスト椅子 [27] などの研究例もある。先に述べたように、アクチュエータ、制御、インタフェースなど多くの側面からのアプローチが実際に考えられる。

これまで介護ロボットなど、いわゆる福祉ロボットとよばれるものの研究はこのようにある程度行われてきたが、それらのほとんどははまだ実用化に至っていない。その理由として、コストや安全性、また本当に介護の場面で要求されるものであるか、役に立つものであるか、そしてその機器をどのような観点からいかに評価するかという点にも課題があると考えられる。

本研究では、制御という側面からいくつかの軸をもつシンプルなロボットアームを用いて、パワーアシスト制御の原理を探求していく。そしてその原理や考え方は、アクチュエータやインタフェースという他の側面でのアプローチにおいても適用できうるものであると考えている。

2.4 高齢者支援を目的としたパワーアシストロボットとその制御手法の分類

2.4.1 パワーアシストロボットに関する研究例

これまで、特に機械工学の分野からパワーアシストロボットの研究がなされてきた。

Kazerooni[28][29][30][31][32] はマスタスレーブ構造ではなく一つのアームだけで構成される装置を用いて、人間の力を増幅させるマニピュレータ “extender” を開発し、人間、extender、環境の三者を含めた制御系を解析した。しかし、力の増幅率と制御系の安定性との間にトレードオフが生じ、両者を同時に指定できないことが示された。これは次の章で述べる力制御ベース型手法の一つであると考えられ、本研究ではそのトレードオフを解消したものを提案している。

これに対し小菅ら [33] は仮想ツールの概念を用い、人間や環境の特性がわからない場合でも、増幅率とロボットの操作性を同時に指定できる制御系を構成した。安定性に関しては Popov の超安定定理を用いて考察されている。

また林原ら [34][35][36] は、アクチュエータの飽和を避けるために、重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する手法を提案した。また永井ら [37][38] は、インピーダンス制御の目標値を人の力に応じて変更することで動作を補助する手法を提案し、これに基づいて上腕を補助する 8 軸ロボット装具を開発している。

辻ら [39] は、ロボットの制御系設計だけでなく、機械から見て協調相手となる人間の特性に注目し、人間が作業に応じてインピーダンス特性をどのように変化させているかを解析し、協調作業実現の基礎資料としている。

これらの研究例をふまえ、人間の出した力を増幅する、あるいは動作が楽になるように補助をするロボットの制御系は一般的に図 2.3 のように表現することができる。

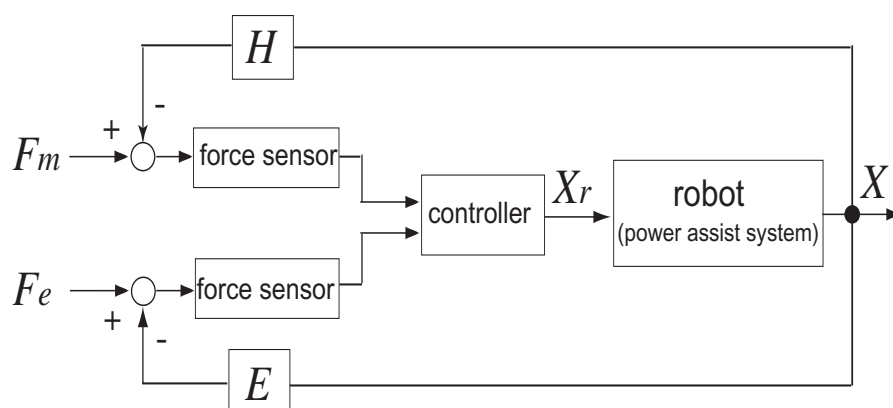


図 2.3: 位置制御系をベースとしたパワーアシスト制御系の基本構成図

これは、位置制御系をベースとした、つまり位置制御系を一番内側に内包した形のパワーアシスト制御系の構成である。 H , E はそれぞれ人間、環境の特性を表すモデル、 F_m , F_e は人間、環境が発する力である。二つの力センサで人間と環境からの力を測り、それらの情報からコントローラが生成した指令値 X_r がロボットシステムに与えられる。

これまでの研究のほとんどで、人の加える力と環境への力を測るために力センサを二つ使用しているが、福祉機器への応用を考えた場合、コストなどの理由からできるだけセンサを用いないことが望まれる。また、ロバストな制御系を考察することがパワーアシストロボットのさらなる安全性と信頼性につながるとも考えられうる。本研究では、これまでのパワーアシスト研究であまり考察されなかったこれらの点に着目し、新しいパワーアシスト制御法を検討する。

2.4.2 用途と制御手法に基づくパワーアシスト形態の分類

パワーアシスト技術は多くの場面で貢献する可能性をもつため、その形態についても様々なものが考えられる。そこで、実際の用途とその制御手法に基づいてある程度分類する必要性が生じる。ここでは、図 2.4 に示すように、(a) 三者独立型、(b) 重力項支配型、(c) 慣性変動型の三つの形態に分類する。この分類は、ロボットと環境との位置関係や力が作用する関係に大きく注目したものである。

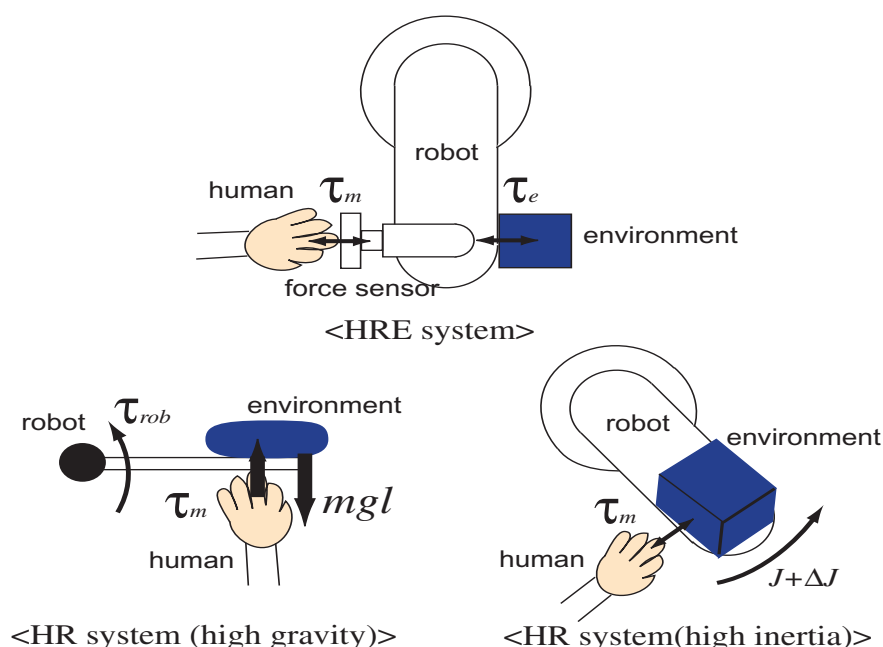


図 2.4: パワーアシストロボットの三つの形態

(1) 人間-ロボット-環境接触型 < HRE system >

環境を移動させたり、大きな力を与えて作業するような場合がこのシステムにあたる。ロボットは、人間からの力 F_m (トルク τ_m) に基づいて力 F_e (トルク τ_e) を環境に与える。三者が独立に動作し、その二つの接触点で力が作用する。

(2) 人間-ロボット接触型 < HR system >

このシステムでは、ロボットと環境はほぼ一体となって動き、力は人間-ロボット間のみはたらくとみなせる。このシステムはさらに以下の2種類に分類される。

(2a) 重力項支配型

患者の抱き上げ、持ち上げ動作では、加速度はそれほど小さくなく、必要な力のうち重力項が大部分を占める。

(2b) 慣性変動型

平面的なロボットを用いて重い荷物を移動させるようなケースがこれにあたる。このとき重力項は含まれないが、ロボットと環境がほぼ一体となり、慣性モーメントが変動する。

(1) 人間 - ロボット - 環境接触型 < HRE system > のようなパワーアシスト形態において、人間側からインピーダンス制御のようなものを用いて押していくだけで、環境側の接触やその特性については考えなくてもいいという考え方もある。しかし、ロボット - 環境間の接触について何も考慮しない場合、環境に多大な力を与えて破壊させてしまったり、接触・非接触を繰り返すような不安定な接触動作が起こってしまったりすると考えられる。また、環境側の力や挙動を人間側に返し、操作者にそれらを感じさせることもパワーアシスト動作の重要な要素である。そのため、この HRE system では、人間側と環境側の二つの力を両方考慮し制御を行うものとする。

2.4.3 パワーアシスト制御における環境の変動

パワーアシストをする場面では必ず、何らかの重い負荷が環境である。この負荷が及ぼすものには以下の二つがある。

重力負荷

これは静的な力であり、ロボットの挙動にはよらず姿勢にのみ依存する項である。パワーアシストにおいてはほとんどが補償されるべきものである。

慣性項の変動

動的負荷の一つであるが、ロボットの手先に患者や荷物がのった場合に、ロボット自身の慣性モーメントに上乘せされるような項と見ることができる。これはロボットの運動により生まれる力であり、静止状態ではゼロである。

ここで、慣性行列 J 、粘性摩擦行列 B 、角度 θ 、角速度 ω 、重力項 $G(\theta)$ 、入力トルク τ に対し、運動方程式は、

$$J\dot{\omega} + B\omega + G(\theta) = \tau \quad (2.1)$$

と一般に表される。ただし、重力項以外の非線形項は省略している。

ここで、上述の三つのパワーアシスト形態において、環境の変動がどのように影響を及ぼし、制御システムとして何が要求されるかについて以下にまとめる。

(1) HRE system

図 2.5 に示すように、例えばある物体を運んでいる途中に、新たな物体に接触し、それまでより環境が重くなるなど変動を起こす場合が考えられる。実際のパワーアシスト動作として、このようなケースが存在するが、できる限り環境が変動したこととどれほど変動したかという感覚を操作者の側に伝えられるような制御システムでなくてはならない。

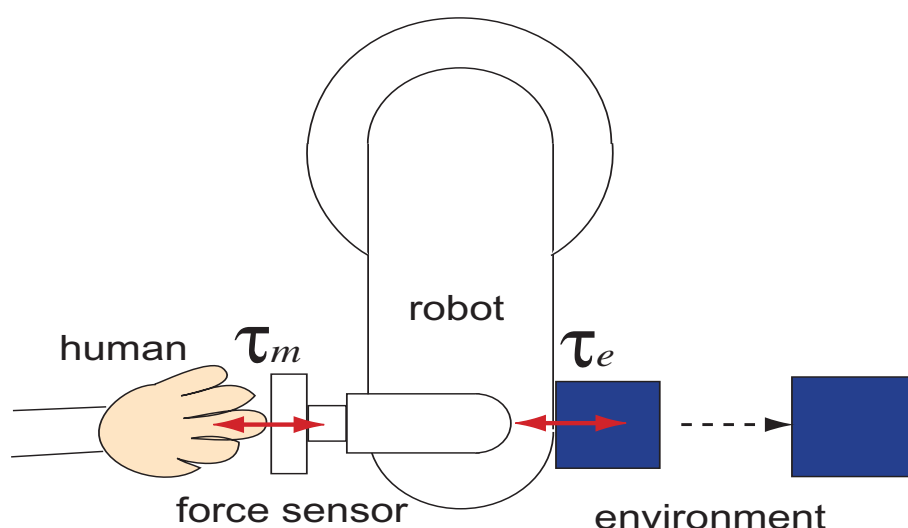


図 2.5: HRE system における環境変動の例

(2a) HR system : 重力項支配型

図 2.4 左下のような形で、患者の抱き上げ動作、おむつ交換時の足持ち上げ動作などをロボットが補助する場合には、重力 $G(\theta)$ の項が支配的になる。介護の場面で患者を相手とした動作では、大きな速度変化は必要ないことが多く、

$$B\omega + G(\theta) = \tau \quad (2.2)$$

のように慣性項を省略して表すことができ、よりシンプルな制御系が構成できると考えられる。また、重力項は患者の体重、姿勢等により変わり、動作ごとに正確に知ることはできないはずである。そのため、図 2.6 のように、ロバストなフィードバック制御により重力項は抑圧することが望ましい。

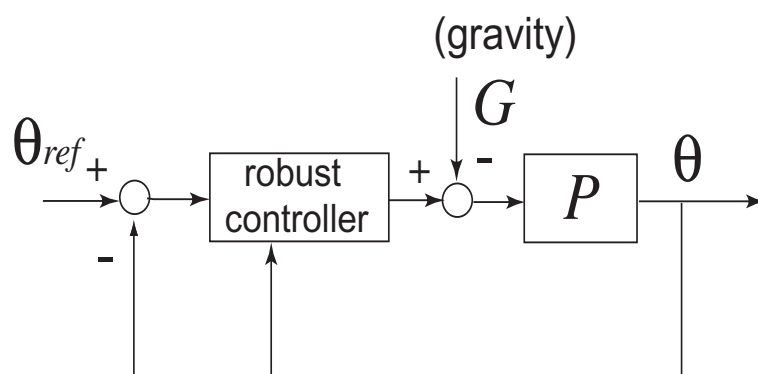


図 2.6: ロバスト制御による重力項の抑圧

(2b) HR system : 慣性変動型

図 2.4 右下のような形で、荷物や患者の移動を、パワーアシストスーツや平面ロボットのよう装置である程度の速度変化をもつアシスト動作で行う場合、重力項はなく慣性項が支配的になる。つまり荷物や患者がのったことでロボットの慣性モーメント項が上乘せされ変動したとみなしている。

$$J\dot{\omega} + B\omega = \tau \quad (2.3)$$

さらに、多軸ロボットを用いてさまざまな動きのアシストを行う場合には、これらの各要素を考慮する必要がある。

2.5 外乱オブザーバを用いた力センサレスパワーアシストロボットの實現

2.5.1 カセンサを用いないパワーアシストロボットの可能性

1.4.1 で述べた過去の研究例では、操作者の入力する力や環境との作用力は力センサで測定していた。本研究では操作者の入力する力、あるいは環境との作用力のどちらかがセンサを使うことなく推定できることを示し、力センサの数を減らしたパワーアシストロボットの制御法を検討する。これは、福祉的応用を視野に入れた上で、以下のような利点が存在するからである。

1. コスト面で有利

当然使うはずの力センサを使わなくてよいため、そのコストが削減されうる。

2. 構造面で有利

たとえ既存のロボットであっても、力センサを中に組み込んだり取り付けたりする必要がなく、シンプルな構造になりうる。

3. 操作者・環境はロボットの任意の場所に接触してよい

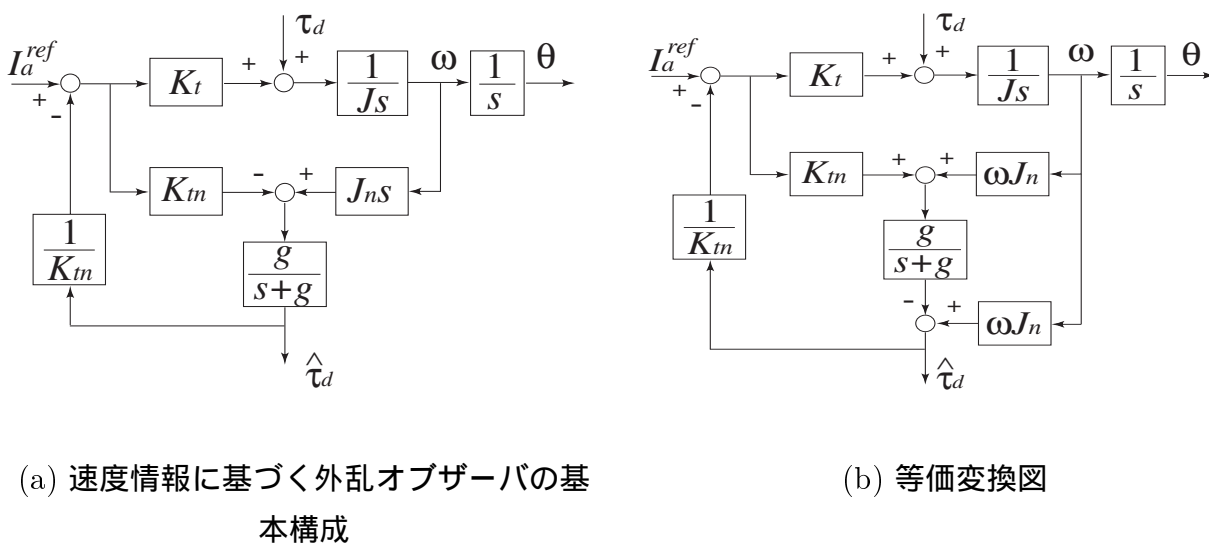
もし力センサを使う場合は、その設置したところに操作者と環境は触れなければならない。しかし、力センサが不要になれば、ロボットアームのどの部分に接触してもよくなり、福祉的な実用場面を想定しても大変有利である。

力センサを用いず推定を行うため、その信頼性や誤差などは当然問題となるが、特に制御に用いる上で大きな影響があるかどうかについては実験を通して検証していく。

2.5.2 外乱オブザーバの原理と特性

力の制御を行うパワーアシストロボットでは、人間の入力する力を測定する力センサを用意するのが当然である。特に、 τ_m と τ_e の二つの力に基づくパワーアシスト制御では、それぞれを測定するために二つの力センサが通常用意される [32][33]。しかし本研究では、外乱オブザーバ [40][41][42] を用いて人間もしくは環境との作用力を推定することで、力センサの数を減らすことを目指す。これにより、コスト面、構造面、さらにロボットアームのどの部分に環境が接触してもかまわない、など多くの利点が生まれる。

外乱オブザーバはロボットの各軸に含まれる外乱トルクを推定するものであるが、その出力値 $\hat{\tau}_d$ には干渉トルク τ_{int} 、重力項 τ_g 、摩擦トルク、 $F + D\dot{\theta}$ 、慣性変動項 $\Delta J(\theta)\ddot{\theta}$ 、他の外力 τ_{ext} などが含まれる。また、各外乱は、等角速度運動や角加速度運動により同定できることが示されている [40]。図 2.7(a)(b) に外乱オブザーバの基本構成ととの等価変換図を示す。



(a) 速度情報に基づく外乱オブザーバの基本構成

(b) 等価変換図

図 2.7: 外乱オブザーバの構成図

外乱推定値 $\hat{\tau}_d$ は以下のように表される。

$$\hat{\tau}_d = \tau_{int} + \tau_g + F + D\dot{\theta} + \Delta J(\theta)\ddot{\theta} + \tau_{ext} \quad (2.4)$$

2.5.3 摩擦トルクの同定とその補償

本実験では、重力成分の存在しない平面ロボットの一つの軸（1軸のみ、あるいは2軸のみ）を用いるため、干渉力や重力成分は無視し、あらかじめ同定した摩擦トルクの値を差し引いて、外力の推定を行うこととする。ロボットの各軸における摩擦トルクの推定法にも同様に外乱オブザーバを用いる [40]。

今後の実験で用いる2軸DDロボットの各軸について、等速運動時の外乱トルクを推定することにより得られた摩擦トルクを図2.8に示す。

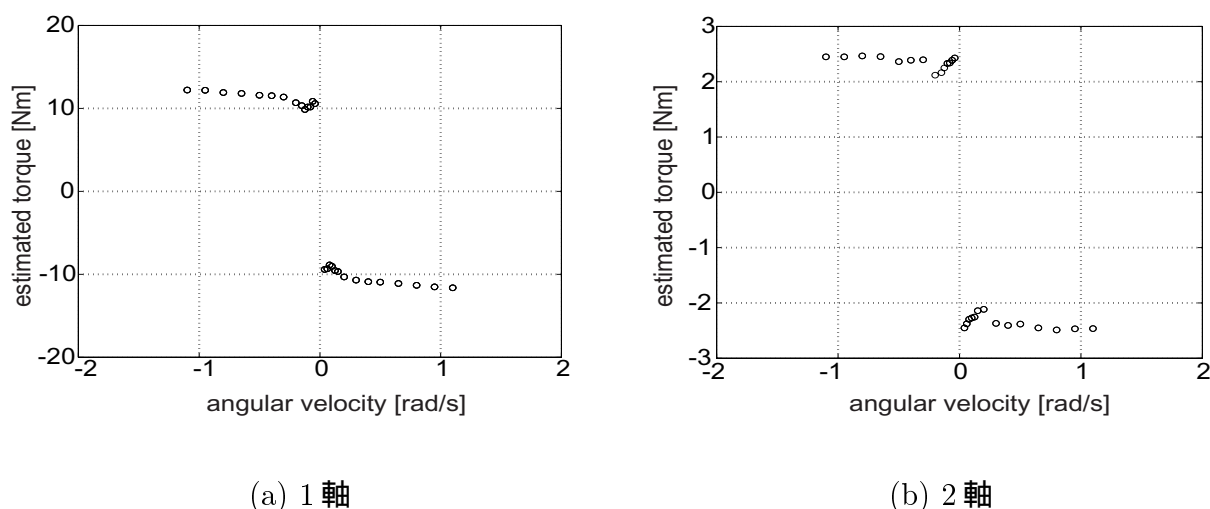


図 2.8: 各軸における摩擦トルク

2.5.4 ロボットへの作用トルクの推定法

ここで、外乱オブザーバを用いて操作者側が力センサレスとなるパワーアシストの実現を検討する。式(2.5)のように、外乱オブザーバの出力 $\hat{\tau}_d$ から干渉力 τ_{int} 、摩擦力 $F + D\dot{\theta}$ 、慣性変動項 $\Delta J(\theta)\ddot{\theta}$ などを差し引くことで、人間の加えた力の推定値 $\hat{\tau}_m$ を求める。

$$\hat{\tau}_m = \hat{\tau}_d - (\tau_{int} + F + D\dot{\theta} + \Delta J(\theta)\ddot{\theta}) \quad (2.5)$$

人間 - ロボット - 環境接触型 < HRE system > のように二つの力情報を取得する必要がある場合、外力 τ_{ext} の中には、人間の加えた力 τ_m と環境との接触力 τ_e が含まれる。したがって、例えば、人間の力 τ_m を力センサで測定し、環境との接触力 τ_e を外乱オブザーバで推定する場合は式(2.6)を用いる。

$$\hat{\tau}_e = \hat{\tau}_d - (\hat{\tau}_m + \tau_{int} + F + D\dot{\theta} + \Delta J(\theta)\ddot{\theta}) \quad (2.6)$$

2.6 本研究で用いる実験装置の構成

本研究では、人間 - ロボット - 環境接触型 < HRE system > の形態においては τ_m を力センサで測定し τ_e を外乱オブザーバで推定、人間-ロボット接触型 < HR system > の形態においては τ_m を外乱オブザーバで推定することで、従来より一つ力センサを減らしたパワーアシストロボットの実現を目指す。

2.6 本研究で用いる実験装置の構成

本実験において用いる 2 軸 DD ロボット装置の構成図を図 D.2 に示す。ここでは、サンプリング周期ごとのタスクを補償するため RT-Linux を計算機に導入している。これにより、計算機上のクロックと実世界での時間軸を合わせ、両者を同期させることができる。これをリアルタイム性と呼ぶ。具体的には、処理開始タイミングと処理完了までの時間において実時間制約が満たされている環境ができる。

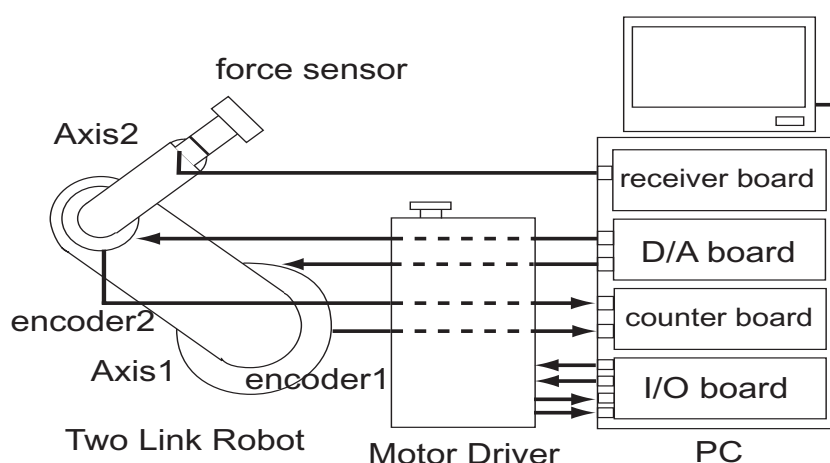


図 2.9: 2 軸 DD ロボット装置の構成図

実験に用いるロボットの各関節には、ギアなしで低速度・高トルクを実現するリラクタンスマータを使用している。これを、カウンタボード、D/A ボード、パラレル I/O ボードを組み込んだ計算機により制御を行う。制御の手順としては、

1. PC から I/O ボードを通してモータドライバへ運転準備信号を送る。
2. エンコーダから送られてきたパルスのカウントボードで数えることで関節角度を測定する。また、力センサの情報もレシーバボードを通して読みとる。
3. 各センサ情報から制御則に従い、指令トルクを計算する。
4. PC から送られてきた指令トルクを D/A ボードでアナログ指令トルクに変換する。
5. モータドライバがそのアナログ指令トルク相応の電圧をモータにかける。
6. PC から I/O ボードを通してモータドライバへ運転停止信号を送る。

この2から5をサンプリング周期ごとに繰り返すことによりロボットの制御を行う。また本研究では、位置制御と力制御を含めた制御周期を1[ms]とする。また、前節までに述べた外乱オブザーバの時定数 $\frac{1}{g}$ は、1軸、2軸ともに50[ms]とする。

2.7 パワーアシスト動作の評価法

福祉機器応用を考える上では、その機器をいかに評価するかが大変重要な課題となる。福祉機器の評価の枠組はまだ確立されておらず、評価法自体を検討する必要がある。本研究では、パワーアシスト動作の評価法として、数学的な表現に基づく方法と、実際に多くの被験者に使用してもらってアンケートをとる方法、両方について行い、総合的に評価することを目指す。

2.7.1 数学的表現によるパワーアシスト動作の評価

パワーアシストの一つの大きな目的は、操作者である人間に要求される力を減らし楽に動作させることである。これまでの研究例では、操作感や使いやすさについて被験者にアンケートをとることで評価を行うものも多かった[43][44]。ここでは、式(2.7)で定義される評価値 V を用いて数値的にパワーアシスト動作に対して評価を行う。

$$V = \frac{\int_0^T F_m dt}{x_f - x_0} \quad (2.7)$$

T は動作に要した時間、 x_f は最終位置、 x_0 は初期位置である。この評価値 V は、単位距離動作させるのに必要な力積の値を表す。この値が小さいほど、操作者は容易に物体を移動させることができる。後ほどの実験でこの評価法を適用する。

2.7.2 被験者を用いたパワーアシスト動作の評価

数学的表現による評価を行うだけでなく、実際に多くの被験者に試してもらい、いくつかの重要な観点から評価をしてもらうことも必要である[43][44]。特にパワーアシスト動作において重要な項目である「人間がどう感じるか」、についてはある程度多くの被験者に使ってもらい、その感じたことを聞いて評価するのが適切である。特に福祉的応用を意識する場合には「女性」はどう感じるか、「お年寄り」はどう感じるかの評価も重要である。

次章以降で、各パワーアシスト制御手法とその評価実験について述べる。本章で定義したようないくつかのパワーアシストロボットの要求事項、例えば「楽であるか」、「安定性、安心感」、「操作性、使いやすさ」、「環境変動を感じるか」などをそのまま評価ポイントとして採用し、それらをいかに満たしているか、どの項目において最も優れているか、について明らかにしていくこととする。

第3章 操作者・ロボット・環境間のインタラクションに注目したパワーアシストロボットの制御法

3.1 三者間のインタラクションを考慮する必要性と要求項目

本章では、前章で三つに分類したパワーアシスト形態のうち、図 3.1 のような人間・ロボット・環境の三者がその二接点で力を作用させるような場合について、位置制御をベースとした手法と力制御をベースとした手法についてそれぞれ比較検討する。位置でアシストするか、力でアシストするかというパワーアシスト制御の本質的な議論について、さまざまな実験と被験者による比較評価を通して、その動作補助の特徴や優位性を明らかにしていく。

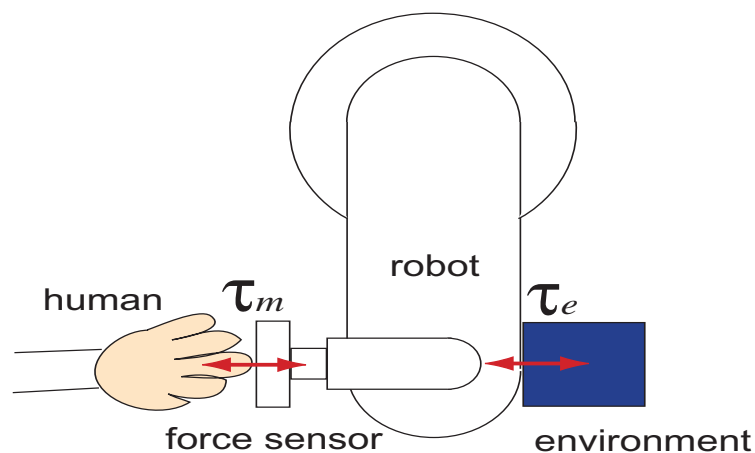


図 3.1: 人間 - ロボット - 環境の位置関係

3.2 アシストするのは位置か力か

3.2.1 両者のアシスト動作における役割

パワーアシスト制御系を考える上では、必ずこの大きな問題に直面する。位置を変えることがアシストにつながるか、力を出すことがアシストにつながるか、という問題である。

その答えは、「どちらも可能」である。人間がモノを運んだり持ち上げたりする場合、腕の位置に重きを置くか、出す力の大きさに重きをおくかはその場面、状況によって異なる。このことを考えても、位置でのアシスト、力でのアシスト、どちらでも可能であり、それを場面、状況によって使い分ける必要性があることがわかる。

位置でアシストをするということは、パワーアシストロボットの制御系で何らかの位置軌道を生成し、そのとおりにロボットを制御することである。例えば人間が位置を意識して動作する場合、人間の意識の中ではその位置軌道の安定性や滑らかさを重視しており、力の大きさは二の次である。これは、前章で定義したパワーアシスト動作への要求事項で言えば、第二要求事項の「操作性」に非常に近い概念である。第一要求事項「力の増幅・補助」という観点においてはやや劣るかもしれない。

一方、力でアシストをするということは、パワーアシストロボットの制御系で何らかの力指令値を生成し、そのとおりの力が出せるようにロボットを制御することである。人間が力を意識して動作する場合、その力加減が最も優先されるものであり、その結果どのような位置軌道をたどるかは二の次であると言える。パワーアシストロボットへ適用する場合は、先ほどと逆で、第一要求事項「力の増幅・補助」に重点がおかれるが、第二要求事項の「操作性」などはやや劣るかもしれない。

どちらかを優先すればどちらかがやや劣るが、それでかまわない。人間がどちらかの意識をもつと同様に、パワーアシストロボットも場面や状況に合わせてどちらかに意識をもてば十分であると考ええる。このような考えのもと、両者の具体的な実現手法とその特徴や優位性を明らかにしていく。

3.2.2 位置制御ベース手法と力制御ベース手法の定義

本研究では、シンプルな2軸ロボットを用いて回転方向でアシスト動作の実験を行うため、回転方向の力、つまりトルクの次元で表現を統一することにする。

ここで、二つの基本的なパワーアシスト手法、位置制御ベース手法と力制御ベース手法の定義について説明する。操作者の入力するトルクを τ_m 、ロボットと環境の間に作用するトルクを τ_e 、目標とするアシスト比を α とする。

最初に、位置制御をベースとしたパワーアシスト手法の基本構成図を図6.10に示す。この方法は、操作者の入力トルク τ_m とロボットと環境間の作用トルク τ_e の情報から、ロボットが動くべき位置の規範値 θ_r を生成するものである。このような手法を位置制御ベース型パワーアシスト手法と呼ぶこととする。

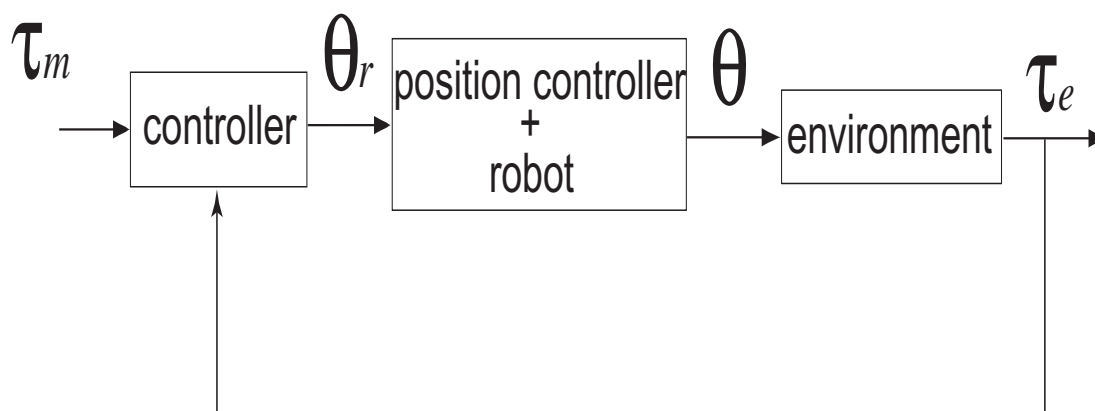


図 3.2: 位置制御ベース型パワーアシスト法の基本構成図

一方の力制御をベースとしたパワーアシスト手法の基本構成図を図 6.2 に示す。この方法は、操作者の入力トルク τ_m の情報から、ロボットが環境に作用させるべきトルクの規範値 τ_r を生成し、力制御系を通してロボットを制御するものである。このような手法を力制御ベース型パワーアシスト手法と呼ぶこととする。

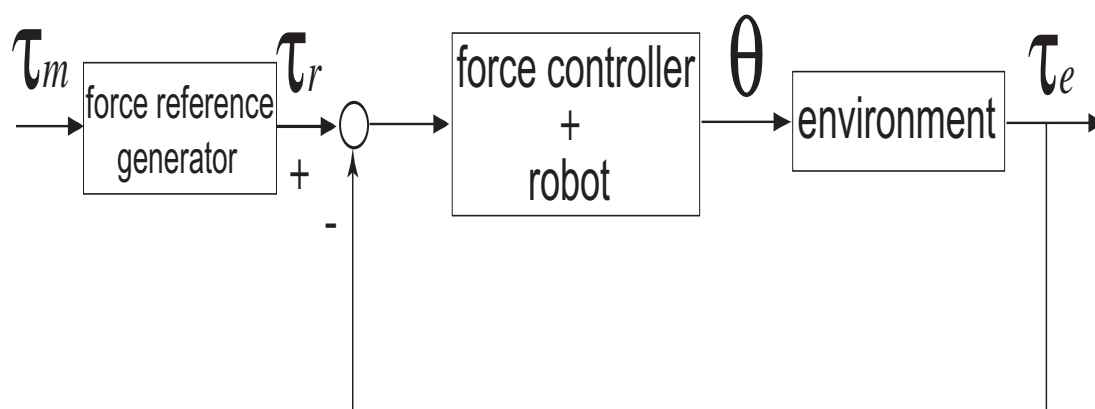


図 3.3: 力制御ベース型パワーアシスト法の基本構成図

このような二つの制御手法に分類したが、パワーアシスト動作ではこの位置や力の規範値をいかに作り出すかという点に大きな意味があり、それが操作者に感じさせる操作性や使いやすさ、環境とのインタラクションなどに大きく関係してくる。

3.3 力制御系に内包されるロバスト位置制御系の構造と特性

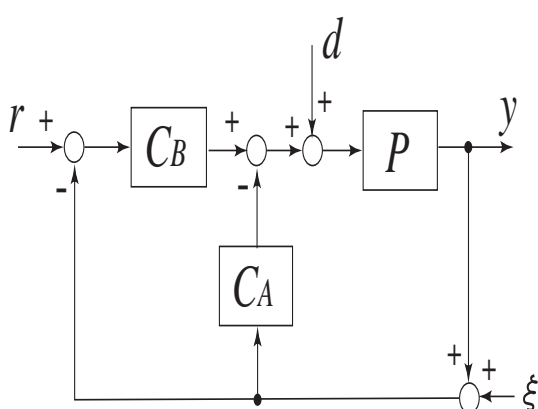
前節に示した、力を制御する両手法とも、制御系の一番内側にロバストな位置制御系を内包するようにしている。ここでは、目標値応答と外乱抑圧特性を独立に指定できる2自由度制御系 [45][46] を用いる。このような位置制御系を基本に据えることで、力制御などマニピュレータに要求されるほとんどすべての制御を統一かつ容易に実現できることが示されている [45][46]。

2自由度制御系は図 3.4(a) のような構成をしており、コントローラ $C_A(s)$, $C_B(s)$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$C_A(s) = \frac{1}{P_n(s)} \cdot \frac{Q(s)}{1 - Q(s)} \quad (3.1)$$

$$C_B(s) = \frac{G_{ry}(s)}{1 - G_{ry}(s)} \cdot \frac{1}{P_n(s)} \cdot \frac{1}{1 - Q(s)} \quad (3.2)$$

r は指令値、 y は出力、 d は外乱、 ξ は観測雑音、 P_n はプラントのノミナルモデル、 $Q(s)$ は自由パラメータ、 $G_{ry}(s)$ は目標値応答特性の指定値、 θ は関節角度を表す。自由パラメータ $Q(s)$ はこの両者にもたせるべき周波数特性であり、図 3.4(b) のようなローパスフィルタにする。



(a) 構成図

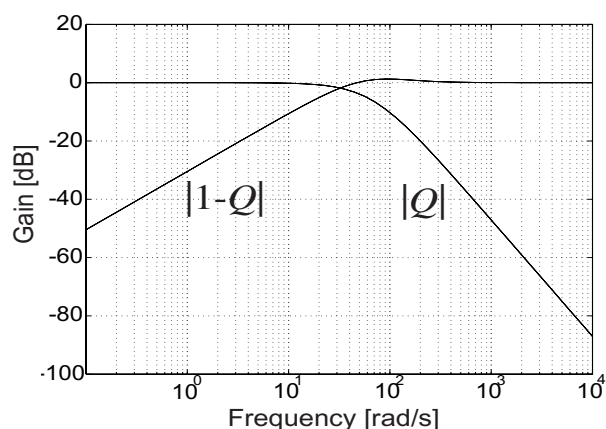
(b) Q と $1 - Q$ の周波数特性

図 3.4: 2自由度制御系の構造

3.3 力制御系に内包されるロバスト位置制御系の構造と特性

実際に2軸DDロボットの位置制御系に用いた目標値応答特性 G_{ry} と自由パラメータ $Q(s)$ は以下のような式に表される。 τ_r, τ_d はそれぞれ目標値応答特性と外乱抑圧特性の時定数である。

$$G_{ry}(s) = \frac{1}{(\tau_r s + 1)^2} \quad (3.3)$$

$$Q(s) = \frac{1 + 3\tau_d s}{(\tau_d s + 1)^3} \quad (3.4)$$

以降に示す実験では、1軸で $\tau_r = 20[\text{ms}]$, $\tau_d = 17[\text{ms}]$ 、2軸で $\tau_r = 20[\text{ms}]$, $\tau_d = 10[\text{ms}]$ としている。

各関節にこの2自由度ロバスト制御を施して干渉力やパラメータ変動を抑圧することにより、各関節を非干渉化してロボットを制御することができる。今後検討するパワーアシスト法もこのようなロバストな位置制御系を基本に据えたものを考える。

3.4 パワーアシストにおける環境とその負荷特性

3.4.1 パワーアシスト動作におけるさまざまな環境とその負荷特性

パワーアシスト動作において力を受けるもの、つまり「環境」には、患者や重い荷物、堅いものなど様々なものが考えられる。中にはその特性が数学的に容易に表現できるものもあるかもしれないが、ほとんどの環境は複雑な非線形要素をもっているなどして容易に表現できない。パワーアシスト動作を始める前に、その詳細なモデルを同定するのも非現実的である。例えば患者が環境となる場合、その環境特性は患者の姿勢や着ている服などによって変わるはずである。そこで、たとえ環境の正確な特性を知らなくても、どのような環境にもパワーアシスト動作を実現することが求められる。

3.4.2 外乱オブザーバを用いた環境との作用力の推定

前章で、ロボットにはたらく外力となる操作者の入力トルク、環境との間にはたらく作用力のどちらかを推定する方法を記した。本章で行う実験では、前者を力センサで計測、後者をオブザーバで推定することとする。遠心力、コリオリ力、干渉力等は無視し、式(3.5)のように摩擦力 τ_f と操作者の入力トルク τ_m を差し引くことで、環境作用力を推定する。

$$\tau_e = \hat{\tau}_d - \tau_f - \tau_m \quad (3.5)$$

3.4.3 実験に用いる環境とその負荷特性

本章で扱う、操作者 - ロボット - 環境の位置関係をもつパワーアシスト形態を実現するための実験の風景を図 3.5 に示す。



図 3.5: 実験の風景

3.4 パワーアシストにおける環境とその負荷特性

本実験では、(1)ばね定数のみの簡単な特性をもつ環境として、ゴムを束ねたものを操作者側に固定し、ロボットに対して $-\theta$ 方向に引っ張ることで模擬する、(2)複雑で容易に表現することのできない特性をもつ環境として、段ボールを操作者の逆側に置いて押す、というアシスト動作を考える。

簡単な特性をもつと考えられるゴム束の負荷特性は、

$$E = K_e \quad (3.6)$$

と表され、このとき、

$$\tau_e = K_e \theta \quad (3.7)$$

の力が作用すると考えられる。しかし、一方の段ボールをロボットで押す場合、段ボールの重量、段ボールの接触面でのへこみ、段ボールと地面との間の摩擦力などが複雑にはたらく、数学的にも容易に表現することができない負荷特性をもつ。

図 3.6 に、ゴムを 3 本束ねた環境と 6 本束ねた環境について、ロボットを $+\theta$ 方向に等速運動させたときの位置と作用力推定値 $\hat{\tau}_e$ を示す。ロボットの位置 θ と $\hat{\tau}_e$ は、ほぼ式 (3.7) のような比例関係になっており、ばね定数の値はそれぞれ、 $K_e = 15, 30$ と推定される。

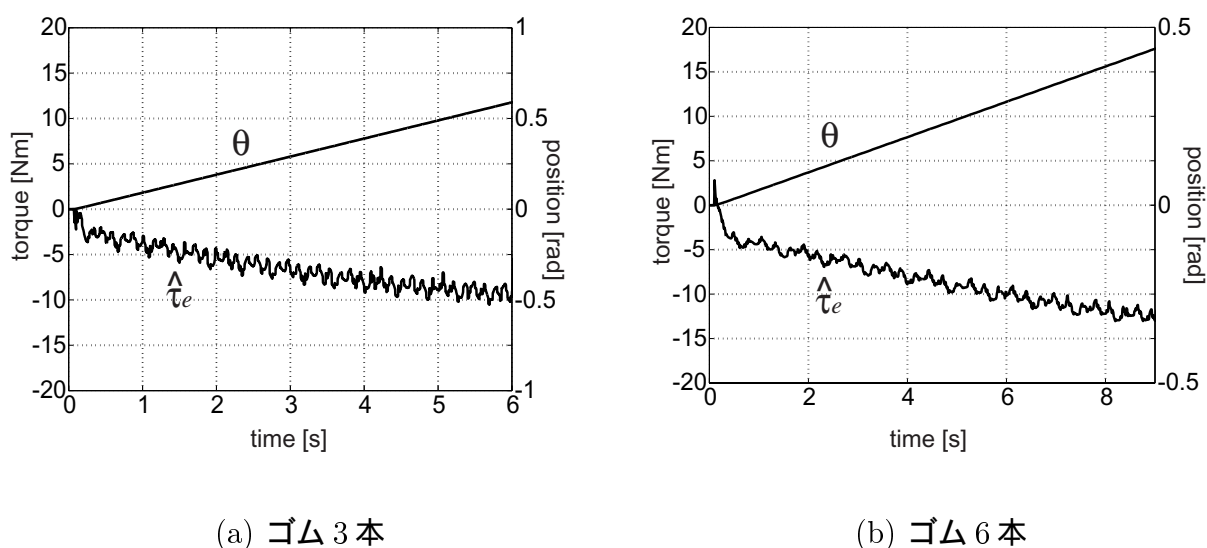
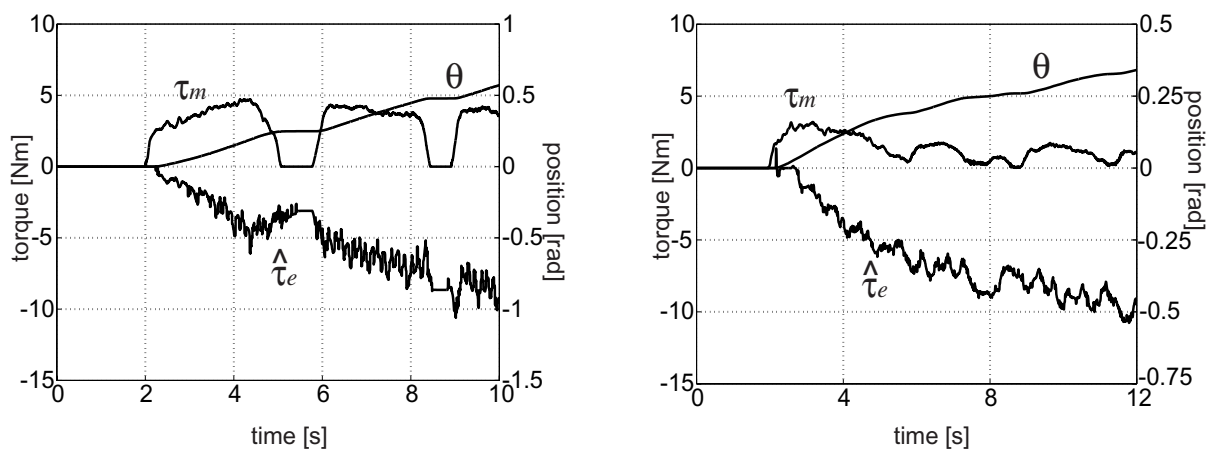


図 3.6: 環境の負荷特性の同定

これらの環境に対して、操作者の入力トルク τ_m にインピーダンス制御を適用し、式 (3.5) に基づいて環境との作用力 τ_e を推定した結果を、ゴムと段ボールの場合それぞれについて図 3.7, 3.8 に示す。

3.4 パワーアシストにおける環境とその負荷特性



(a) ゴム 3 本

(b) ゴム 6 本

図 3.7: 環境との作用力の推定 (ゴム)

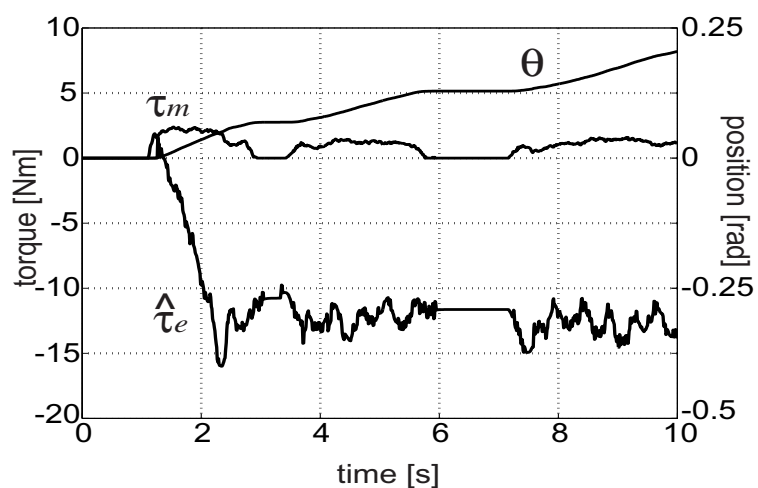


図 3.8: 環境との作用力の推定 (段ボール)

ゴムの場合は、先ほど同定した値どおりの環境作用トルクが式 (3.5) により推定されている。段ボールの場合は、ほぼ 12[Nm] の地面との摩擦力の大きさなどが見てとれる。

3.5 位置制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

3.5.1 位置制御ベース型パワーアシスト法の基本構成とその特徴

前述のように、位置制御ベース型のパワーアシスト法では、操作者の入力する力、あるいは環境に作用する力の情報から何らかの位置規範値を生成し、ロボットの位置指令値として与えるものである。図 6.10 に位置制御ベース型パワーアシスト法の基本構成図を示す。

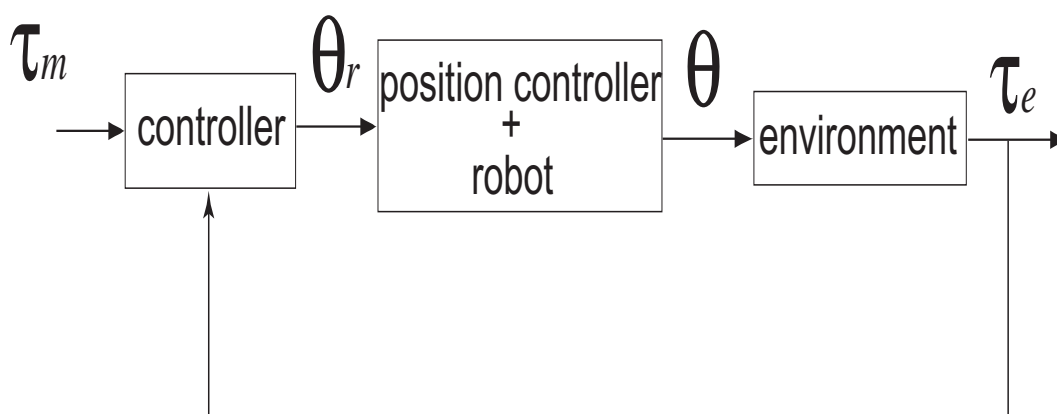


図 3.9: 位置制御ベース型パワーアシスト法の基本構成図

3.5.2 仮想ツールダイナミクスによる手法

小菅ら [33] は仮想ツールの概念を提案している。アーム自身に一定の仮想的なインピーダンス特性をもたせることで、人間と環境の特性がわからなくても、また、作業によって変化する場合でも、力の増幅と操作性を同時に指定できる制御系を構成した。人間が道具を用いて作業を行なう場合、全体のシステムは、人間-道具、環境-道具の間にそれぞれ相互作用が生じるシステムと考えることができる。一方、マンマシンシステムは、人間-機械系、環境-機械系の間に相互作用が生じる複雑なシステムであり、環境の特性は作業により変化し、未知であることが多い。ここで、もし、機械系を道具と同一の特性をもつように制御することができれば、環境、人間の特性がわからなくても安定な制御系を構成することが期待できる。道具と同一の特性をもつシステムを仮想的に考え、これを「仮想ツール」と呼ぶ。

ここで、人間が道具を用いて作業を行う場合を考える。力の増幅をしたいとき、例えば図 3.10(a) のようなてこを、作業に応じた大きさ、重さ、動かしやすさを考慮して選ぶ。したがって、仮想ツールには、人間の力の増幅、操作性が自由に指定できることが必要になる。そのために、次式の仮想ツールのモデルを考える。

$$M_v \ddot{x} + D_v \dot{x} + K_v x = Q F_m - F_e \quad (3.8)$$

M_v, D_v, K_v : 仮想ツールの質量行列、粘性行列、ばね定数行列 (ここでは、 $K_v = 0$ とする。)

Q : 人間の力を増幅する倍率

このモデルを用いることにより、機械系の操作性 (左辺) と人間の力の増幅 (右辺) を任意に指定することができる。

操作性

操作性は、自由空間でのアームの動かしやすさを意味する。自由空間内では、環境力ははたらかないので、 $F_e = 0$ となり、

$$M_v \ddot{x} + D_v \dot{x} = Q F_m \quad (3.9)$$

が成立する。 M_v と D_v の値を変えることにより操作性を変えることができる。

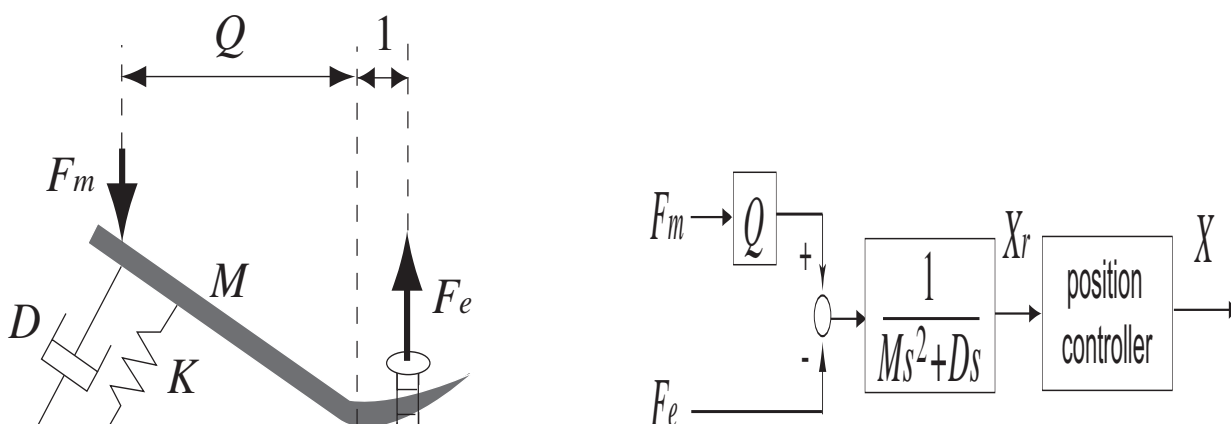
力の増幅率

拘束状態 (機械系の運動が止まっている状態) では $\ddot{x} = 0, \dot{x} = 0$ となるので、

$$Q F_m = F_e \quad (3.10)$$

が成立する。 Q によって人間の力の倍増率を変えることができる。

機械系の見かけの特性が、式 (3.8) の特性をもつように制御することで、仮想ツールの動特性を実現できる。システムの運動が道具と同一の特性をもつようになるので、人間や環境の特性によらず、安定な制御系を構成できる。



(a) 概念図

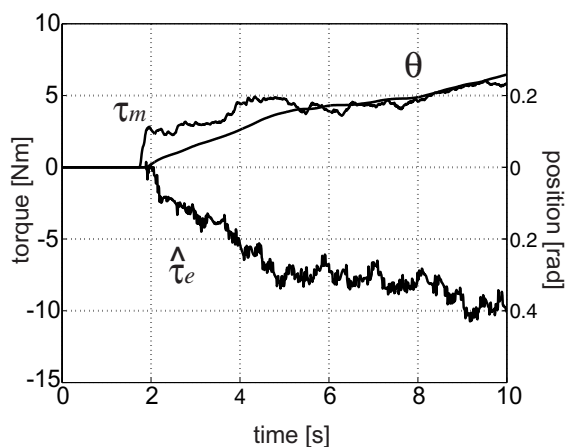
(b) ブロック図

図 3.10: 仮想ツールダイナミクスによるパワーアシスト法

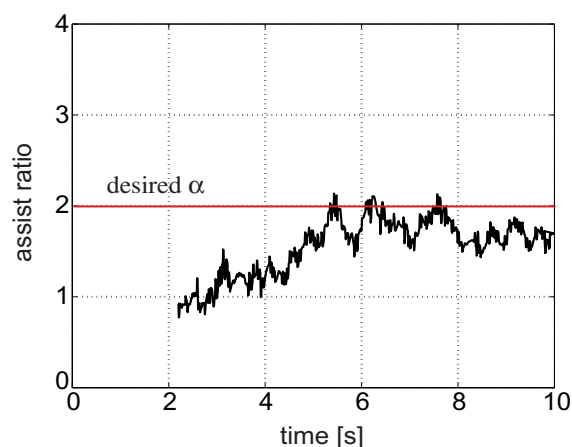
ここで、位置制御ベース型パワーアシスト法の一つとして、この仮想ツールダイナミクスを用いた実験を行う。ただし、小菅ら [33] は式 (3.8) を計算トルク法に基づいて制御し、

3.5 位置制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

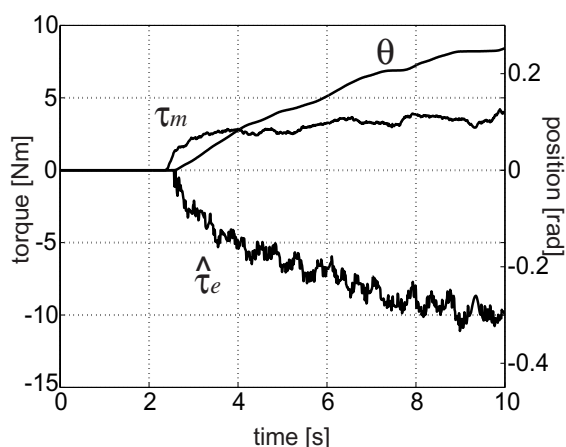
また2つの力 F_m , F_e をそれぞれ力センサを用いて測定している。ここでは、図 3.10 のようにわかりやすいブロック図に表し、ロバスト位置制御系への位置指令値生成部分に仮想ツールダイナミクスの考えを適用した。また、力センサは二つ用いず、環境との作用力は外乱オブザーバで推定した。(a) $Q = 2$, (b) $Q = 3$ として実験を行った結果を図 3.11 に示す。



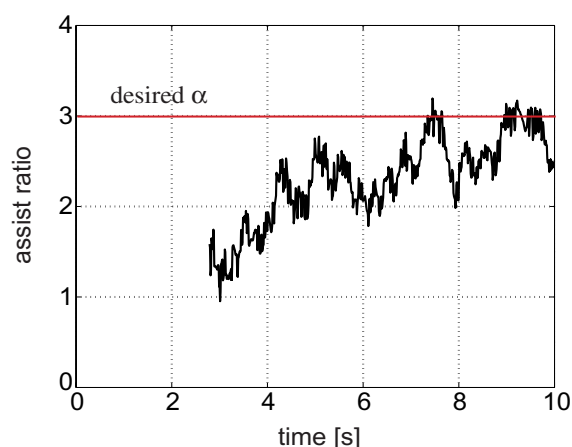
(a-1) $Q = 2$ としたときの位置と力の応答



(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-1) $Q = 3$ としたときの位置と力の応答



(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.11: 仮想ツールダイナミクスの用いたパワーアシスト (ゴム 6 本)

いずれも安定した位置と力の応答が得られることがわかる。しかし、アシスト比 Q は直接制御しているわけではなく、目標通りの Q が得られるわけではない。

小菅ら [33] の実験でも簡単な特性であるバネを用いて行われただけである。実際のパワーアシスト動作の場面では、もっと複雑な特性をもつ環境が現れるはずであり、さまざまな実験を通して検討すべきである。

3.5.3 双方向インピーダンス制御を用いたパワーアシスト法

本研究では、位置制御ベース型パワーアシスト手法の一つとして、インピーダンス制御を操作者と環境で独立に行う形のパワーアシスト制御法を提案し、これを「双方向インピーダンス制御」と名づける。この手法は、前章で示したパワーアシスト動作への四つの要求事項のほとんどを実現するものであり、実験的検討を通して、その特徴と福祉応用の可能性を見出していくことにする。

最初に、操作者側にはその入力トルクから位置の規範値を生成するためにインピーダンス制御を用いる。これは主に操作者の操作性を決めるものである。次に、介護動作補助において環境が患者であったりする場合、患者とロボットは柔らかく接触し、例え暴れたりしても安全である必要がある。また、パワーアシスト動作の第三要求事項である、環境の挙動を操作者側にいくらか感じるようにすることも考慮すれば、環境との接触力からロボットの位置規範値への何らかの制御器が必要になることがわかる。そこで、この環境との接触力から操作者方向への位置変位を決めるために、もう一つインピーダンス制御器をもうける。

このように、操作者の操作性を保つとともに、環境と柔らかく接触し、それだけ操作者側に戻ってくるような制御系として、操作者側と環境側にそれぞれ独立にインピーダンス制御を行う制御系として、双方向インピーダンス制御を提案する。その概念図を図 3.12 に示す。

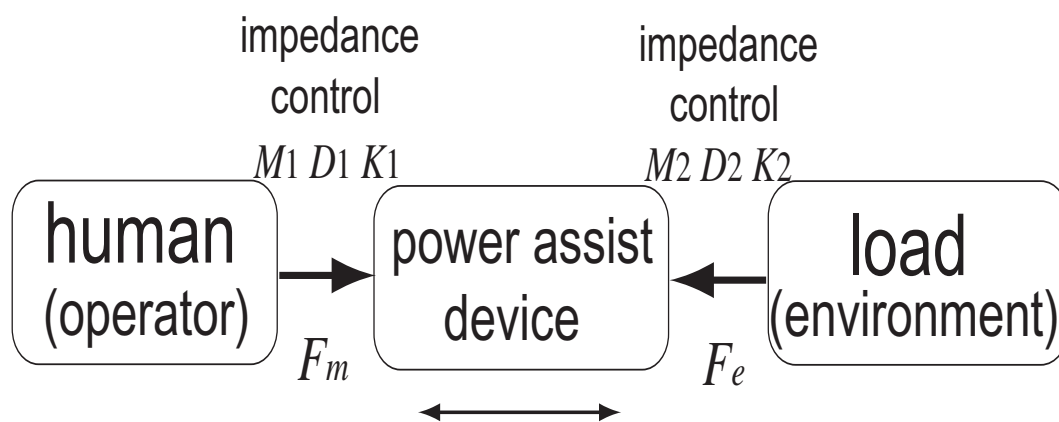


図 3.12: 双方向インピーダンス制御の概念図

この図に示したように、機器を挟んで操作者側と環境側が双方向にその情報を伝え合う、返し合うという構造が見られ、これは図 2.1 に示したパワーアシスト制御系で、一方向だけではなく双方向に情報が伝わるべきという第三要求事項をまさに実現した形となっている。

以上のような考え方に基いた双方向インピーダンス制御によるパワーアシスト法の基本構成を図 3.13 に示す。

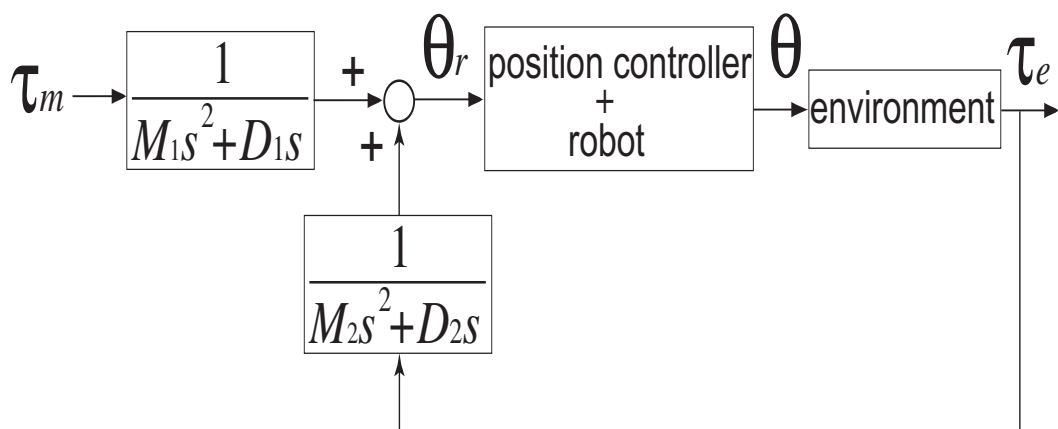


図 3.13: 双方向インピーダンス制御によるパワーアシスト法の基本構成図

操作者側、環境側それぞれにおけるインピーダンス制御器 C_1 , C_2 と、それらに基づく双方向インピーダンス制御系の位置指令値は以下の式のように表される。

$$C_1 = \frac{1}{M_1s^2 + D_1s}, \quad C_2 = \frac{1}{M_2s^2 + D_2s} \quad (3.11)$$

$$\theta_r = \frac{\tau_m}{M_1s^2 + D_1s} + \frac{\tau_e}{M_2s^2 + D_2s} \quad (3.12)$$

このとき、もし $\ddot{\theta}_r \simeq 0$, $\dot{\theta}_r \simeq 0$ 、つまりロボットが非常にゆっくり動く、あるいはほぼ静止して環境に力を与えるような場合、

$$\frac{M_2s + D_2}{M_1s + D_1} \tau_m + \tau_e \simeq 0 \quad (3.13)$$

が成り立つ。このとき、

$$\alpha = \frac{M_2s^2 + D_2s}{M_1s^2 + D_1s} \quad (3.14)$$

は、 τ_m から τ_e へのアシスト比を表していることになる。ある程度の速度や加速度をもって動作を行う場面では、アシスト比は違ったものになり、常に我々が設定したアシスト比を満たすような制御系であるとは言えない。

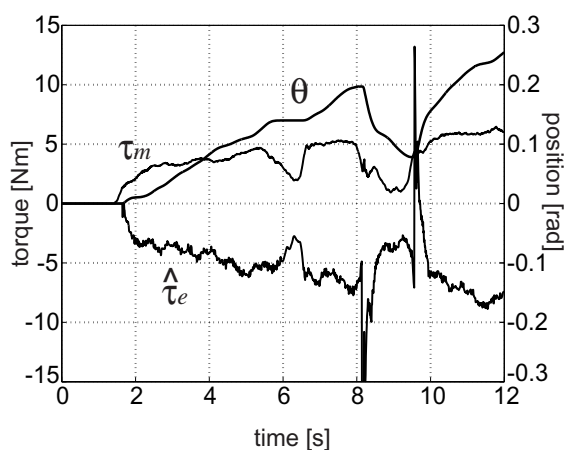
このアシスト比を上げていくことが操作者の負担を減らすことにつながり、第一要求事項の「力の補助」を満たすことになる。しかしアシスト比を上げていく際に、もし環境側のインピーダンスパラメータを大きくすると、環境とロボット間が堅い接触になっていき、安全な接触が実現できなくなる。パワーアシスト動作の場面に応じてパラメータを設計することになる。

インピーダンスパラメータが $\frac{M_1}{D_1} = \frac{M_2}{D_2}$ であれば、前述の仮想ツールダイナミクス [33] と非常によく似た形であるが、本手法のアシスト比にあたるものには周波数特性が含まれると言える。また、仮想ツールダイナミクス法と同様に、負荷がなく $\tau_e = 0$ の場合でも、インピーダンス制御器 C_1 によって自由空間で安定に操作できる。

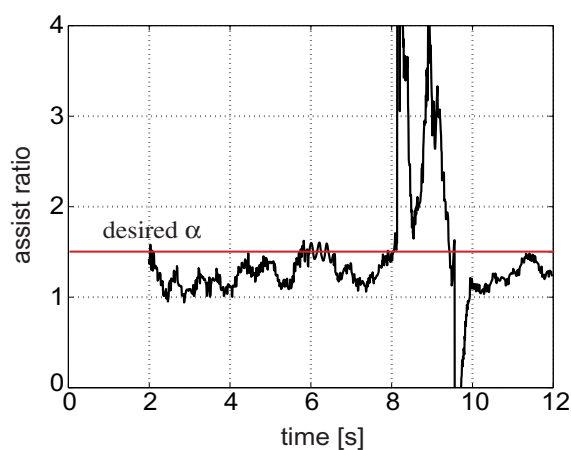
3.5 位置制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

剛性インピーダンスも含めると、 $M_1, D_1, K_1, M_2, D_2, K_2$ の六つのパラメータを調整することができ、第四要求事項として定義した「設計の自由度」の観点からも非常に有効な手法である。

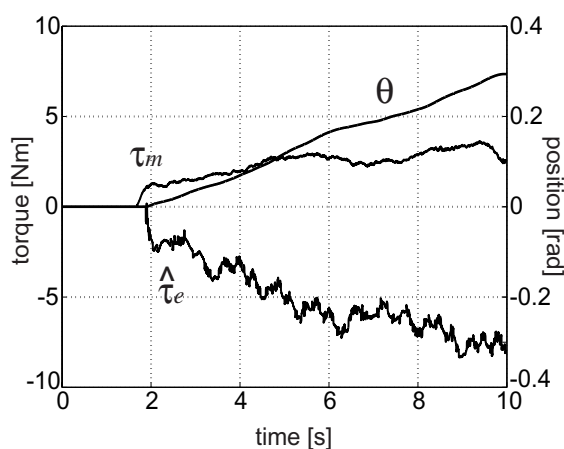
最初に、インピーダンスパラメータを (a) $M_1 = 0.5, D_1 = 20, M_2 = 0.75, D_2 = 30$, (b) $M_1 = 0.5, D_1 = 20, M_2 = 1.5, D_2 = 60$ 、つまりアシスト比を (a) $\alpha = 1.5$ 、(b) $\alpha = 3$ としてゴム3本 ($K_e = 15$) を環境として実験を行った結果を図3.14に示す。



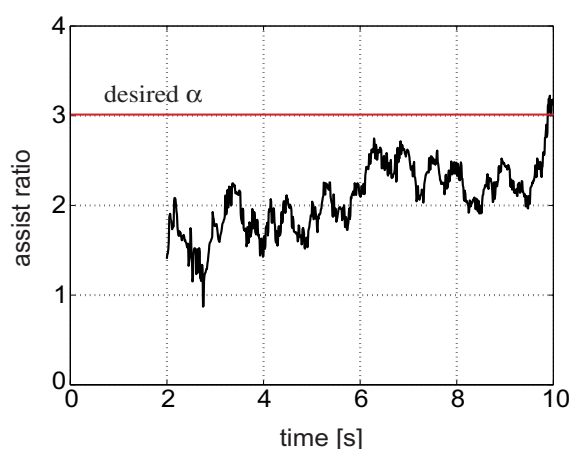
(a-1) 位置と力の応答



(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-1) 位置と力の応答



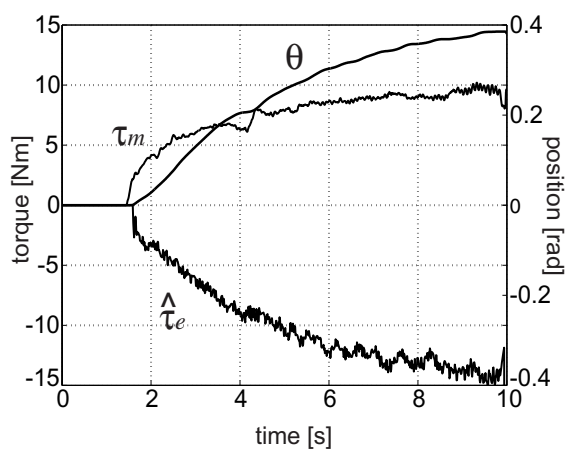
(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.14: 双方向インピーダンス制御によるパワーアシスト (ゴム3本)

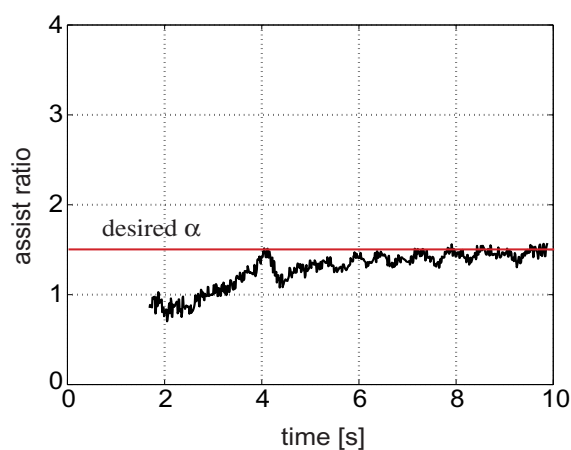
剛性のみの簡単な環境特性に対し、安定した力と位置の応答が得られることがわかる。インピーダンスパラメータの比により設定した目標のアシスト比は精度よくは実現されていないことがわかる。

3.5 位置制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

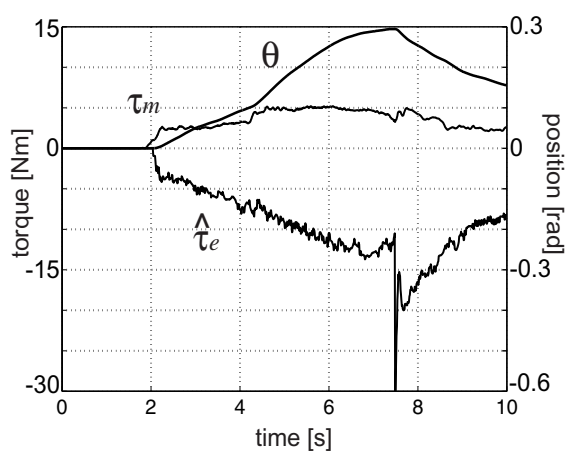
次に、インピーダンスパラメータを (a) $M_1 = 0.5, D_1 = 20, M_2 = 0.75, D_2 = 30$, (b) $M_1 = 0.5, D_1 = 20, M_2 = 1.5, D_2 = 60$ 、つまりアシスト比を (a) $\alpha = 1.5$, (b) $\alpha = 3$ としてゴム 6 本 ($K_e = 30$) を環境として実験を行った結果を図 3.15 に示す。



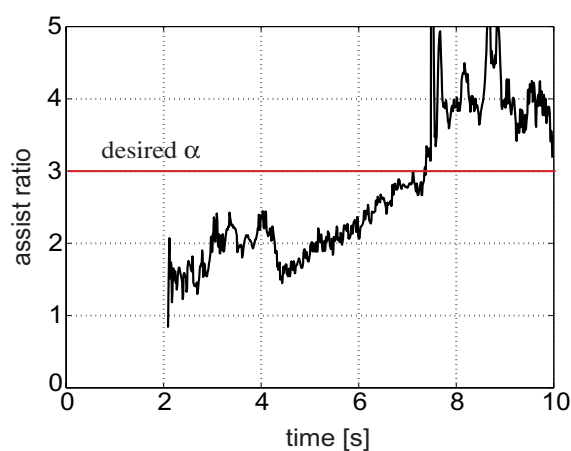
(a-1) 位置と力の応答



(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-1) 位置と力の応答



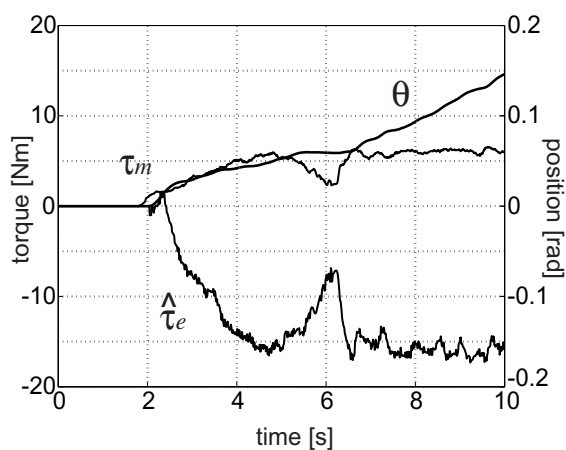
(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.15: 双方向インピーダンス制御によるパワーアシスト (ゴム 6 本)

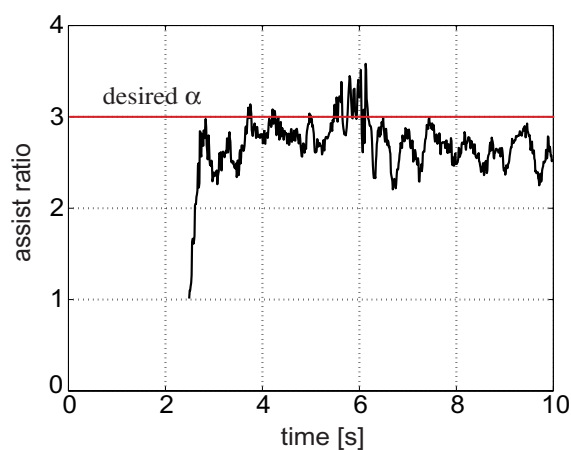
先ほどと同様、剛性みの簡単な環境特性に対し、安定した力と位置の応答が得られているが、目標のアシスト比と正確には満たしていないことが見てとれる。

3.5 位置制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

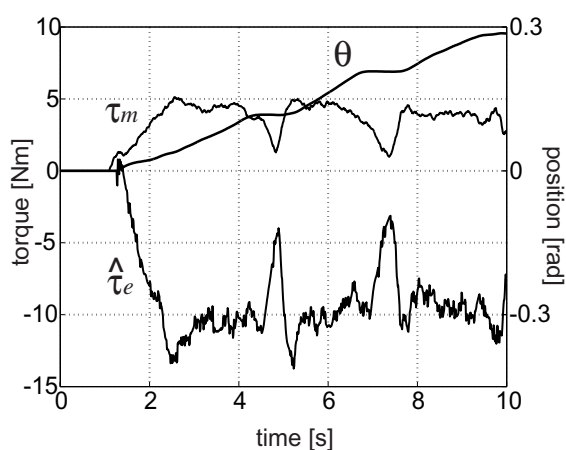
さらに、インピーダンスパラメータを (a) $M_1 = 0.5, D_1 = 30, M_2 = 1.5, D_2 = 90$ 、(b) $M_1 = 0.5, D_1 = 20, M_2 = 1.5, D_2 = 60$ として段ボールを環境とした実験を行った結果を図 3.16 に示す。



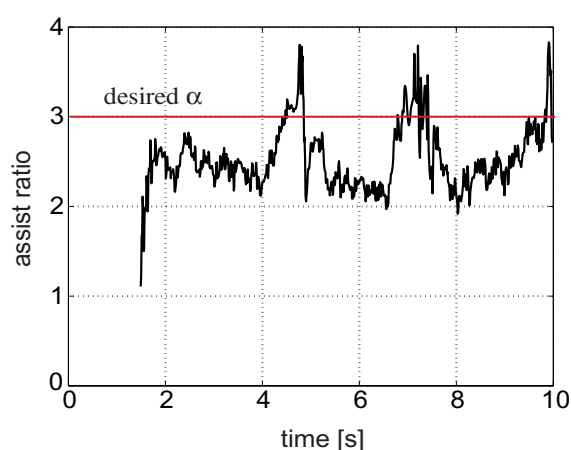
(a-1) 位置と力の応答



(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-1) 位置と力の応答



(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.16: 双方向インピーダンス制御によるパワーアシスト (段ボール)

段ボールのような複雑な環境特性であっても非常に安定した位置と力の応答が得られている。しかしこれらいくつかの実験を通して、仮想ツールダイナミクス手法と同じように本手法もアシスト比、言い換えると環境への作用力を直接制御はしていないため、指定どおりのアシスト比を実現することは難しいということがこれらの実験を通してわかる。

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

3.6.1 力制御ベース型パワーアシスト法の基本構成とその特徴

前述のように、力制御ベース型のパワーアシスト法では、力の規範値を生成し、実際に作用した力を測定あるいは推定した値をフィードバックする制御系となる。ここで、力の規範値となるのは、環境に作用させたい力のことであり、操作者の入力トルク τ_m とアシスト比 α から、環境への接触力の指令値 τ_r を以下のように求める。

$$\tau_r = \alpha \tau_m \quad (3.16)$$

図 6.2 に力制御ベース型パワーアシスト法の基本構成図を示す。

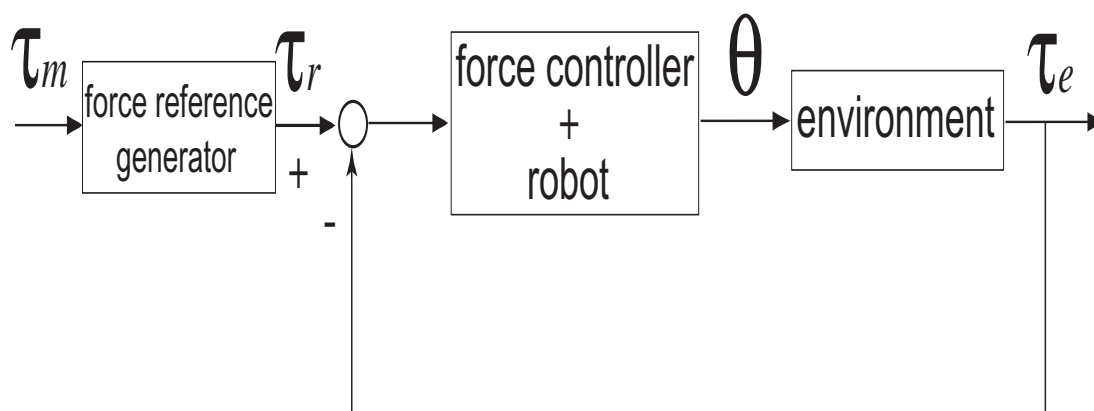


図 3.19: 力制御ベース型パワーアシスト法の基本構成図

τ_m から τ_r への変換、つまり力の規範値の生成法は上述のような単なる増幅だけでなく、周波数特性を持たせるようなものや、あるリミッタをもうけて危険性を防ぐようなこともできる。

3.6.2 単純フィードバック制御系による力制御ベース型パワーアシスト

前述のような、環境との作用力を直接制御する力制御ベース型パワーアシスト法のベースとなるものとして、従来の単純フィードバックによる力制御系の構成図を図 3.20 に示す。

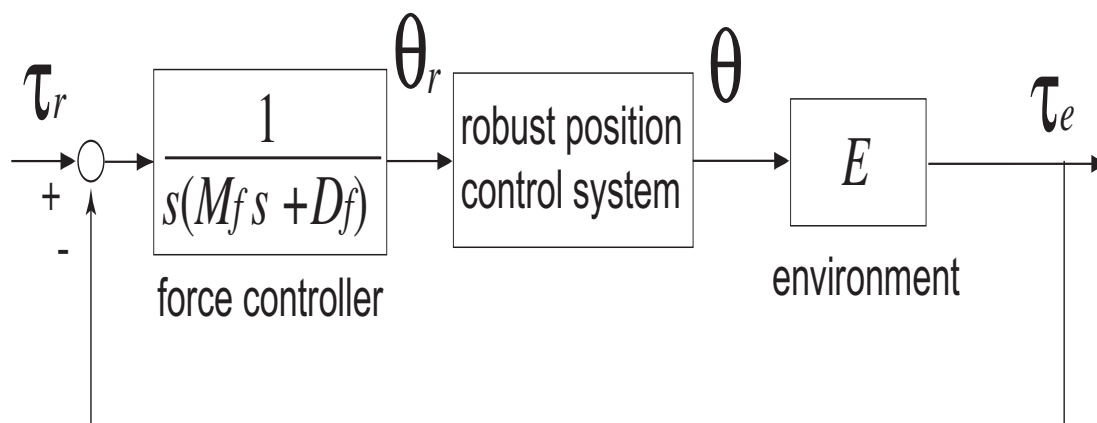


図 3.20: 単純フィードバック力制御系の構成図

環境のモデルを $D_e s + K_e$ とすると、力コントローラを $\frac{1}{s(M_f s + D_f)}$ とすることで、 τ_r から τ_e までの伝達関数を以下のような二次系に設計することが可能となる。

$$\frac{\tau_e}{\tau_r} = \frac{D_e s + K_e}{M_f s^2 + (D_f + D_e)s + K_e} \quad (3.17)$$

ここで、 τ_r から τ_e までの目標値応答特性を次式のような時定数 τ_{fr} の 2 次系にすると、力制御器のパラメータ M_f, D_f は環境のノミナル値 D_{en}, K_{en} と τ_{fr} を用いて表される。

$$\frac{\tau_e}{\tau_r} = \frac{D_e s + K_e}{M_f s^2 + (D_f + D_e)s + K_e} \quad (3.18)$$

$$M_f = K_{en} \tau_{fr}^2 \quad (3.19)$$

$$D_f = 2K_{en} \tau_{fr} - D_{en} \quad (3.20)$$

ここで、式 (3.20) から、

$$2K_{en} \tau_{fr} - D_{en} < 0 \quad (3.21)$$

となるノミナルモデルを設定してしまうと $D_f < 0$ となり、力制御器の部分に不安定極をもつこととなり、内部不安定となってしまうので注意しなければならない。

操作者の入力トルク τ_m に目標のアシスト比 α をかけた値を図 3.20 における力指令値 τ_r とすることで、パワーアシスト制御が実現できる。図 3.21 に、この単純フィードバック制御系に基づくパワーアシスト制御系の全体の構成図を示す。

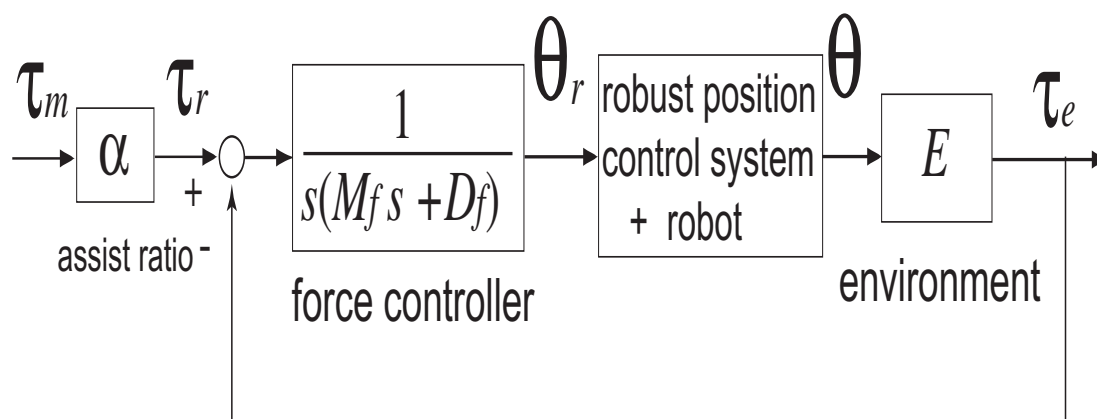


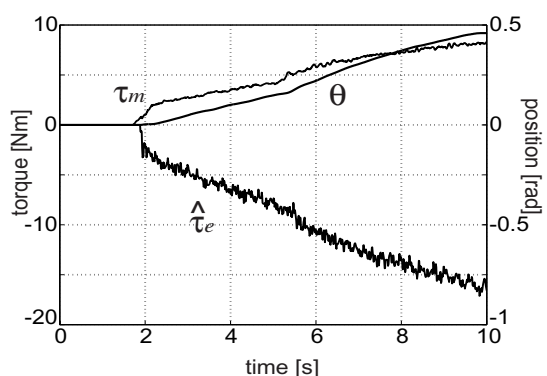
図 3.21: 単純フィードバック制御を用いたパワーアシスト制御系

ロボット制御系は、環境に与えるトルクが $\alpha\tau_m$ になるように制御を行う。つまりアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ が我々の設定した値 α に保たれるように制御を行う。

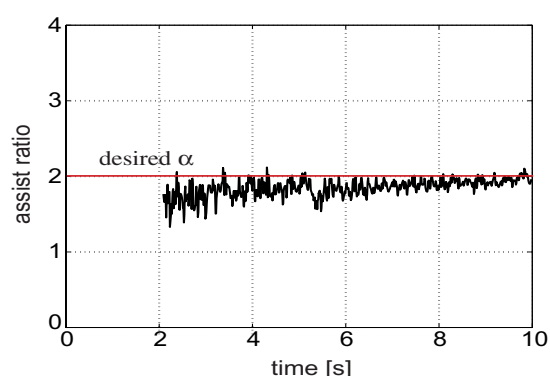
図 3.21 の手法で、アシスト比を (a) $\alpha = 2$, (b) $\alpha = 3$, (c) $\alpha = 4$ でゴムを環境とした場合の実験結果を図 3.22 にそれぞれ示す。力制御系の目標値応答特性の時定数は $\tau_{fr} = 200[\text{ms}]$ 、また、環境のノミナル値は同定実験で得られた値 $K_{en} = 30$ を用いている。また、実際に得られるアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ の計算結果も併せて示す。

環境のノミナル値に同定結果を用いた場合、力応答特性も良好でさらに位置応答も安定したパワーアシスト動作が可能である。前述の位置制御ベース型パワーアシスト法では実現できなかった目標アシスト比を実現できていることがわかる。

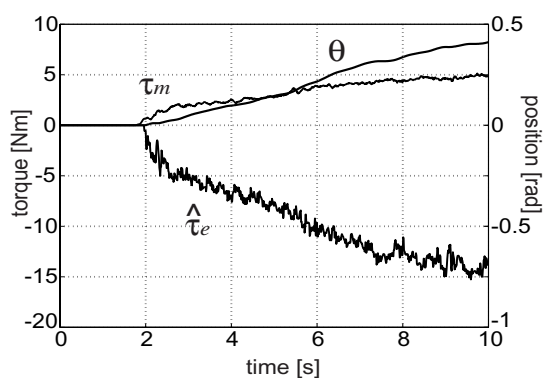
3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御



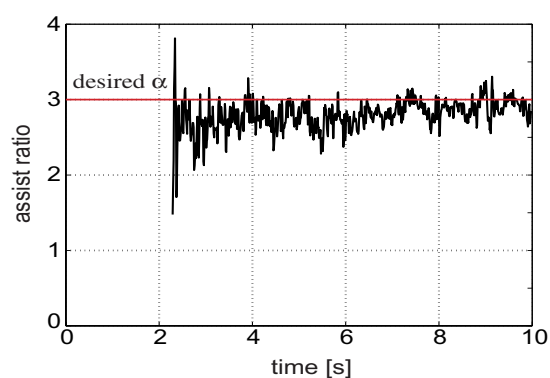
(a-1) $\alpha = 2$ としたときの位置と力の応答



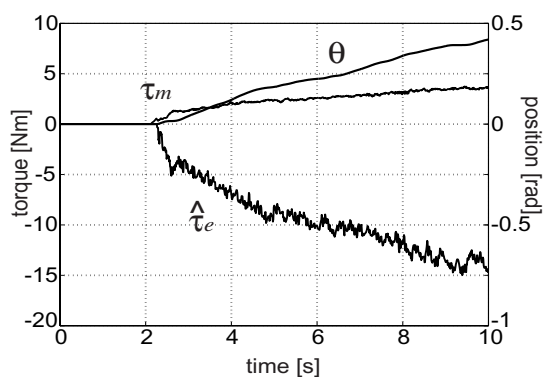
(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



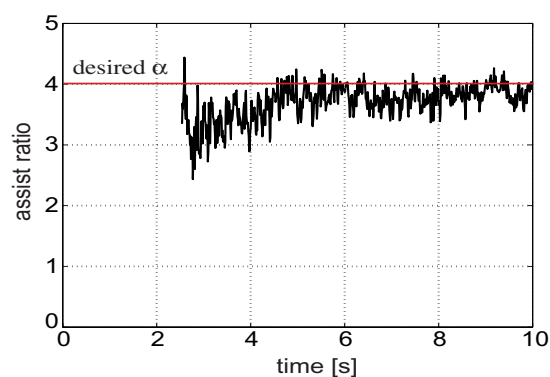
(b-1) $\alpha = 3$ としたときの位置と力の応答



(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(c-1) $\alpha = 4$ としたときの位置と力の応答



(c-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.22: 単純フィードバック制御を用いたパワーアシスト (ゴム 6 本)

ここで、アシスト比 α を変えた場合に、操作者への負担について式 (2.7) で定義した評価値 V を用いて評価を行った結果を図 3.23 に示す。アシスト比 α と評価値 V がちょうど反比例の関係になっていることが見てとれる。逆に言えば、式 (2.7) で定義した評価値 V が操作者にかかる負担の大きさを表すことを示しているともとらえられる。

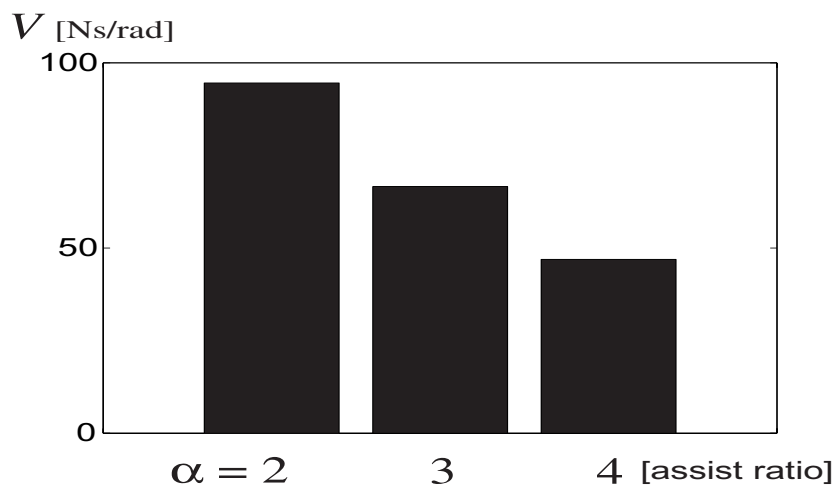
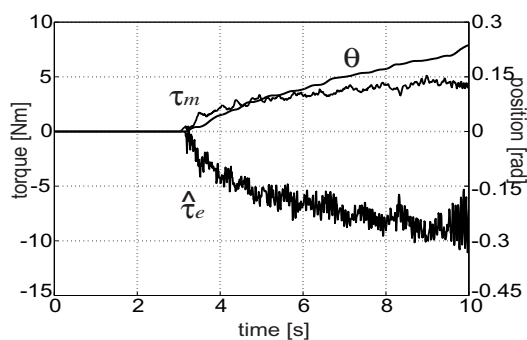


図 3.23: アシスト比による評価

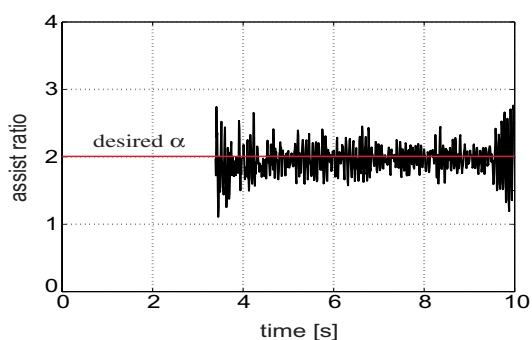
次に、環境のノミナル値を変えた場合の実験結果を図 3.24 に示す。環境ノミナルモデルはそれぞれ、(a) $K_{en} = 10$, (b) $K_{en} = 15$, (c) $K_{en} = 60$, (d) $K_{en} = 120$ とした。

環境のノミナル値 K_{en} を小さくすると、力制御系をハイゲイン化することにつながり、アシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ は目標の値 $\alpha = 3$ を忠実に実現できてはいるが、逆に位置応答に振動を生じさせている。これは操作性の悪化につながる。一方、環境のノミナル値 K_{en} を大きくすると、逆にゲインは小さくなり、アシスト比において目標の値を実現できていないが、位置応答は非常に安定している。

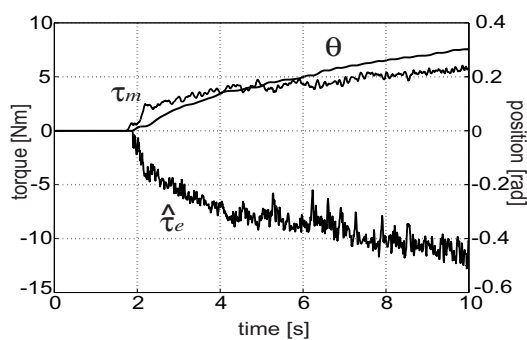
3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御



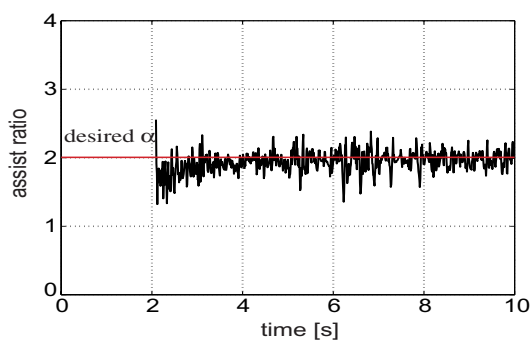
(a-1) $K_{en} = 10$



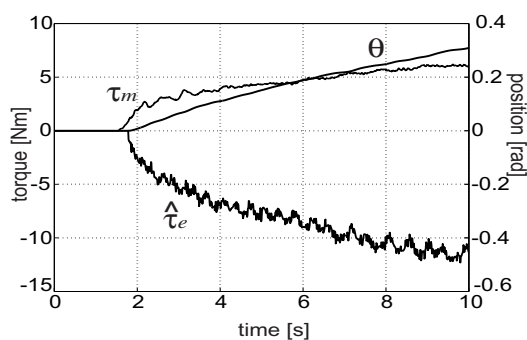
(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



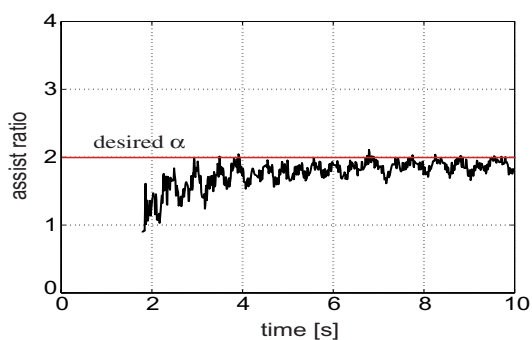
(b-1) $K_{en} = 15$



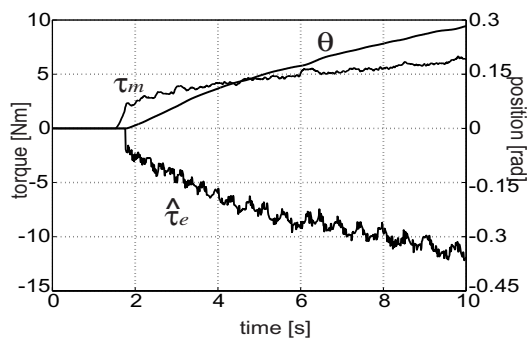
(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



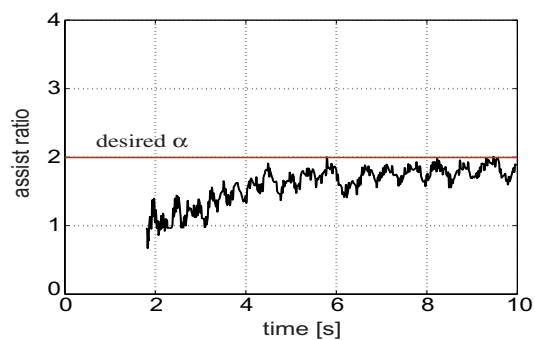
(c-1) $K_{en} = 60$



(c-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(d-1) $K_{en} = 120$

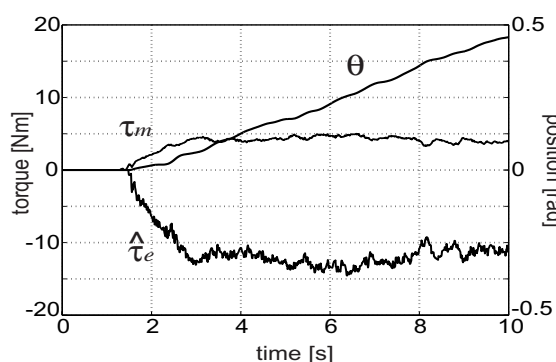


(d-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

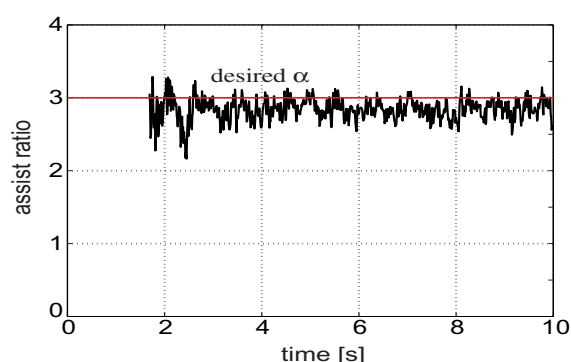
図 3.24: 単純フィードバック制御を用いたパワーアシスト (ゴム 6 本)

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

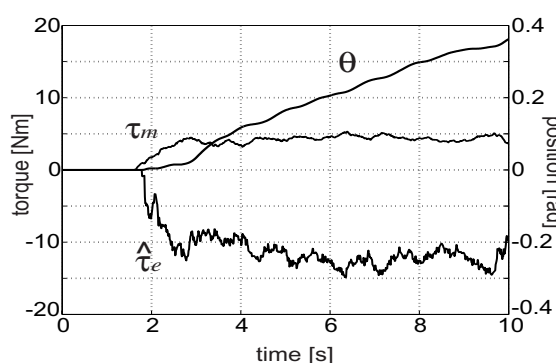
次に段ボールを環境として、環境のノミナル値を (a) $K_{en} = 30$, (b) $K_{en} = 60$, (c) $K_{en} = 120$, (d) $K_{en} = 240$ (e) $K_{en} = 400$, (f) $K_{en} = 800$ として実験を行った結果を図 3.25, 3.26 に示す。容易に表現できない負荷特性をもつ段ボールではあるが、剛性係数のみの簡単なノミナル値でもパワーアシスト動作が実現できている。しかし、先ほどのゴムにおける実験結果と同様、ノミナル値の大きさ次第で、力と位置の応答が変化している。特に、ノミナル値として大きな剛性係数を用いるほどアシスト比において良い応答が得られず、そのため、同じ距離を運ぶのに必要な操作者の入力トルクも大きくなってしまふ。



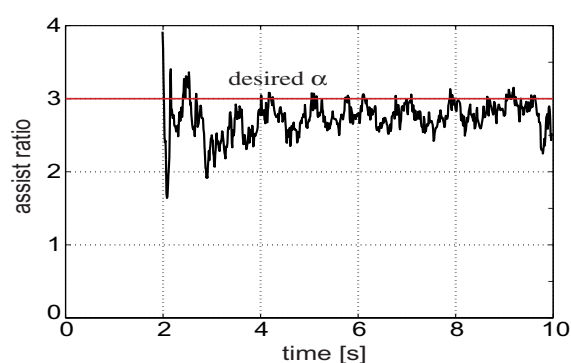
(a-1) $K_{en} = 30$



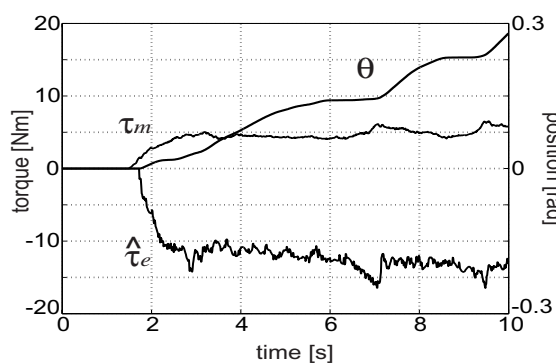
(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



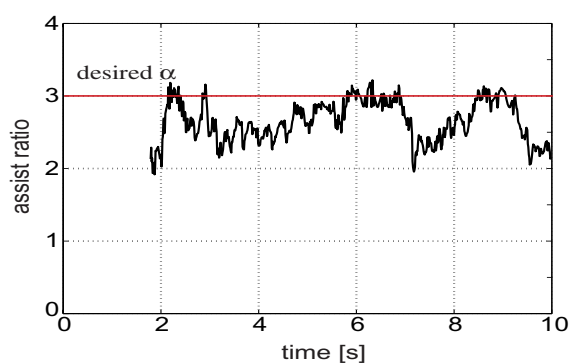
(b-1) $K_{en} = 60$



(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

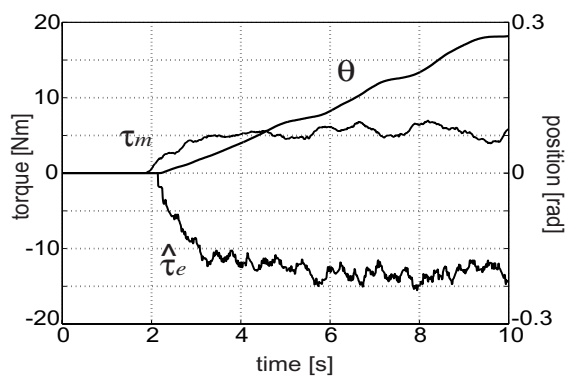


(c-1) $K_{en} = 120$

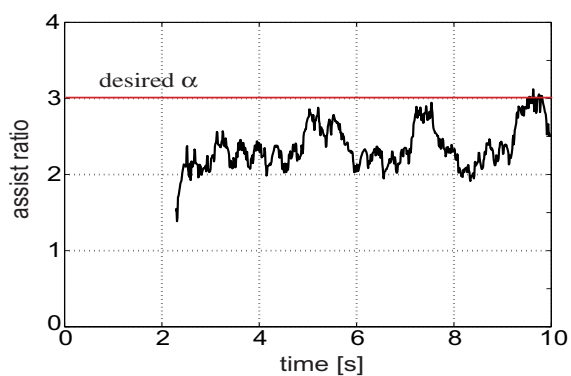


(c-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

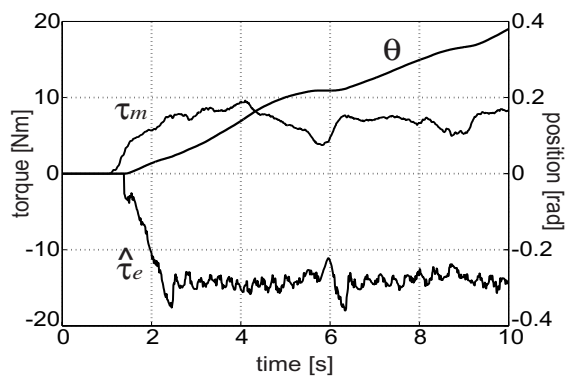
図 3.25: 単純フィードバック制御を用いたパワーアシスト (段ボール)



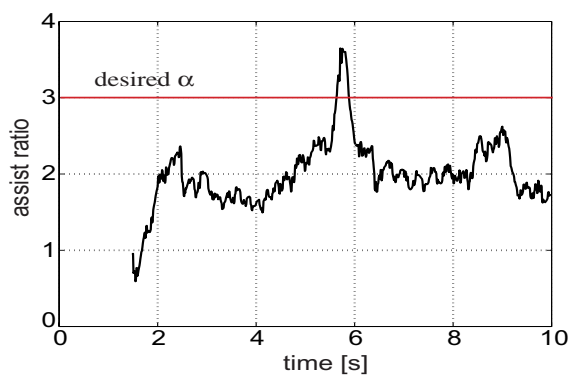
(d-1) $K_{en} = 240$



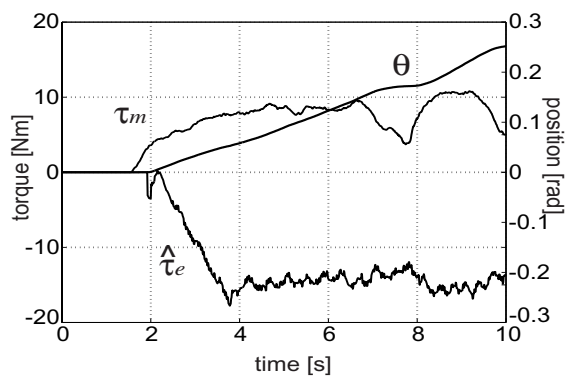
(d-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



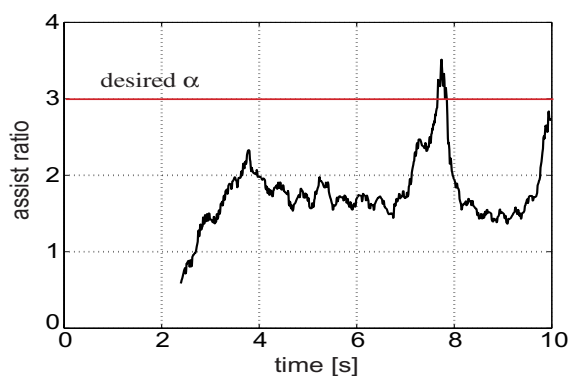
(e-1) $K_{en} = 400$



(e-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(f-1) $K_{en} = 800$



(f-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.26: 単純フィードバック制御を用いたパワーアシスト (段ボール)

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

$K_{en} = 30, 60, 120, 240, 400, 800$ として段ボールを運んだこれらのアシスト動作実験の結果に対し、式 (2.7) で定義した値 V を用いて、環境のノミナル値に関して評価を行った結果を図 3.27 に示す。

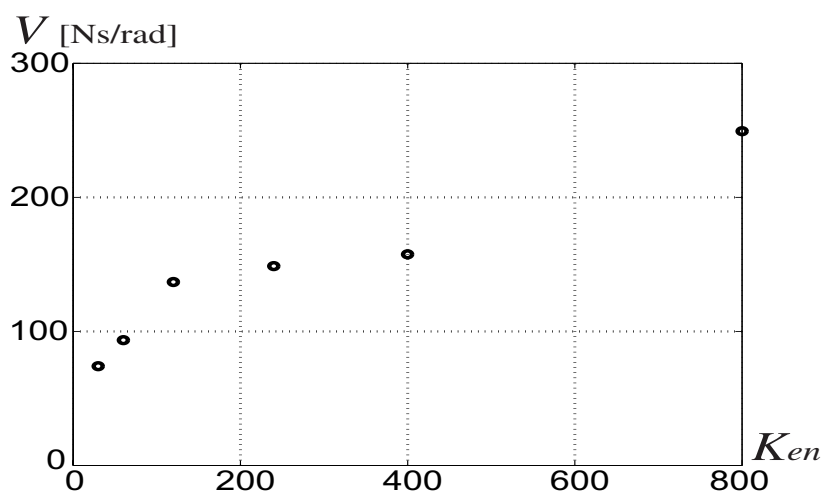


図 3.27: 環境ノミナル値による評価

環境ノミナル値 K_{en} とパワーアシスト動作の評価値 V に多少線形的、直線関係も見られる。

すでに述べたように、環境のノミナル値 K_{en} は力制御系のゲインを決めるものであり、比較的小さい場合はゲインも大きく、楽なパワーアシスト動作が実現できることがこの評価結果からもわかるが、ノミナル値が大きくなるにつれて、同じ作業であっても操作者に大きな労力を必要とさせることになる。

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

前章で紹介したが、Kazerooni の開発した “extender” [32] もこの力制御ベース型手法に分類される。この Kazerooni の設計では、図 3.28 のように、環境の特性だけでなく人間の腕の特性も考慮し、きちんと同定試験を行ってから制御系を設計している。ここで、 u_m , u_e はそれぞれ操作者と環境が発する力、 F_m , F_e はそれぞれ操作者と環境がロボットに作用する力である。また安定性については、スモールゲイン定理を用いて解析している。しかし、本節で述べたような単純フィードバックの形であり、力応答特性と、人間・環境の特性変動に対するロバスト性を同時に向上することができない。例えば力応答特性を高めようとして高ゲイン化すると、系全体が不安定になってしまう。

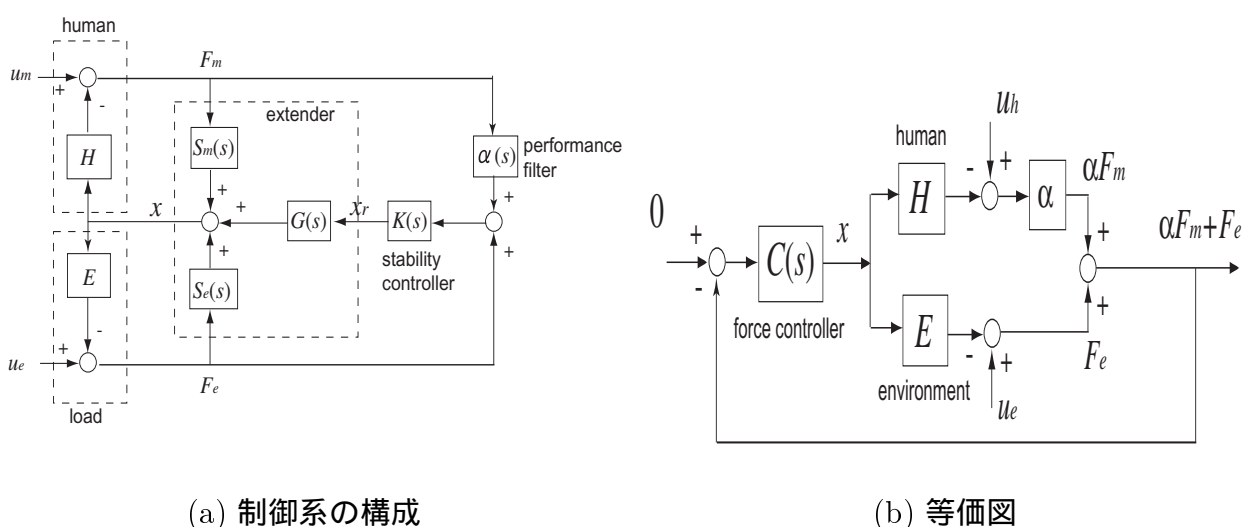


図 3.28: “extender” の制御系構成

本研究では、制御系設計に際して、人間の腕の特性は考慮しておらず、アシスト比の大きさとの関連は薄い。環境の特性変動に対するロバスト性を高めるにはゲインを上げるしかなく、系の不安定さをもたらすこととなる。次の節では、これらの問題を解決する手法を示す。

3.6.3 環境オブザーバを用いたロバスト力制御系

単純フィードバック制御では、環境のノミナル値次第でパワーアシスト動作における力応答と位置応答が大きく変化する。工場などにおける労働補助や高齢者の介護補助など実際のパワーアシストの場面では、環境となるものの負荷特性を正確に知ることは大変難しいことである。同定試験を行ってからアシスト動作を行うのも現実的ではない。そこで、どのような負荷特性をもつ環境にもロバストに力制御ができ、かつ安定した位置応答が得られるパワーアシスト制御系が求められる。

ここで、環境のパラメータ変動に対してロバスト化をはかるために、位置制御系にも適用している外乱オブザーバの原理を力制御系に導入する。図 3.29 のように、環境のノミナルモデルを用意し、オブザーバの出力を位置指令値にフィードバックする構造となる。これを環境オブザーバと呼ぶ [47]。例えば、環境のモデルとして粘性係数 D_{en} と剛性係数 K_{en} を考える場合、

$$E_n^{-1} = \frac{1}{D_{en}s + K_{en}} \quad (3.22)$$

という形のローパスフィルタに力応答値 τ_e を通すこととなる。

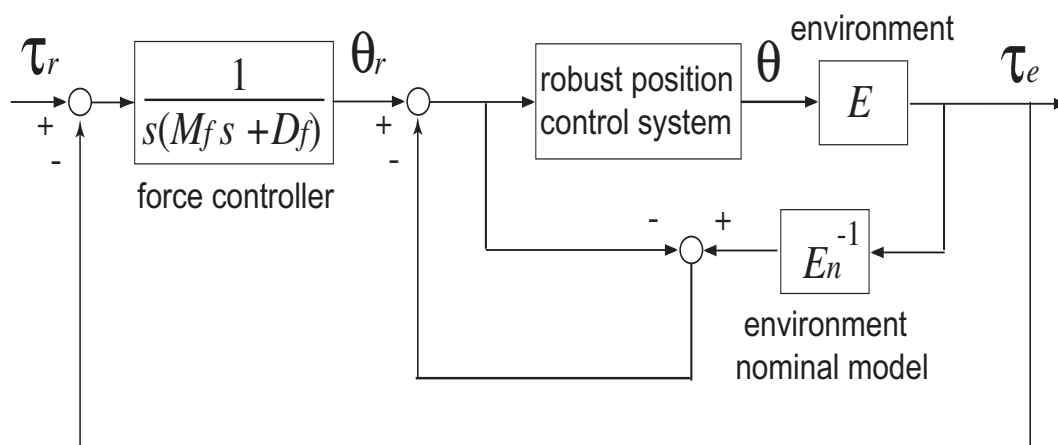


図 3.29: 環境オブザーバを用いた力制御系

この制御系では、位置指令値 θ_r から環境との作用トルク τ_e への特性が、

$$\frac{\tau_e}{\theta_r} = D_{en}s + K_{en} \quad (3.23)$$

のようにノミナル化され、そのノミナル値で設計した力制御器 $\frac{1}{s(M_f s + D_f)}$ により作用トルクの応答 τ_e を目標値 τ_r に追従させることとなる。

3.6.4 環境オブザーバを用いたパワーアシスト制御

この環境オブザーバにより環境のパラメータ変動に対してロバスト化をはかった力制御系をパワーアシスト制御系に適用する。操作者の入力トルク τ_m にアシスト比 α をかけた値が力制御系の指令値となり、全体の構成は図 3.30 のようになる。

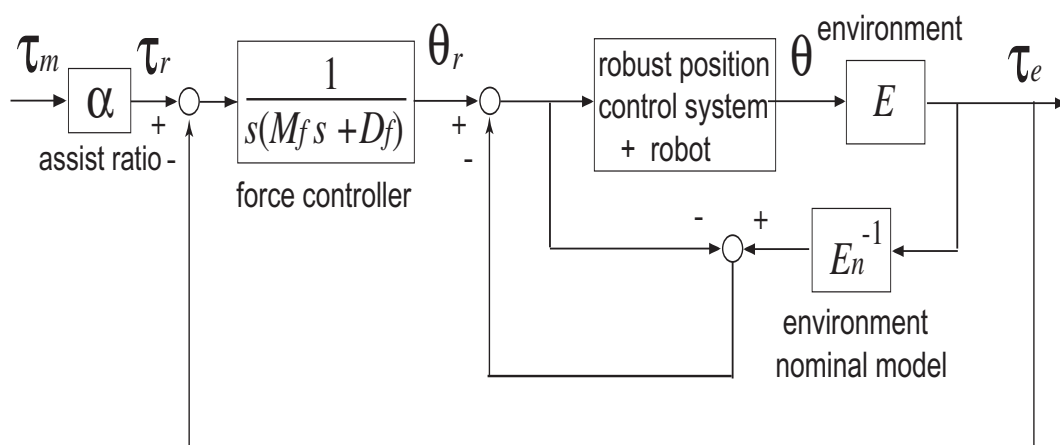


図 3.30: 環境オブザーバを用いたパワーアシスト制御系

ロボット制御系は、環境との作用トルク、つまり環境に与えるトルクを常に $\alpha\tau_m$ にするようなロバストな制御を行う。つまり、アシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ を我々の設定した値 α に保とうという制御をしているとも言える。

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

$K_e = 30$ 程度の負荷特性をもつゴムを環境とし、ノミナルモデルを $K_{en} = 120$ として実験を行った結果を図 3.31 に示す。目標のアシスト比は $\alpha = 3$ と設定し、単純フィードバック制御のみを用いた場合と環境オブザーバを適用した場合の比較を行う。

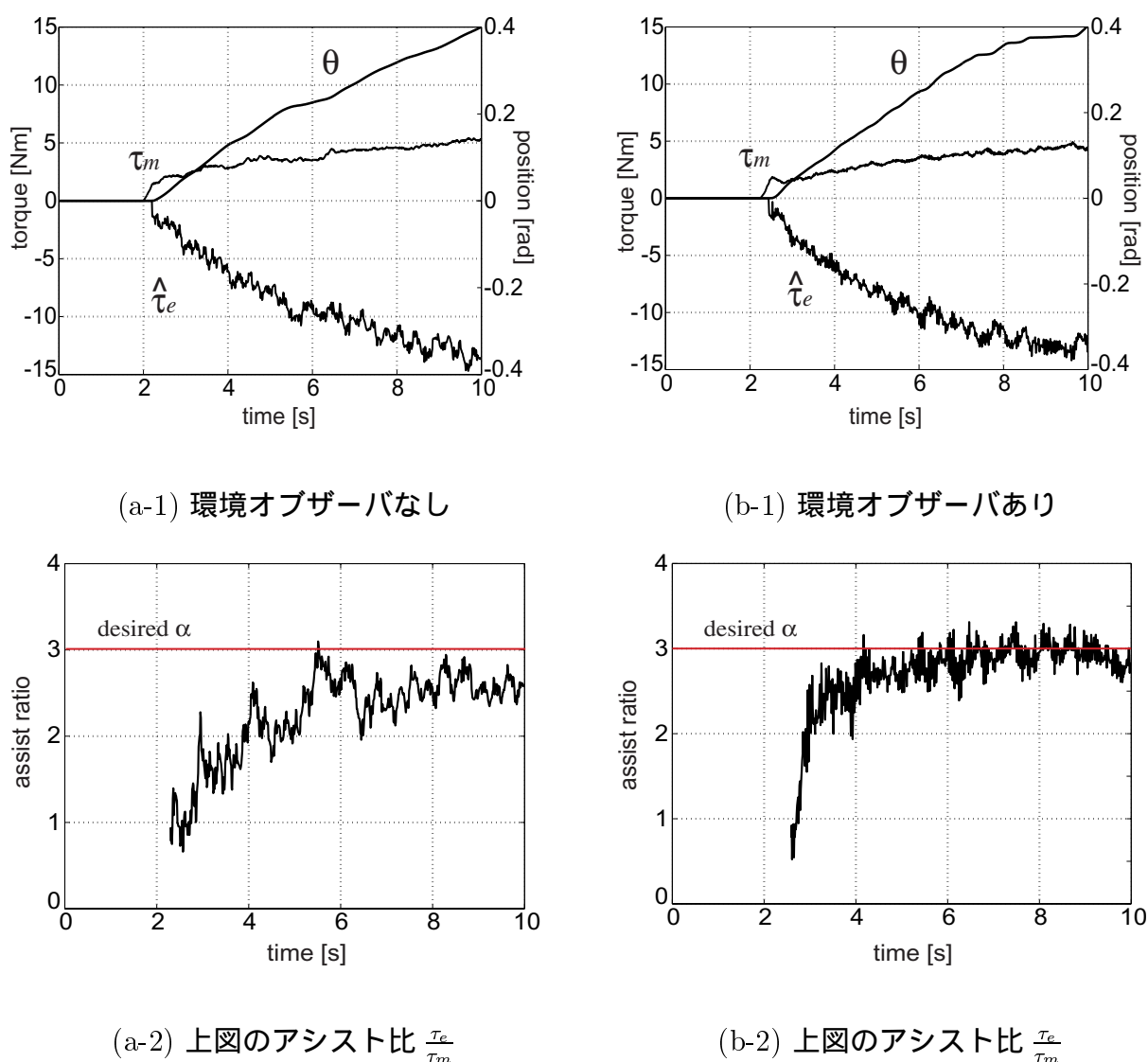
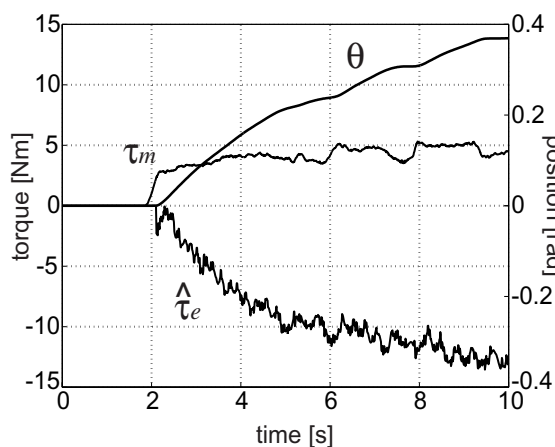


図 3.31: $K_e = 120$ としてゴムを環境とした実験結果

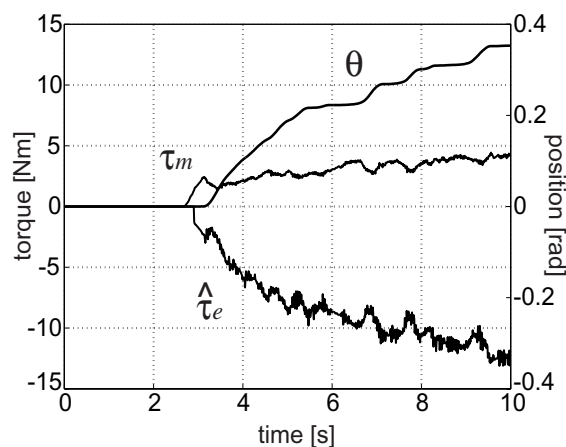
単純フィードバック制御のみの場合の結果に比べ、環境オブザーバを適用した場合の結果は、アシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ が目標の値 $\alpha = 3$ に非常によく追従しており、その適用の効果が見て取れる。また、位置応答も安定していることがわかる。また、本実験では、ロボットと環境の間の作用力 τ_e は外乱オブザーバによって推定したため、力センサを用いた場合にようにきれいな信号は得られない。そこで、環境オブザーバの出力に 100[ms] ほどのローパスフィルタを挿入してから位置指令値にフィードバックすることとした。

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

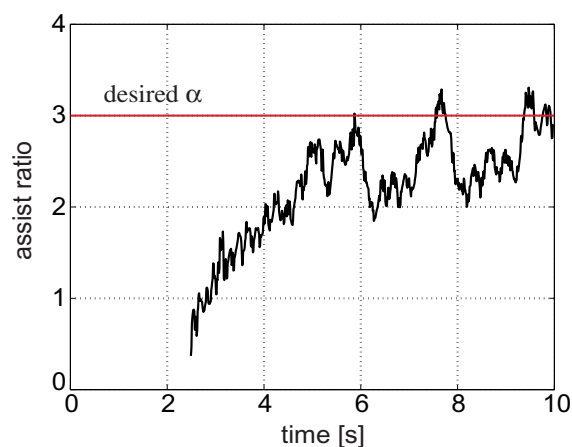
さらに、環境のノミナルモデルを $K_{en} = 180, 300$ とした場合の環境オブザーバ適用の効果も図 3.32, 3.33 に示す。いずれの結果からも、環境オブザーバの導入によって目標のアシスト比を忠実に実現できることがわかる。また、同じ距離を移動させるのに必要な人間の入力トルクは、単純フィードバック制御のみの場合と比較して少なくて済むことがわかる。それは、環境のノミナル値と実際の環境特性との違いが大きくなればなるほど顕著である。



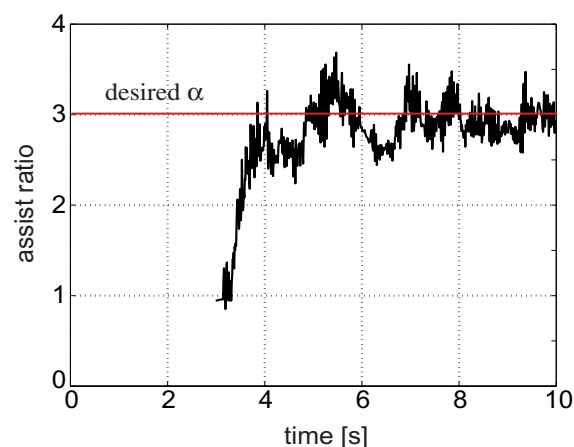
(a-1) 環境オブザーバなし



(b-1) 環境オブザーバあり



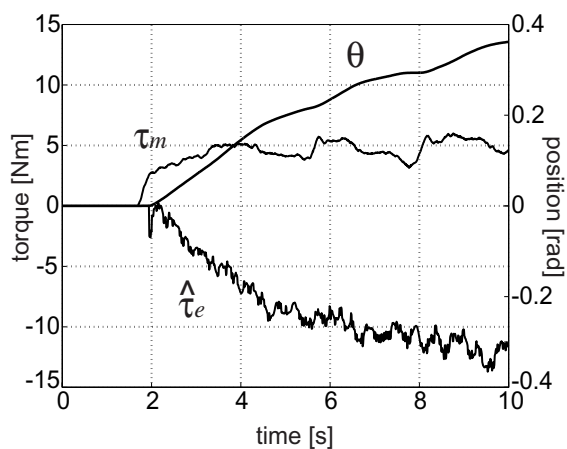
(a-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



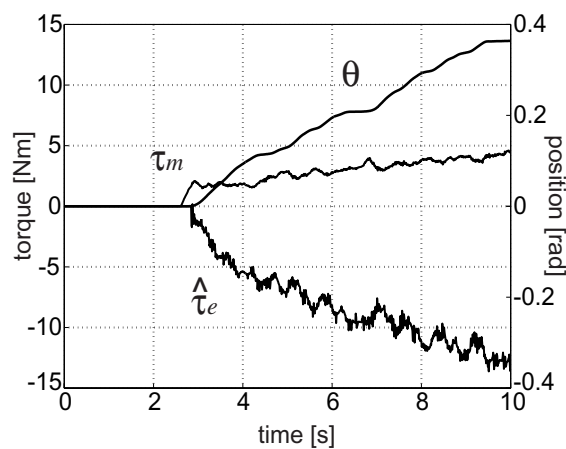
(b-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.32: $K_e = 180$ としてゴムを環境とした実験結果

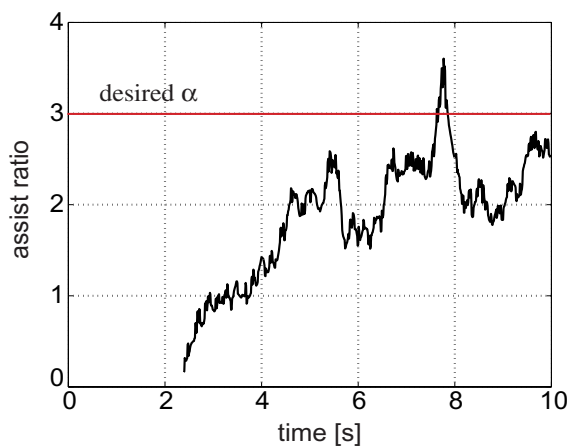
3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御



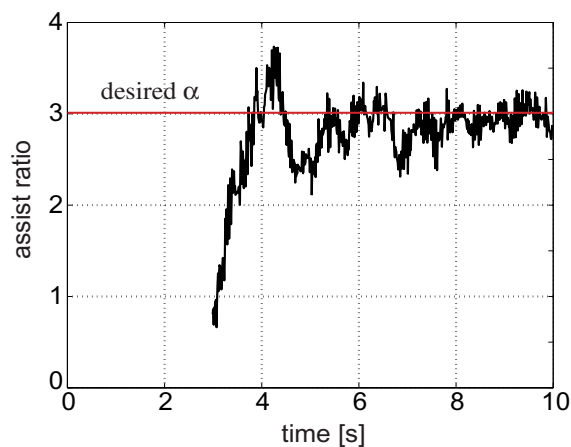
(a-1) 環境オブザーバなし



(b-1) 環境オブザーバあり



(a-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.33: $K_e = 300$ としてゴムを環境とした実験結果

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

式 (2.7) で定義した値 V を用いて評価を行った結果を図 3.34 に示す。単純フィードバック制御のみでは望みの力応答が得られず、環境特性が変動するにつれて力応答特性が劣化し、人間に必要となる力が大きくなる。一方、環境オブザーバを適用した手法では望みのアシスト比が達成され、たとえ環境特性が変動しても必要となる力はほとんど変わらない。人間に楽に作業させるというパワーアシストの本来の目的に対し、この手法が大変有効であることが示された。

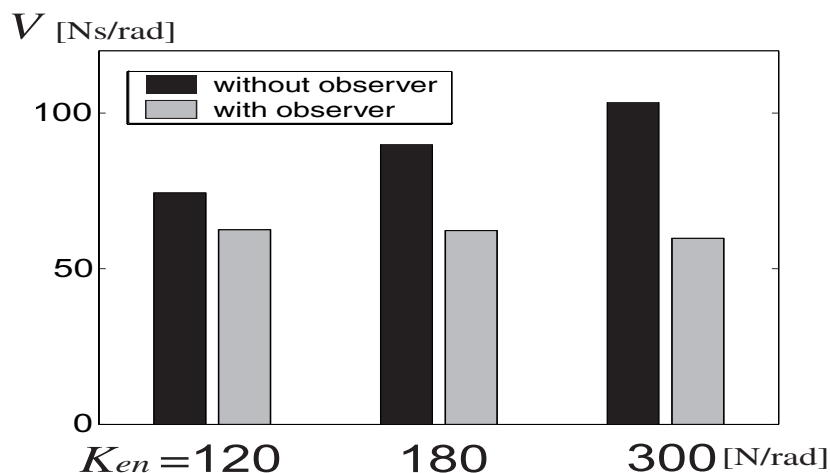
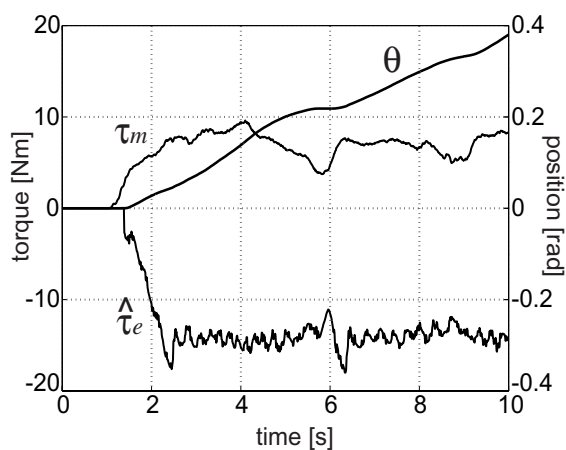


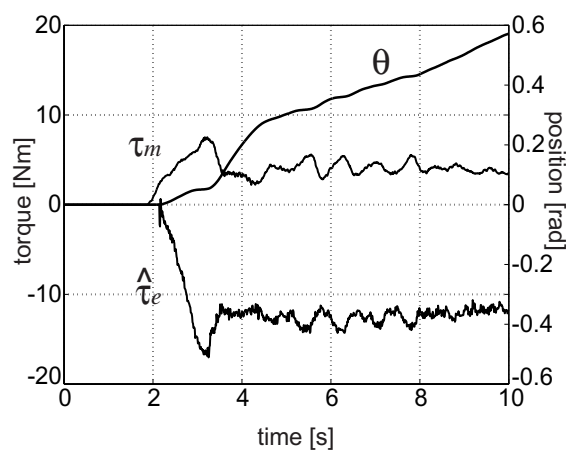
図 3.34: 環境オブザーバの効果

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

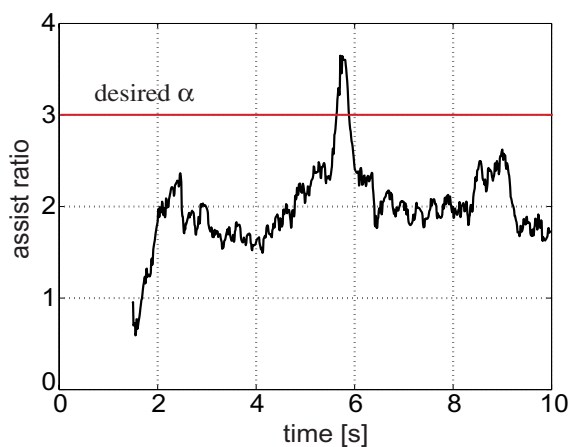
次に、環境のノミナルモデルを $K_{en} = 400, 800$ として、環境オブザーバを用いて段ボールを押した実験を行った結果を図 3.35, 3.36 に示す。単純フィードバック制御のみの場合と比較して、アシスト比が落ちることなく、操作者に必要な力も大きくなることなくパワーアシストが実現できていることがわかる。



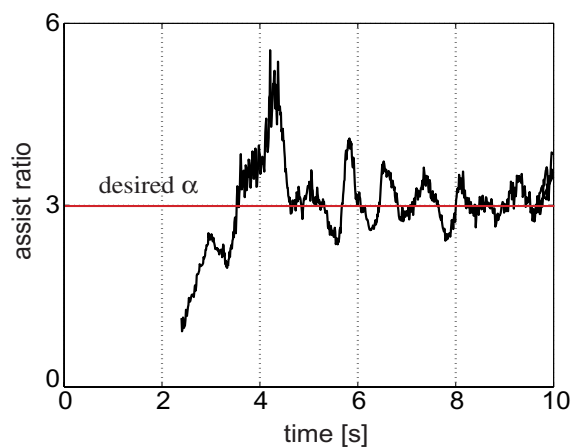
(a-1) 環境オブザーバなし



(b-1) 環境オブザーバあり



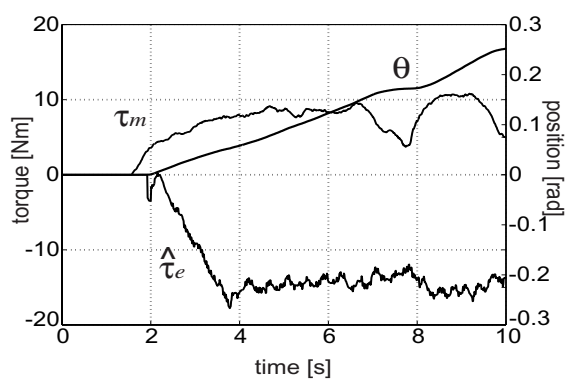
(a-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



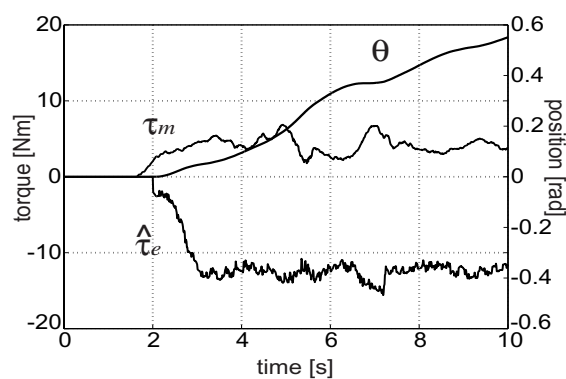
(b-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.35: $K_e = 400$ として段ボールを押した実験結果

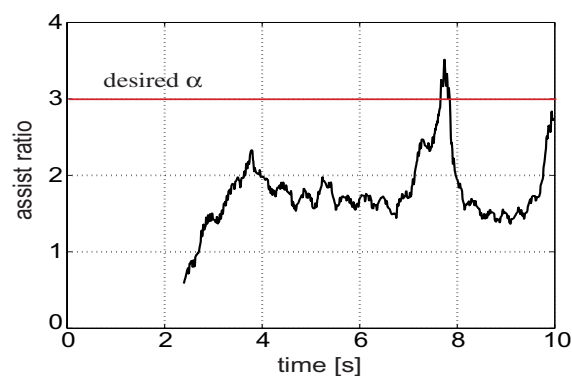
3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御



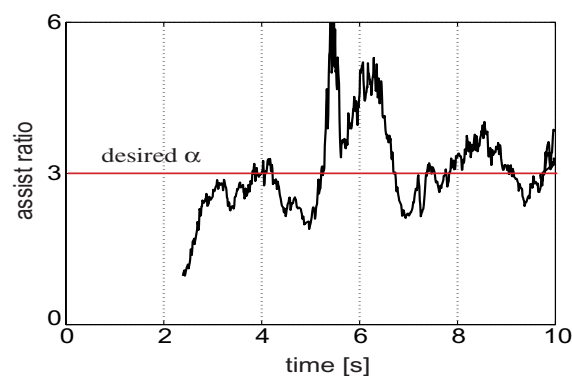
(a-1) 環境オブザーバなし



(b-1) 環境オブザーバあり



(a-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.36: $K_e = 800$ として段ボールを押しした実験結果

これらの実験結果に対し、式 (2.7) で定義した値 V を用いて評価を行った結果を図 3.37 に示す。環境オブザーバの導入により、環境特性を知り得なくても常に楽な作業が実現でき、操作者の力の補助を行うというパワーアシスト制御の本来の目的を達成することができる。

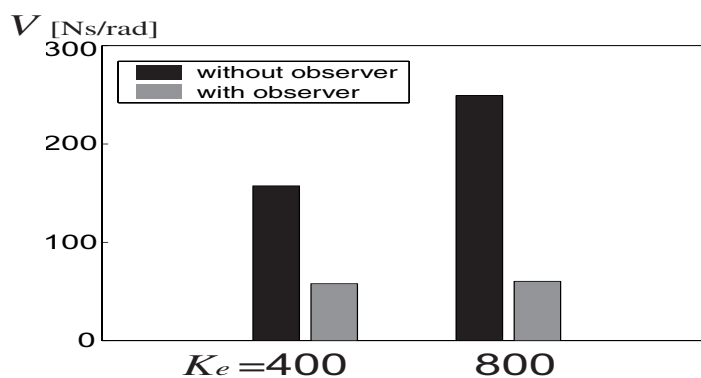
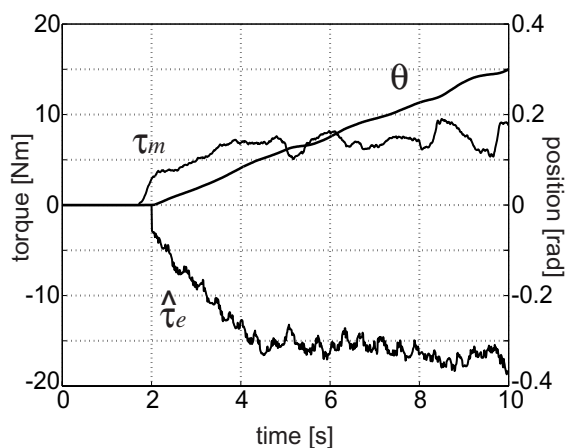


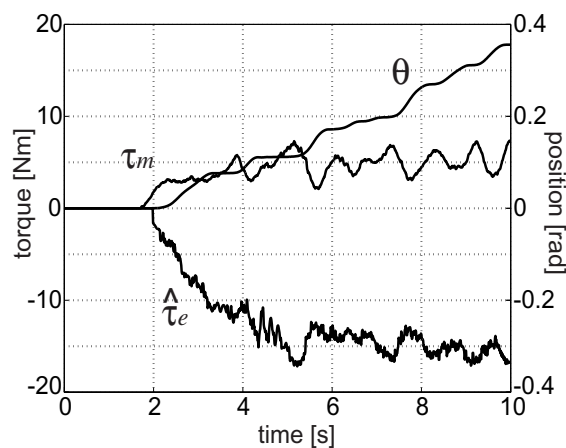
図 3.37: 環境オブザーバの効果

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

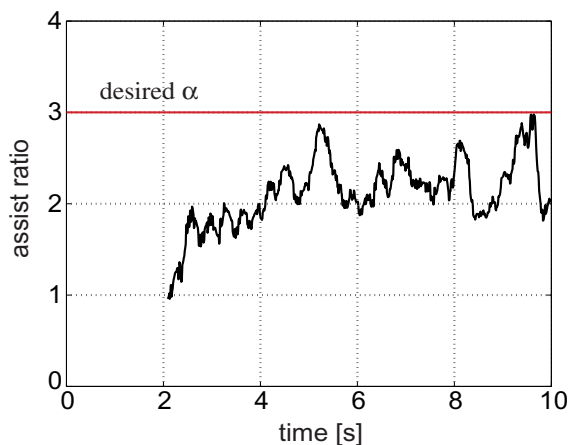
環境のノミナルモデルを $\frac{1}{D_{ens} + K_{en}}$ とし、そのパラメータを $D_{en} = 10$, $K_{en} = 400$ として段ボールを押した実験の結果を図 3.38 に示す。



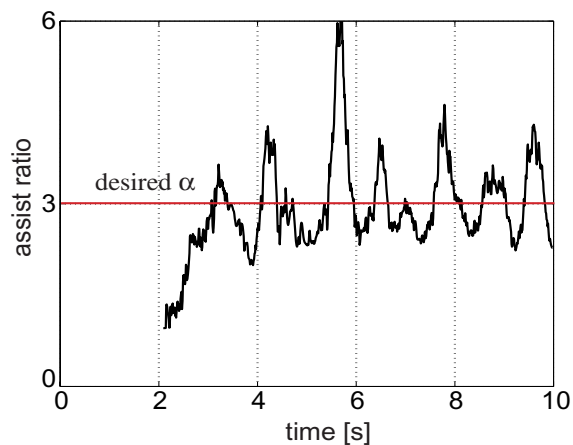
(a-1) 環境オブザーバなし



(b-1) 環境オブザーバあり



(a-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



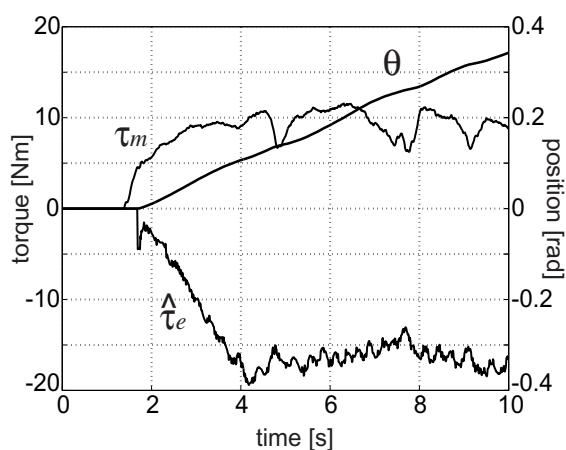
(b-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.38: $D_e = 10$, $K_e = 400$ として段ボールを押した実験結果

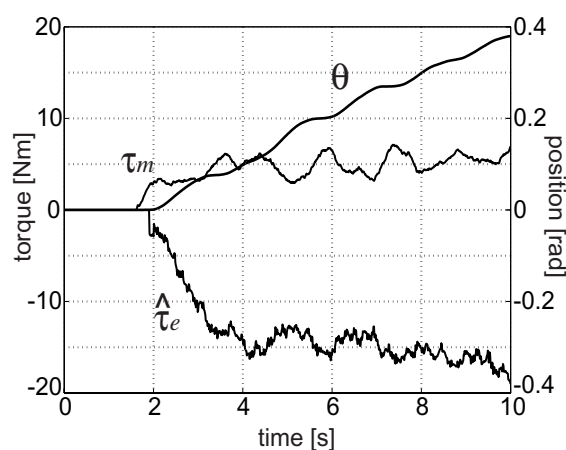
この実験結果で、ともにアシスト動作自体は実現できているが、環境オブザーバを導入した手法では、位置応答が非常に振動的になると同時に、操作者の与えるトルクまで振動的になっている。位置応答が振動すれば、操作者も安定したトルクを継続して与えることができなくなるのは当然である。

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

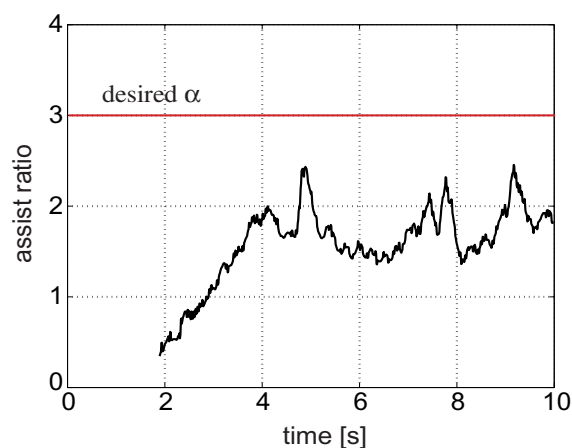
次に、環境ノミナルモデルのパラメータを $D_{en} = 10$, $K_{en} = 800$ として段ボールを押し
た実験の結果を図 3.39 に示す。



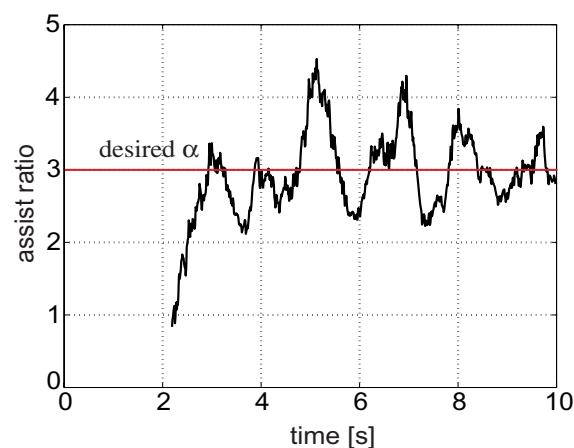
(a-1) 環境オブザーバなし



(b-1) 環境オブザーバあり



(a-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(b-2) 上図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.39: $D_e = 10$, $K_e = 800$ として段ボールを押しした実験結果

先ほどの図 3.38 に示した実験結果と同様に、環境オブザーバを導入した手法では、位置
応答が振動的になると同時に、操作者の与えるトルクも振動的になっている。環境オブザー
バの構造は、環境との作用トルク τ_e を環境ノミナルモデルに通して位置指令値へ戻してお
り、この振動的な挙動は環境モデルの作り方に原因があるものと考えられる。

環境のノミナルモデルに粘性係数が含まれる場合、

$$E_n^{-1} = \frac{1}{D_{en}s + K_{en}} = \frac{1}{K_{en}} \frac{1}{\frac{D_{en}}{K_{en}}s + 1} \quad (3.24)$$

となり、 D_{en} と K_{en} の比がローパスフィルタの時定数に対応していることがわかる。ここで、

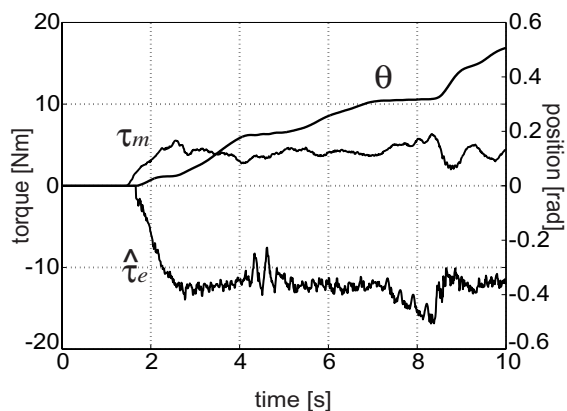
$$\tau_{en} = \frac{D_{en}}{E_{en}} \quad (3.25)$$

とおく。

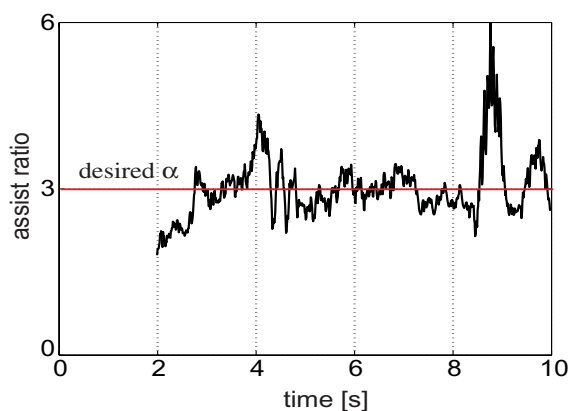
ゴムなどのように簡単な特性を示す環境ではなく、様々な特性がからみ合った複雑な特性をもつ環境の場合は、ロボットとの間の作用力 τ_e は急激な変化や振動的応答を含む波形となることがある。さらに本研究のように、 τ_e を外乱オブザーバによって推定すると、力センサとは違って雑音などの高周波成分も含まれてしまう。このとき、環境オブザーバの出力にそれらの成分が直接出てしまうと、ロボットの位置指令値に振動的な信号をそのまま与えることとなり、操作性を大きく損なうことにつながる。ロボットが振動的になれば、操作者は安定な力を継続して与えることができなくなり、 τ_m も振動的になる。そうすれば τ_e も振動的になるという悪循環になる。

そこで、環境のノミナル値において、 D_{en} と K_{en} の比を適切に考慮することにより、高周波成分を抑えることを考える。 $\tau_{en} = 0.1$ となるように、つまり (a) $D_{en} = 20$, $K_{en} = 200$, (b) $D_{en} = 40$, $K_{en} = 400$, (c) $D_{en} = 80$, $K_{en} = 800$ のように環境のノミナルモデルを設定し、段ボールを押した実験の結果を図 3.40 に示す。

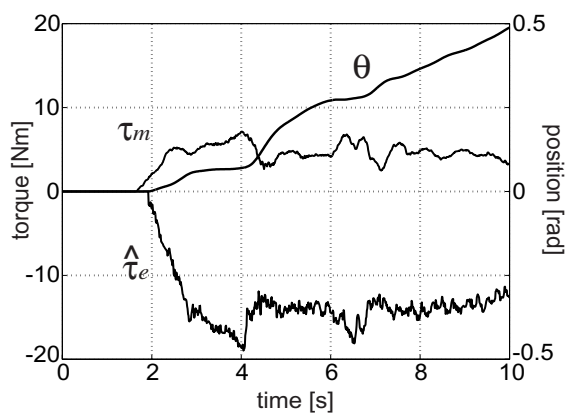
3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御



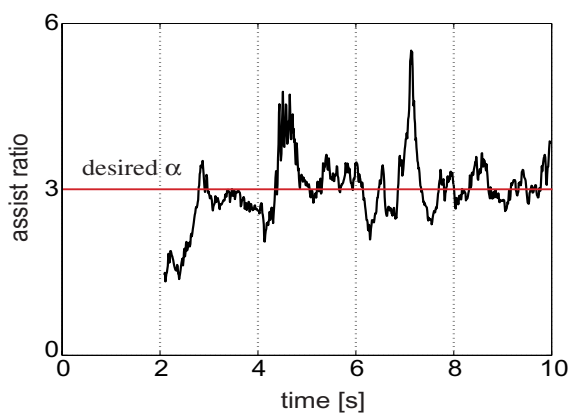
(a-1) $D_e = 20, K_e = 200$



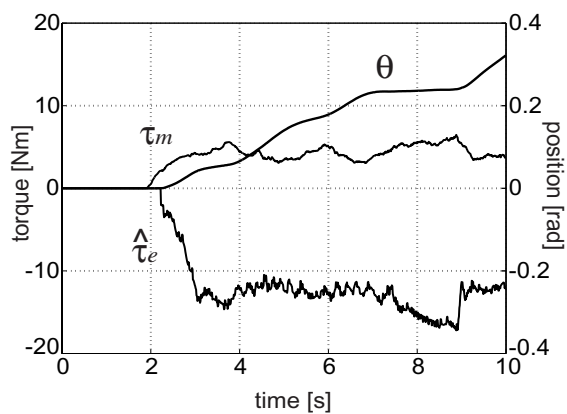
(a-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



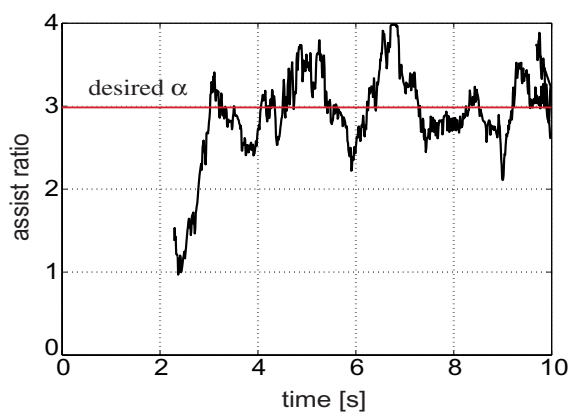
(b-1) $D_e = 40, K_e = 400$



(b-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$



(c-1) $D_e = 80, K_e = 800$



(c-2) 左図のアシスト比 $\frac{\tau_e}{\tau_m}$

図 3.40: 段ボールを押した実験結果

3.6.5 インピーダンス制御を導入した力制御ベース型パワーアシスト制御

次に、図 3.41 に示されるようなインピーダンス制御を利用した力制御ベース型手法について考える。永井ら [37] はこの考えを計算トルク法のトルク式の一部として利用しているが、ここでは図 3.30 の力制御系への指令値として用いる。指令値 τ_r はインピーダンス式 (3.26) によって決定される。

$$\tau_r = M_{fd}\ddot{\theta} + D_{fd}\dot{\theta}_e + K_{fd}\theta_e \quad (3.26)$$

$$\theta_e = \theta - \theta_m \quad (3.27)$$

操作者の入力トルク τ_m からロボットの位置指令値 θ_m が生成され、これにより環境に与える力の指令値を求める。ロボットは常に位置指令軌道に追従しようとして環境を押し進んでいく。このインピーダンス制御を用いた力制御ベース型パワーアシスト制御系の構成を図 3.41 に示す。

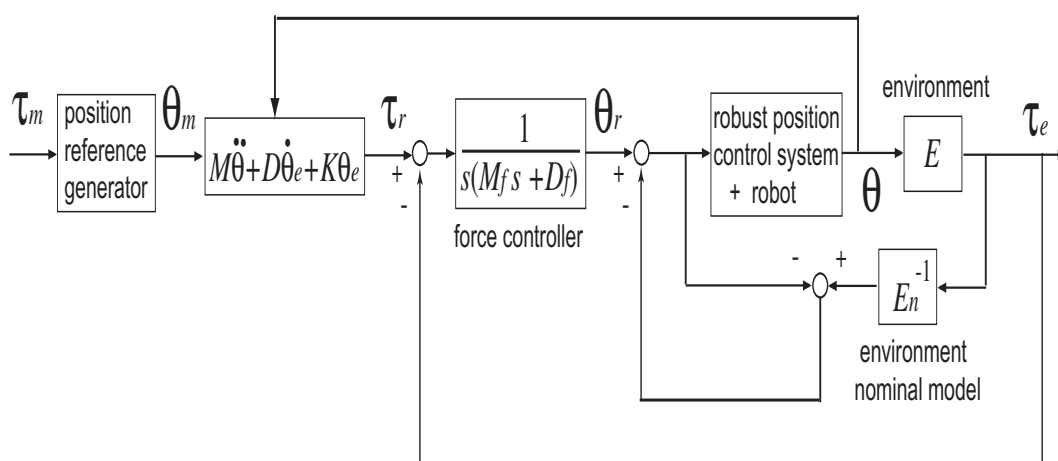


図 3.41: インピーダンス制御を用いた力制御ベース型パワーアシスト制御系

位置指令軌道生成についてはいろいろなものが考えられるが、ここでは、

$$\theta_m = \frac{C}{(T_s + 1)s} \tau_m \quad (3.28)$$

という二次系を用いる。 C は位置指令の大きさ、 T はその立ち上がりの大きさを決める。以下の実験では、 $C = 0.05$, $T_f = 0.003$ とした。また、インピーダンス制御については、

$$\tau_r = \tau_{fd}^2 K_{fd} \ddot{\theta} + 2\tau_{fd} K_{fd} \dot{\theta}_e + K_{fd} \theta_e \quad (3.29)$$

とし、 τ_{fd} により力指令値生成の時定数、 K_{fd} により力指令値の大きさを調節することとする。

3.6 力制御ベース手法によるパワーアシストロボットの制御

インピーダンス制御のパラメータを $\tau_{fd} = \frac{1}{4\pi}$, $K_{fd} = 20, 30$ 、力制御系のパラメータを $D_{en} = 10$, $K_{en} = 240$, $\tau_{fr} = 200[\text{ms}]$ として、段ボールを押す実験を行った結果をそれぞれ図 3.42, 3.43 に示す。両者の力応答と位置応答を見ればわかるように、 $K_{fd} = 30$ とした場合のほうがより軽く押せることがわかる。

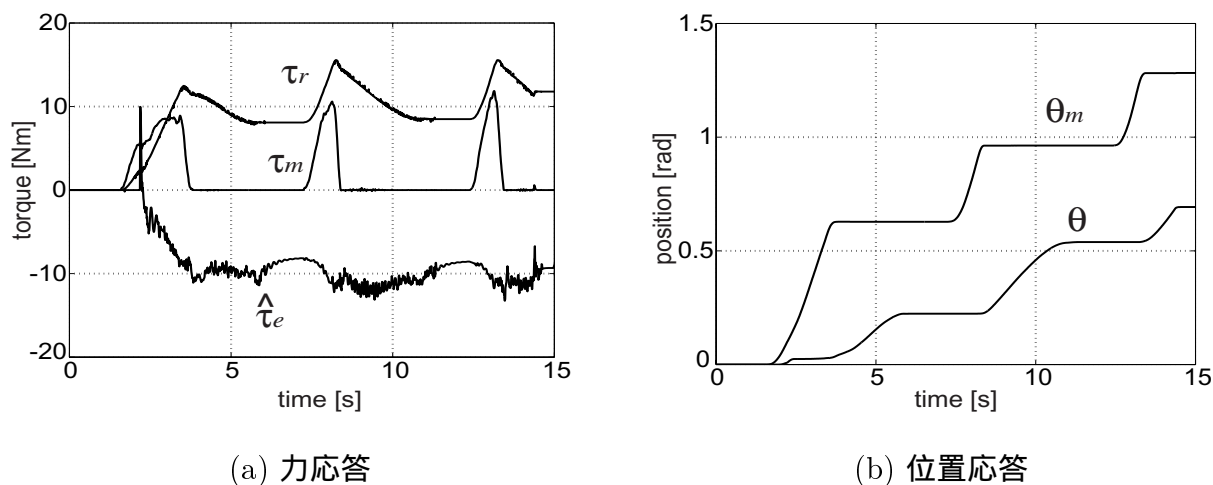


図 3.42: $K_{fd} = 20$ とした実験結果

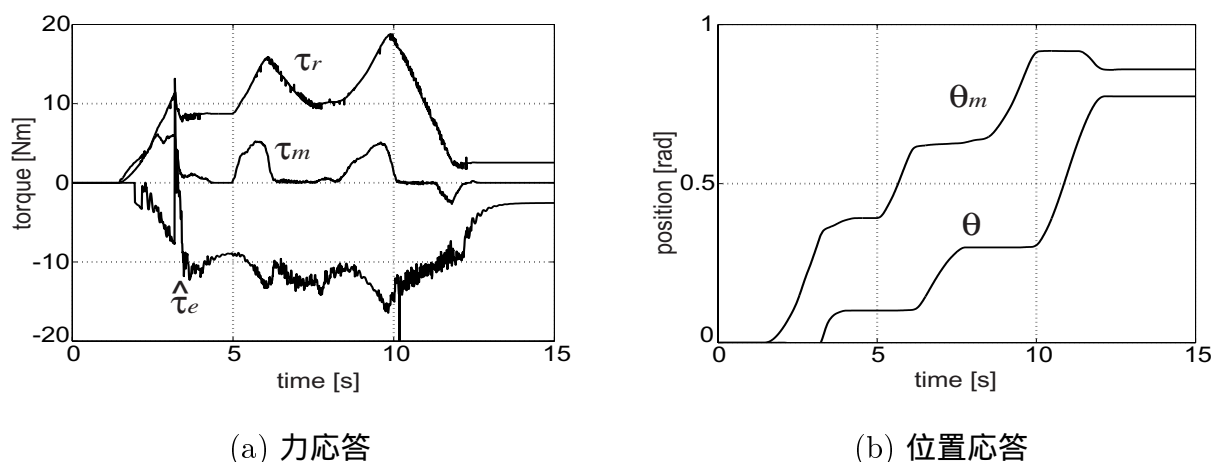


図 3.43: $K_{fd} = 30$ とした実験結果

このインピーダンス制御を導入した力制御ベース型パワーアシスト手法にはさまざまな利点と可能性がある。一つ目は、二次系の位置指令生成などを施すことにより力指令値も非常に安定したものとなることである。図 3.30 のように操作者の入力トルク τ_m をただ何倍かするだけの場合は、 τ_m がうまく与えられなければ環境に安定した力を与えられないが、位置指令生成器とインピーダンス制御の導入により、ある程度安定した力と位置の指令値を生み出すことができる。力制御ベース型手法と位置制御ベース型手法の中間的な意味をもつ手法と言えるかもしれない。

また、位置指令生成器とインピーダンス制御器の設計において多くのパラメータが存在し、例えばアシスト比や操作性などの観点から、必要に応じてそれらを自由に変えられることも利点である。

3.7 被験者を用いた各手法の評価実験

前章で述べたように、実際に多くの人に使ってもらい、どう感じるかを評価してもらうことは重要である。本節では、ここまでに提案し検討したパワーアシスト法を何人かの被験者を用いたアンケート式の評価により、さらに深く考察していく。

3.7.1 被験者を用いたアンケート評価の方法

評価方法として、すでに定義したパワーアシスト技術への要求事項をベースとして評価点をいくつか設定し、その点においてどう感じるかを被験者に点数をつけてもらうこととした。点数は以下の7段階とした。

- +3 — very good
- +2 — good
- +1 — a little good
- 0 — neither good nor bad
- 1 — a little bad
- 2 — bad
- 3 — very bad

この評価方法に基づき、三つの評価実験を行う。被験者は各実験ごとに8人用意し、図3.44のように、この点数の平均 m と標準偏差 σ を計算することで各パワーアシスト制御手法の比較検討を行う。

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.30)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n} \quad (3.31)$$

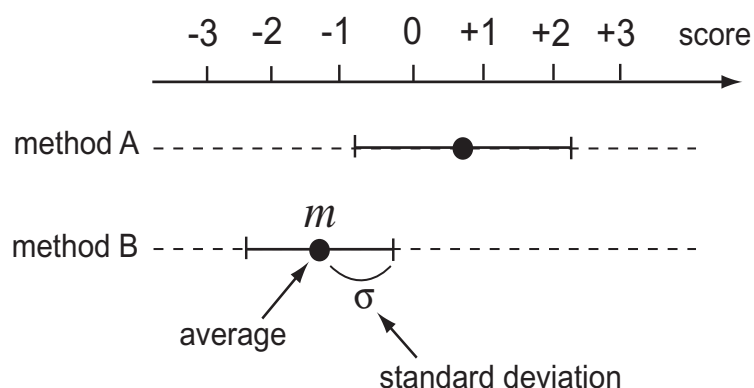


図 3.44: 平均と標準偏差による評価

3.7.2 環境オブザーバの効果に関する評価実験

本章では、位置でアシストするか力でアシストするかという、パワーアシスト制御の本質的な議論を行い、力の規範値を生成してアシストを行う手法を「力制御ベース型パワーアシスト制御法」と名づけた。環境に作用する力を直接制御しながらパワーアシスト動作を実現する上で、環境オブザーバを導入し、環境特性の変動にロバストなパワーアシスト制御系を検討した。すでにいくつかの実験的検討を通して示したように、環境特性を知り得なくても望みどおりの力を環境に与えることができ、その結果、操作者にとっても常に楽な動作が可能である。

ここでは、その環境オブザーバを導入した効果を、被験者を用いたアンケート実験により評価をし、解析を行う。比較を行う二つの手法は以下のとおりである。

手法 A：力制御ベース型パワーアシスト制御法 (環境オブザーバなし)

手法 B：力制御ベース型パワーアシスト制御法 (環境オブザーバあり)

いずれの手法も、アシスト比： $\alpha = 3$ 、環境モデル： $D_{en} = 20$, $K_{en} = 400$ とする。この二つの手法を、以下の三つの評価ポイントから評価を行う。

評価点 1：力の増幅・補助

これはすでに定義したパワーアシストの第一要求事項であり、ロボットが操作者に対し力の補助をして楽にさせているか、軽い力で押せるか、アシストされているかという点における評価である。

評価点 2：安定性、安心感

これはすでに定義したパワーアシストの第二要求事項であり、ロボットを含めた三者が安定した動作をしているか、安心できるような動きであるか、振動や脈動などないかという点における評価である。この評価点が悪い場合は、操作者に心配や恐怖感を与えることになってしまう。

評価点 3：操作性、使いやすさ

これもすでに定義したパワーアシストの第二要求事項であり、操作者が自分の思うように操作できるか、速度の調整や位置決めなどに関する自分の意志をそのまま実現することができるかという評価点である。この評価点が悪い場合は、例えば 30cm だけ動かそうと思っても、そこを行き過ぎてしまうなど、使いにくいものになってしまう。

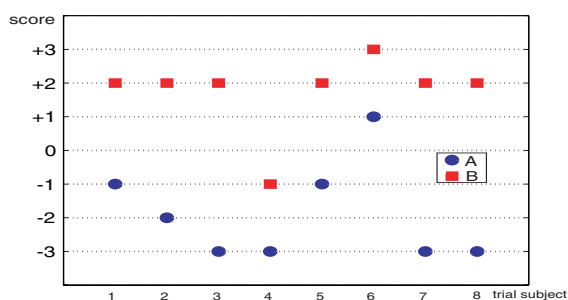
20 代の男女、計 8 人の被験者に段ボールを運ぶ動作を上記の二手法で行ってもらった。各手法についての情報は一切与えず、単に手法 A、B とだけ説明し、それぞれ数回動作を行い、三つの評価点において点数をつけてもらった。

3.7 被験者を用いた各手法の評価実験

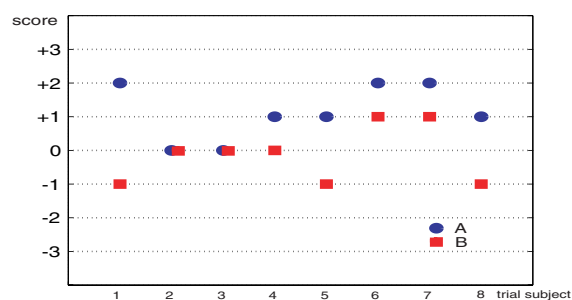
以下の表が二つの手法の比較評価の結果である。

評価点	手法 A			手法 B		
	1	2	3	1	2	3
被験者 1(男)	-1	+2	+2	+2	-1	-1
2(男)	-2	0	+2	+2	0	+1
3(男)	-3	0	+1	+2	0	+1
4(女)	-3	+1	-1	-1	0	+1
5(男)	-1	+1	0	+2	-1	-1
6(男)	+1	+2	+2	+3	+1	-1
7(男)	-3	+2	-1	+2	+1	+2
8(女)	-3	+1	+2	+2	-1	-2

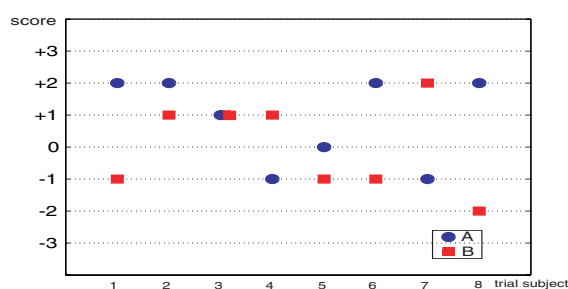
これらの結果を各評価点ごとにグラフにまとめた結果を図 3.45 に示す。



(a) 評価点 1



(b) 評価点 2



(c) 評価点 3

図 3.45: 各評価点における被験者の評価

3.7 被験者を用いた各手法の評価実験

これらの評価結果に対し、各評価点の平均と標準偏差を計算してグラフに表したものを図 3.46 に示す。

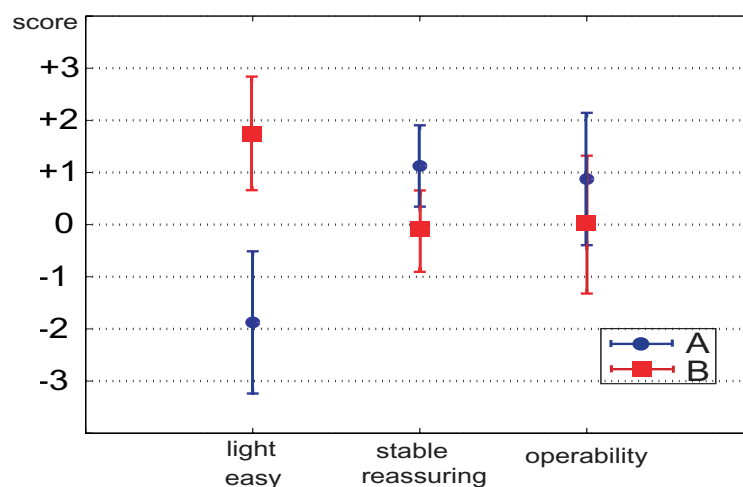


図 3.46: 平均と標準偏差による比較評価

環境オブザーバを導入した効果は、前に述べたように、環境特性の変動にかかわらず、操作者にとって常に楽な動作を実現できることが数学的評価によって示されている。ここで行ったアンケート評価の評価点1「力の増幅・補助」の項目がそれにあたるが、図 3.46 から、オブザーバの有無で被験者の評価が大きく差が現れ、その数学的評価と一致していることがはっきりとわかる。環境オブザーバにより、パワーアシスト本来の目的である、操作者に楽に動作させるための補助を達成できることがあらためて示された。

一方、評価点2「安定性、安心感」と評価点3「操作性、使いやすさ」において、環境オブザーバを導入した手法は大きなマイナスポイントではないが、導入しない手法にやや劣る結果が出ている。力応答特性を向上したために、実際のアンケート実験でも、やや振動・脈動が起こったり、操作者が思っていた停止位置を行き過ぎてしまったりするという意見や感想が聞かれた。そのため、手法 A のように力制御系のゲインがおまり小さくなく、比較的安定した位置応答を示す方を良い評価としたと考えられる。

前節で提案したインピーダンス制御を導入した力制御ベース型パワーアシスト法は、この点を改善する、つまり力応答を意識しつつ操作者の感じる操作性も設計できる一手法であると考えられる。

3.7.3 位置制御ベースと力制御ベースの比較実験

二つ目のアンケート実験では、本章でそれぞれの大きな特徴を見出した位置制御ベース型パワーアシスト法と力制御ベース型パワーアシスト法について比較評価を目的として行う。位置制御ベース型パワーアシスト法として提案した双方向インピーダンス制御に基づくパワーアシスト制御法は、操作者と環境にはたらく力に基づき安定な位置軌道を生成するものであり、環境側のインピーダンスパラメータにより操作者側に環境の情報を伝えることも可能である。一方、力制御ベース型パワーアシスト法として提案した環境オブザーバを導入したパワーアシスト制御法は、先に述べたように、環境特性によらず正確なアシスト比を実現するものである。

手法 A：位置制御ベース型パワーアシスト法 (双方向インピーダンス制御)

インピーダンスパラメータ： $M_1 = 0.5$, $D_1 = 20$, $M_2 = 1.5$, $D_2 = 60$ 、
つまりアシスト比： $\alpha = 3$

手法 B：力制御ベース型パワーアシスト法 (環境オブザーバを導入した力制御法)

アシスト比： $\alpha = 3$ 、環境モデル： $D_{en} = 20$, $K_{en} = 400$

評価するポイントは、前の実験と同様である。

評価点 1：力の増幅・補助

評価点 2：安定性、安心感

評価点 3：操作性、使いやすさ

これも同様に、20代の男女、計8人の被験者に段ボールを運ぶ動作を上記の二手法で行ってもらった。各手法についての情報は一切与えず、単に手法 A、B とだけ説明し、それぞれ数回動作を行い、三つの評価点において点数をつけてもらった。

以下の表が二つの手法の比較評価の結果である。

評価点	手法 A			手法 B		
	1	2	3	1	2	3
被験者 1(男)	+2	+2	+2	+2	+2	0
2(男)	0	+2	+1	+3	+1	+1
3(男)	-1	+1	+1	+1	-1	0
4(男)	+2	+1	+1	+2	0	0
5(男)	0	-1	0	+2	+1	+1
6(女)	+2	+2	+2	+3	+1	0
7(男)	0	+2	+2	+2	+1	-1
8(男)	-1	+1	0	+2	+1	+2

3.7 被験者を用いた各手法の評価実験

これらの結果を各評価点ごとにグラフにまとめた結果を図 3.47 に示す。

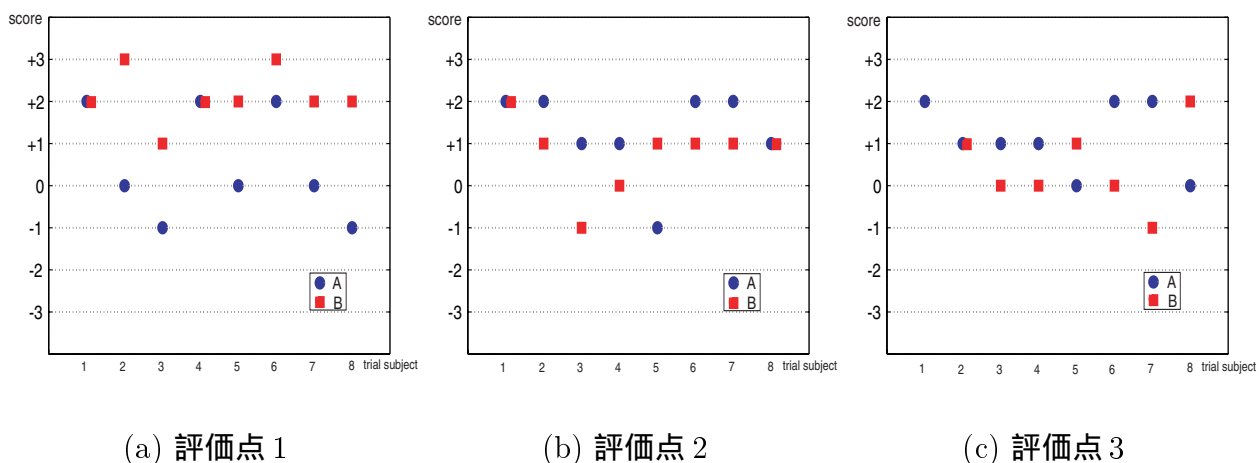


図 3.47: 各評価点における被験者の評価

これらの評価結果に対し、各評価点の平均と標準偏差を計算してグラフに表したものを図 3.48 に示す。

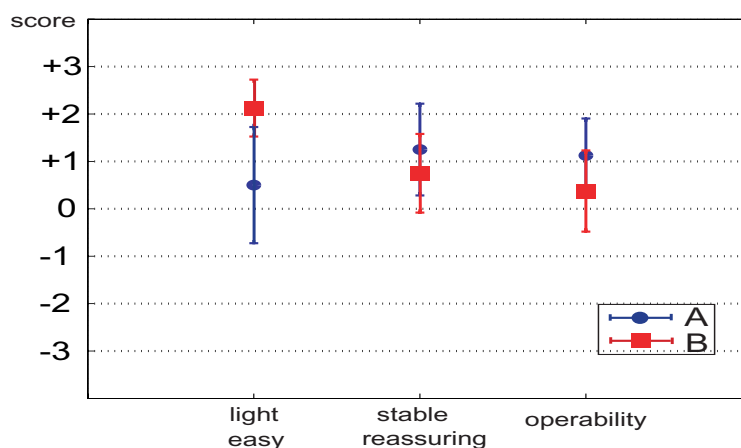


図 3.48: 平均と標準偏差による比較評価

評価点 1「力の増幅・補助」においては、双方向インピーダンス制御もプラスポイントの平均値を出しているが、力制御ベース法の方の評価が大きく上回っている。アシスト比を直接制御するという手法の特徴とつじつまが合っている。評価点 2「安定性、安心感」については両者ともプラスポイントの良い評価が得られたが、若干、位置制御ベース法が上回っている。インピーダンス制御器により、位置軌道を直接生成するという手法の現れであろう。評価点 3「操作性、使いやすさ」においても同様に、両者ともプラスポイントの評価が得られている。しかし、「操作性、使いやすさ」の点で両者を比較してどちらを好むかは、被験者それぞれで評価が分かれた。実験後の被験者の感想を聞くと、「ある程度力を入れた後は機械にまかせてしまいたい」という理由から位置制御ベース法を好む人もいれば、「自分自身で主体的に細かい力加減なども行い、機械は少し補助するだけでいい」という理由で力制御ベース法の方を好む人もいた。この評価点についてはおそらく操作者の意向やパワーアシスト動作の場面、状況に依存するのであろうという興味深い結果が得られた。

3.7.4 環境変動を感じる実験

三つ目のアンケート実験として、パワーアシスト技術の第三要求事項である、環境の情報をいかに感じるかという点においての評価を行う。環境変動を実現するために、段ボールをさらにもう一つ用意し、段ボール一個のアシスト動作途中で二個目にぶつかり、そのまま二個を一緒に押していくこととした。環境変動をいかに感じるかについての実験の方法と様子を図 3.49 に示す。

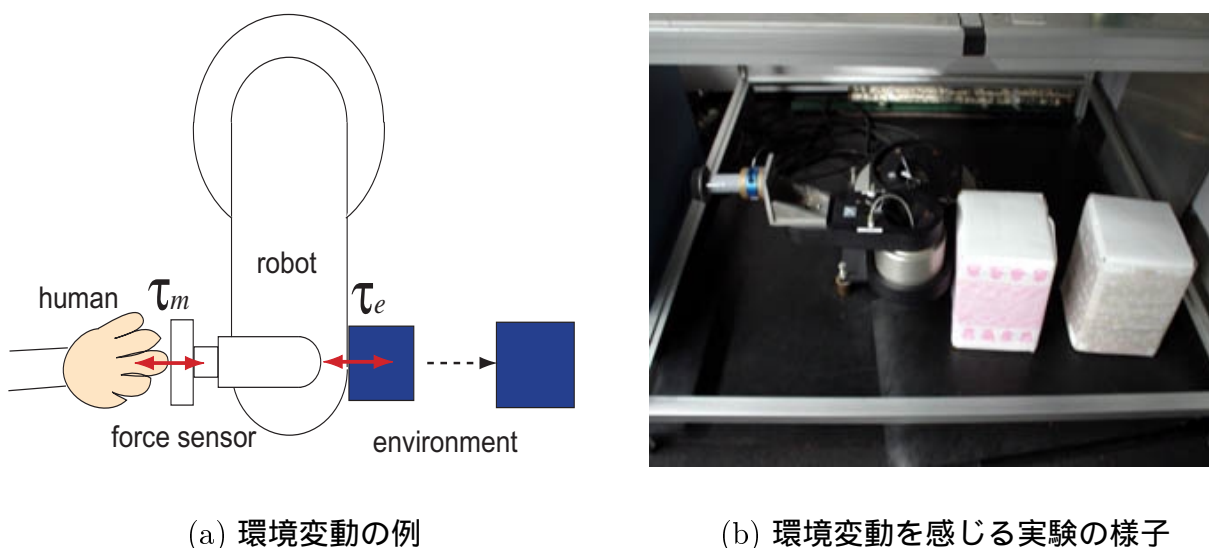


図 3.49: 環境変動の評価実験

段ボールを 1 個だけ押す場合と 2 個押す場合に必要な力を、これまでと同様に外乱オブザーバによって推定した。その結果を図 3.50 に示す。2 個運ぶ場合には 1 個運ぶ場合の約 2.3 倍の力が必要であるとわかる。この変化を感じるかどうかの実験を行う。

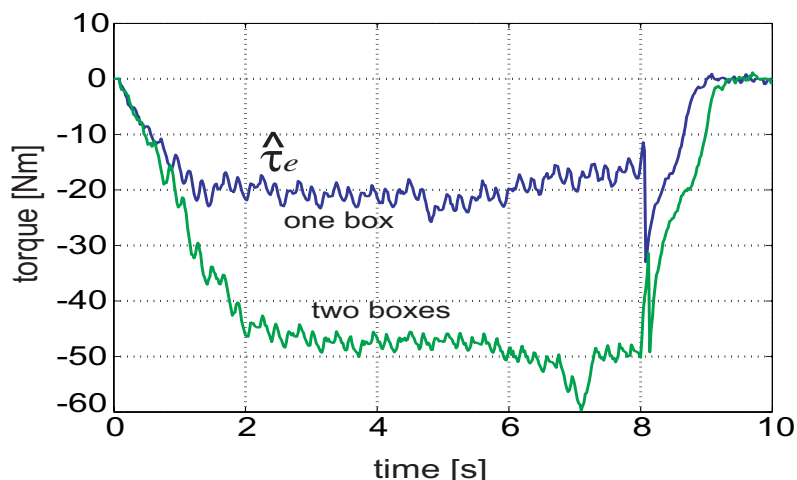


図 3.50: 段ボールを押すために必要な環境作用力の推定

3.7 被験者を用いた各手法の評価実験

この実験として用いる手法は以下の三つである。手法 B, C は本研究で提案したものであり、すでに実験的検討を行っている。手法 A として採用した片側インピーダンス制御とは、操作者側のみインピーダンス制御器をもつもので、どのような環境力がはたらいても位置指令には影響がない。

手法 A : 片側インピーダンス制御

インピーダンスパラメータ : $M_1 = 1.0$, $D_1 = 40$ 、つまりアシスト比 : $\alpha = 3$

手法 B : 双方向インピーダンス制御

インピーダンスパラメータ : $M_1 = 0.5$, $D_1 = 20$, $M_2 = 1.5$, $D_2 = 60$ 、
つまりアシスト比 : $\alpha = 3$

手法 C : 力制御ベース型パワーアシスト法 (環境オブザーバあり)

アシスト比 : $\alpha = 3$ 、環境モデル : $D_{en} = 20$, $K_{en} = 400$

評価するポイントは以下の二点である。

評価点 1 : 環境変動の認知

段ボールが 1 個から 2 個に変わったことをきちんと感じたか、途中で重くなったと感じたかについて、YES か NO で答えてもらう。

評価点 2 : 環境変動の大きさの認知

もし途中で重くなったと感じたなら、何倍くらい重くなったかを感じたか答えてもらう。

20 代の男性、計 8 人の被験者に段ボールを運ぶ動作を上記の三手法で行ってもらった。各手法についての情報は一切与えず、単に手法 A、B、C とだけ説明し、それぞれ数回動作を行い、環境変動をいかに感じたかを評価してもらった。

	手法 A	手法 B	手法 C
被験者 1(男)	YES, 3 倍	NO	YES, 2 倍
2(男)	YES, 1.7 倍	NO	YES, 1.5 倍
3(男)	YES, 2.2 倍	NO	YES, 1.7 倍
4(男)	YES, 1.5 倍	NO	YES, 2.5 倍
5(男)	YES, 1.5 倍	NO	YES, 2 倍
6(男)	YES, 2 倍	NO	YES, 2 倍
7(男)	YES, 2.5 倍	NO	YES, 2 倍
8(男)	YES, 2 倍	NO	YES, 2 倍

3.7 被験者を用いた各手法の評価実験

これらの評価結果をグラフにまとめたものを図 3.51 に示す。

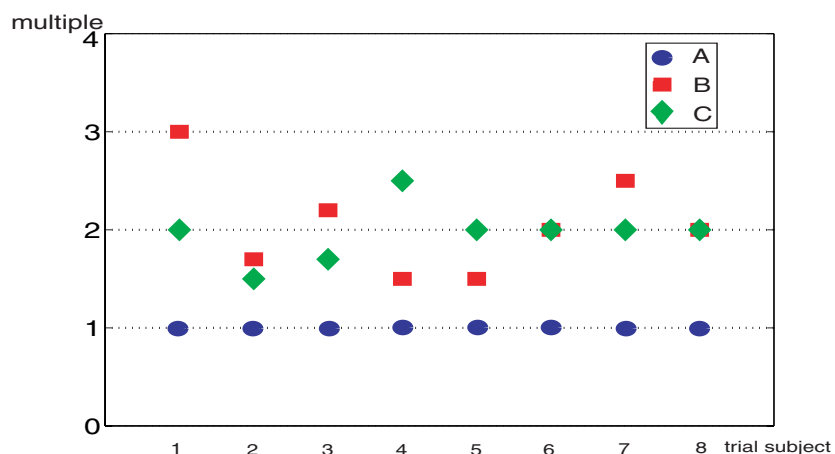


図 3.51: 被験者評価実験の結果

これらの評価結果に対し、平均と標準偏差を計算してグラフに表したものを図 3.52 に示す。

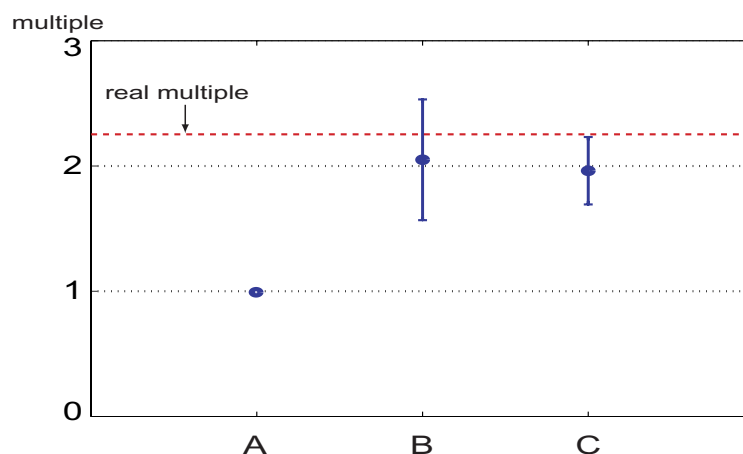


図 3.52: 平均と標準偏差による比較評価

操作者側のみインピーダンス制御を行う手法 A は、被験者全員が環境変動を感じることができなかった。これは、環境側の何らかの情報を操作者側へフィードバックする機構がないからである。例えば実用場面で、環境に予想外の大きな負荷がかかっているにもかかわらず、操作者は気付かずそのまま動作を続けるなど危険な可能性もありうる。

操作者側と環境側で双方向にインピーダンス制御を行う手法 B では、確実に環境の変動を感じることができており、平均値を見ても、実際の環境変動の大きさを言い当てられていることがわかる。力制御ベース法も同様である。何倍重くなったかを厳密に言い当てられるかどうかは特に重要な問題ではないが、おおよその変動を確実に感じることができるという点において、本研究で提案した両手法は優れている。

例えば実用場面で、患者を抱き上げるような介護ロボットを操作する場合、万が一患者が暴れたり、あるいは自分で起き上がろうとして急に軽い負荷になったりした場合でも、その患者の挙動を介護者は感じることができ、また、双方にとって安全な接触、安定な位置軌道を実現できるため、非常に適している手法であると言える。

3.8 高齢者支援に対する上記手法の考察

本章では、はじめに位置制御ベース型手法の一つとして、人間側と環境側それぞれにインピーダンス制御を行う双方向インピーダンス制御を提案した。この手法では、たとえ環境に接触していなくても安定な位置軌道を生成し、またインピーダンスパラメータを調整することで、操作性やおおまかなアシスト率を設定できるという利点がある。次に力制御ベース型手法の一つとして、環境オブザーバを導入したパワーアシスト手法を提案し検討したが、環境特性の変動によらず正確なアシスト率を実現できるという利点があり、人間の作業を楽にさせるというパワーアシスト本来の意味を実現させるものとして非常に有用である。

両手法ともに、環境の特性を知りえなくても安定でかつ望みどおりのパワーアシスト動作が実現され、しかも、環境の変動をある程度正確に感じることができることも被験者による評価によって確認された。つまり、前章で定義したパワーアシスト動作への四つの要求事項に対し、どの項目において長けているかなどは両者で多少異なるものの、ほとんどの要求を十分に満たすものであり、さまざまなパワーアシスト装置に適用できるという可能性が示された。高齢者支援の場面として、前者は特に、安全性を最優先する介護動作などで有用となる。アンケート評価によって明らかになったように、インピーダンス制御を基本とした手法により、常に安定した位置軌道を生成するからである。また双方向インピーダンス制御の導入により、患者が装置の上で暴れたような場合でも安全な接触が実現され、その患者の挙動を操作者(介護者)側に返すことも期待できる。一方、後者の手法は、まさに力の増幅に重きを置くような作業に大変適していると言える。操作性や安定性においては前者ほど優れてはいないが、アシスト比や環境に与える力の精度の良さで優っている。

実際の高齢者支援場面にパワーアシスト装置を導入する際には、実現したいパワーアシスト動作の特徴、環境となるものは何か、その動作で何を優先するべきか、を考慮し、これら二つの手法を有効に使い分けることが重要となる。

もう一つの観点から考察を加えることができる。それは、人間と機械との距離に関してである。言い換えると、機械まかせでパワーアシスト動作を実現するか、人間主体で実現するか、である。アンケートによる評価実験を行った際、「ある程度力を入れたら後は機械にまかせてしまいたい」とう意見がある女性から聞かれた。一方、「自分自身が主体的に細かい力加減なども行い、機械は少し補助する程度でいい」という意見もある男性から聞かれた。人間が大いに調整能力を発揮して、機械まかせにしないという状況である。これは、

3.8 高齢者支援に対する上記手法の考察

何を運ぶかというパワーアシスト動作の目的や状況によって変わり、また、操作者の気持ち次第でもある。今回実際に行ったアンケート評価においても、評価点3の「操作性、使いやすさ」については位置制御ベース法と力制御ベース法のどちらを好むかは、被験者それぞれの意見が分かれた。ある程度、男女という性別によって、例えば男性は機械に触れることに慣れており、ある程度自分が主体的に動作したい人が多いが、一方、女性は機械まかせにしたい人が多いなどの傾向があるかもしれない。そうすると、福祉の現場では女性が機器の操作者になることが将来的に多くなることを考慮すれば、その制御系設計において、本研究の成果を生かすことができるであろう。

結果として、図 3.53 のように、力制御ベース法がある程度人間よりのパワーアシスト手法であり、位置制御ベース手法は機械まかせに近い手法であるとの結論づけができる。前者は制御系への入力である”力”の次元をそのまま変えずに制御を行うのに対し、後者は”力”の次元を”位置”の次元へ変換して制御し、このことが人間側へいくらか歩み寄りることにつながっていると言えるかもしれない。これはあくまで一つの考え方であり、さまざまな場面における実験的検討を通してさらに明らかにしていきたい。

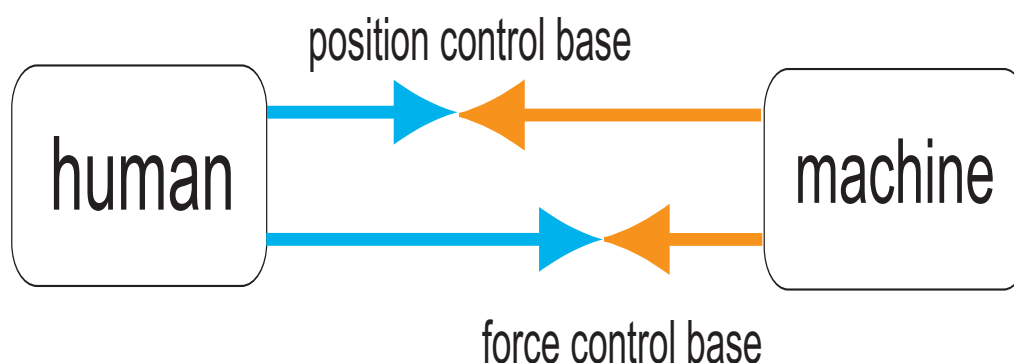


図 3.53: 人間と機械の関係

操作者になる人には、力の強い人、弱い人、男の人、女の人、機械まかせにしたい人、自分で勝手に動かしたい人、などさまざまである。その操作者の意向をくみ取った上で、パワーアシスト動作の目的を含めて、どの評価ポイントを最も重視するかを考慮し、本研究での提案手法をケースバイケースで使い分けていくことになるであろう。

3.9 まとめと今後の課題

3.9.1 本章のまとめ

本章では、前章で三つに分類したパワーアシスト形態のうち、操作者・ロボット・環境の三者がその二接点で力を作用させるような場合について、位置制御をベースとした手法と力制御をベースとした手法についてそれぞれ比較検討した。位置でアシストするか、力でアシストするかというパワーアシスト制御の本質的な議論について、それぞれ新しい手法を提案し、さまざまな実験と被験者を用いての評価を通してその有効性や特徴を明らかにした。

位置制御ベース型パワーアシスト手法では、操作者である人間側と、力を受ける環境側のそれぞれでインピーダンス制御を行う双方向インピーダンス制御という手法を提案し、その有効性を確認した。インピーダンスパラメータの比によって、ある程度のアシスト比を設定することができ、さらに、剛性係数もうまく利用することでさまざまなパワーアシスト制御を実現できることが示された。

力制御ベース型パワーアシスト手法では、環境に与える力を直接的に制御するため、位置制御ベース型手法とは異なる利点が存在する。また環境変動に対するロバスト化をはかる環境オブザーバを導入したことで、どのような環境に対してもパワーアシスト動作の本来の目的である「楽な作業」の実現が可能となり、新しい評価値を用いてその有効性が示された。さらに、インピーダンス制御を導入した力制御ベース型パワーアシスト法により、自由度の高い設計法も見出した。

被験者を用いてのアンケート評価によって両手法の特徴や利点を見出すこともでき、提案したいいくつかの手法が冒頭で定義したパワーアシスト動作への四つの要求事項を満たすこと、また、どの項目において特に優れた特性を発揮するかについても明確にした。さらに、位置制御ベース型手法と力制御ベース型手法の特徴に基づき、人間主体か機械主体かという議論にまで踏み込んで考察を加えた。結果的に、位置制御ベース型手法は、ある程度機械が人間側に歩み寄り、主体的に動作するもので、力制御ベース型手法は、人間に大いにその調整能力を発揮させ、機械はあくまで力の補助を行うだけであるという考え方を導いた。制御系への入力である”力”の次元でそのまま規範値をつくるか、”位置”の次元に変えて規範値をつくるかの違いが”人間と機械の距離”を変えたと言えるかもしれない。これは絶対的な根拠があるものではなく、妥当性についても今後さらなる検討が必要であり、今はまだ、あくまで単なる一つの見解にすぎないが、パワーアシストロボットの設計指針の一つとしても重要な要素となりうるものであると考えている。

位置でアシストするか、力でアシストするかというパワーアシスト制御の本質的な議論について、実験的検討も含めて、その基本構造と特徴、福祉場面での動作支援への可能性を明らかにし、パワーアシストロボットの設計指針を明らかにしたことが本章における大きな成果である。

3.9.2 今後の課題と可能性

本研究ではシンプルな装置による実験を行ったが、実際の介護動作や力作業に対して位置制御ベース型や力制御ベース型手法がどのように適用されるべきかについて実験的検討を行う必要がある。位置制御ベース型として提案した双方向インピーダンス制御においても、剛性係数を導入するかどうかで人間の感じ方は異なる。また力制御ベース型として示したいくつかの手法にもそれぞれ特徴がある。さらに力センサレス手法についても、操作者側で行うか環境側で行うかという問題がある。これらは、どのようなパワーアシスト動作を行うか、どのような環境であるか、などにより使い分ける必要があり、今後の実験的検討でそれらを明らかにしたい。

Kazerooni の開発した “extender” [32] との比較についてもいづらか議論したが、Kazerooni のような人間装着型ロボットの場合におそらく必要となる人間の腕の特性に対する考慮も今後の課題としてあげられる。本研究では環境変動に対するロバスト性は取り上げたが、その操作者となる人間の腕の特性とその変動に対するロバスト性についても同様に、オブザーバを用いることができるかもしれない。

また、力を増幅することや設計の自由度を高めること、さらに環境をいかに感じるかという点についても議論してきたが、これらの要素を基に、リハビリなどを意識したパワーアシストロボットへ応用する可能性についても今後検討していきたい。同じ操作者が長い間継続的に使用することを考えると、適応的にそのパラメータなどを調整していくことも重要となる。特に福祉的応用の中では、リハビリを目的としてその人の日々変化していく症状に合わせながら制御系のパラメータを適応的に変化させていくようなことができる可能性もあると考えている。

第4章 操作者が感じる操作性の向上を目指したパワーアシストロボットの制御法

4.1 操作性向上における要求事項

冒頭で定義したパワーアシスト動作への要求事項の二つ目として、「操作性、使いやすさ」を挙げた。この要求に対する満足度を高めると同時に、楽に動作できること、安定性や安心感、信頼性などの面も十分に保たなければならない。

例えば、人間が直接モノを運んだり動かしたりする場合は、当然ながら立ち上がりの速さ、位置決め、速度調整などを自在に操ることができる。このような操作性を機器を介してもほとんど保った形の動作を実現できることが理想である。言い換えれば、この地点までこの速度で動かして止まろうという操作者の意志をそのとおりに実現することが「操作性、使いやすさ」である。

当然人間は操作に関する調整能力をもっており、動作の中でスムーズに動くように努力するはずであるが、逆にロボット制御の面から操作性の向上を目指すということは、人間にはあまりその能力を発揮させず、機械側から操作者側にいくらか歩み寄ることとも言える。ロボットの制御面からもある程度操作性を保証するべきであり、両者の合わさった結果がトータルでの操作性であると言える。この”人間と機械の距離”に関する考察も後に加える。

本章では、インピーダンス制御をベースとして、操作者が感じる操作性や使いやすさを大きく向上させることを目指し、さらにロボットと環境が一体となることから生じる慣性変動と制御系の安定性についても議論する。

4.2 インピーダンス制御の原理とその実現手法

4.2.1 インピーダンス制御の原理と特性

インピーダンス制御については前章でも用いていたが、あらためてその原理と特性を記すことにする。

インピーダンス制御とは力制御の一種であり、パワーアシスト手法としても広く使われ

ている [33]。これは、マニピュレータと環境の間にバネとダンパで構成される仮想的なインピーダンスを設定し、外界からの力 τ_e に対する軌道補正を行うことにより、環境との安全な接触動作を実現させるものである。運動方程式は次式で表され、各係数は、慣性係数 M 、粘性係数 D 、剛性係数 K である。

$$M\ddot{\theta} + D\dot{\theta}_e + K\theta_e = \tau_e \quad (4.1)$$

$$\theta_e = \theta - \theta_r \quad (4.2)$$

力制御の一種であるインピーダンス制御を行うが、前章で示した力制御系のように一番内側に 2 自由度位置制御系 [45][46] を設計し、その外側で力に関する制御を行うこととする。

4.2.2 操作者の入力トルクの推定

前章では、操作者の入力トルクを力センサで計測し、ロボットと環境間の作用トルクをオブザーバで推定した。本章では、図 4.1 のようにロボットと環境がほぼ一体化したパワーアシスト形態を扱うため、ロボットへの唯一の作用力である操作者の入力トルク τ_m を式 (4.3) のようにオブザーバで推定する。ロボット - 環境間の作用トルクははたらかないと考え、測定しない。

$$\hat{\tau}_m = \hat{\tau}_d - (F + D\dot{\theta}) \quad (4.3)$$

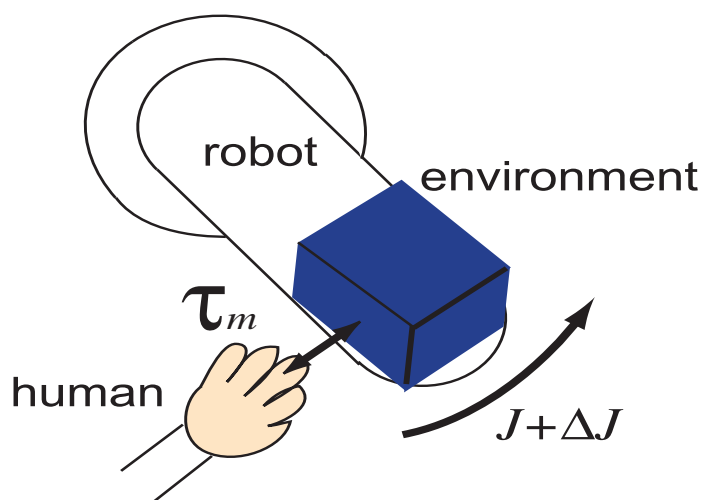


図 4.1: 慣性変動項が支配的なパワーアシスト形態

式 (4.3) により操作者の入力トルクを推定した結果とそれを力センサで計測した結果を合わせて図 4.2 に示す。オブザーバによりうまく推定できていることがわかる。

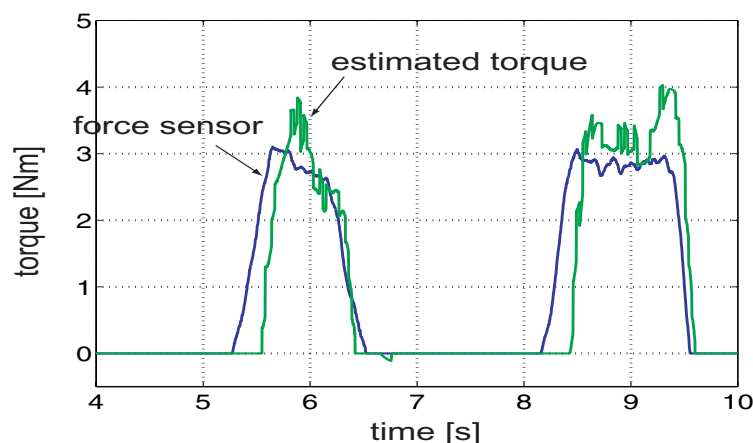


図 4.2: 操作者の入力トルクの推定

4.2.3 カセンサを用いないインピーダンス制御の実現

前述のインピーダンス制御を利用し、操作者の与えた力に応じた位置指令を与えることでパワーアシスト動作を実現する。また、前節で述べたように、操作者の与えた力はカセンサを用いず推定する。つまりカセンサレスインピーダンス制御を実現することがここでの目標である。

式 (4.3) で推定した外力 $\hat{\tau}_m$ に基づき、式 (4.4) に示すインピーダンス制御を行うとき、制御系の構造は図 4.3 のようになる。ただし、インピーダンスモデルを $C_I = \frac{1}{Ms^2 + Ds + K}$ 、剛性係数 $K = 0$ としている。また、与える外力の推定値 $\hat{\tau}_m$ から位置出力 θ までの伝達関数は次式のようなになる。

$$\theta_{adj} = \frac{1}{Ms^2 + Ds} \hat{\tau}_m \quad (4.4)$$

$$\frac{\theta}{\hat{\tau}_m} = \frac{G_{ry} C_I Q_{es}}{1 + (\frac{1}{P} - \frac{1}{P_n}) G_{ry} C_I Q_{es}} \quad (4.5)$$

4.2 インピーダンス制御の原理とその実現手法

ここで、センサレスインピーダンス制御のブロック図を図 4.3 に示す。ポジティブフィードバックの位置制御系になっていることが特徴的である。

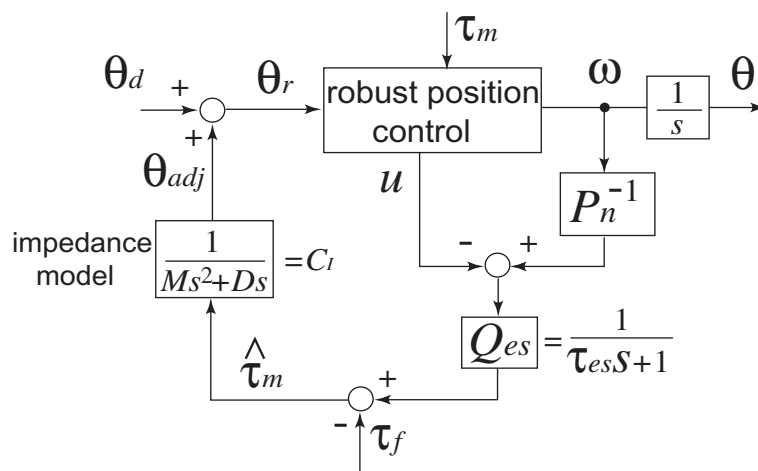


図 4.3: センサレスインピーダンス制御のブロック図

DD ロボットの 2 軸において、 $M = 1.0$, $D = 5.0$ としてセンサレスインピーダンス制御を行った実験結果を図 4.4 に示す。正負それぞれの方向に対して、外乱推定値 $\hat{\tau}_d$ から計算した操作者の入力トルク推定値 $\hat{\tau}_m$ に基づいてインピーダンス制御が行えていることがわかる。

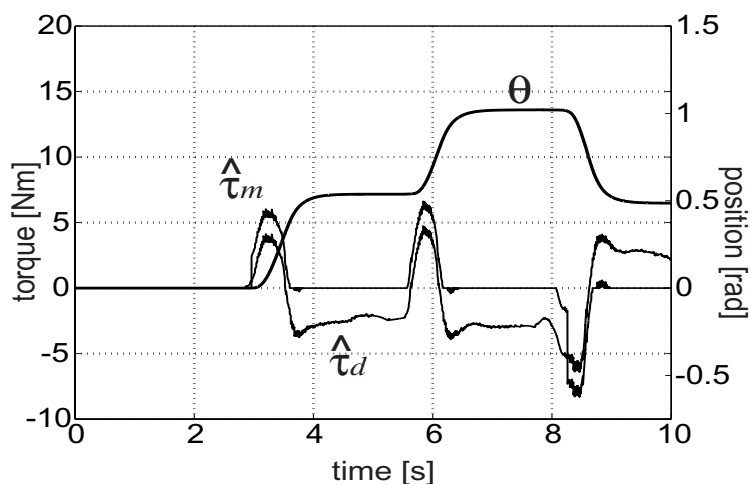


図 4.4: センサレスインピーダンス制御の実現

状況に応じてインピーダンスパラメータを変化させていくことの必要性が見えてくる。

4.3 可変インピーダンスを用いたパワーアシストロボットの操作性の向上

4.3.1 インピーダンスパラメータの役割

図 4.3 のようなインピーダンス制御における、慣性インピーダンス M ・粘性インピーダンス D それぞれの大きさによるロボットの位置応答の違いを図 4.5 に示す。

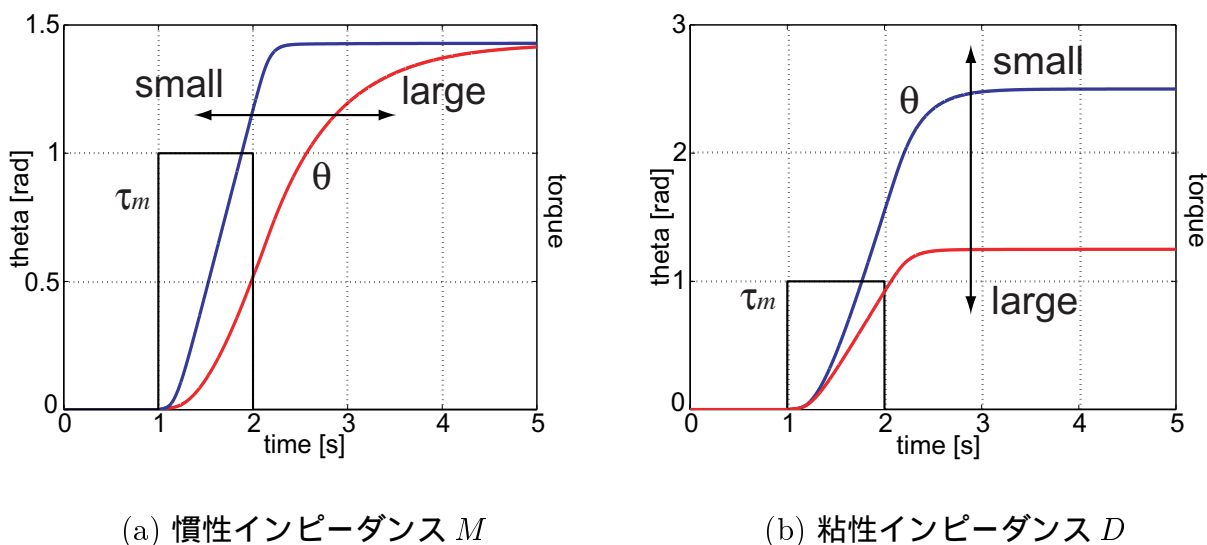


図 4.5: インピーダンスパラメータの役割

慣性インピーダンス M は動作の立ち上がりの速さ、粘性インピーダンス D は動きの大きさにそれぞれ対応することがわかる。

4.3.2 可変インピーダンスによる操作性の向上

インピーダンスを可変にすることで操作性を向上する考え方はこれまでもあるが[48][49]、本研究ではあらためて慣性パラメータと粘性パラメータの役割を確認し、さらに立ち上がり時と位置決め時で可変インピーダンスの設計手法を変えることも検討する。

一定インピーダンスによる実験

実験にはロボットの1軸だけを用い、2軸はフリーにして人が手でもつ部分として利用した。

一定のインピーダンスにより制御を行った実験の結果を、(a) $M = 6.0$, $D = 12.0$ という大きなインピーダンスにより制御を行った場合、(b) $M = 1.0$, $D = 2.0$ という小さいインピーダンスにより制御を行った場合、についてそれぞれ図 4.6 に示す。

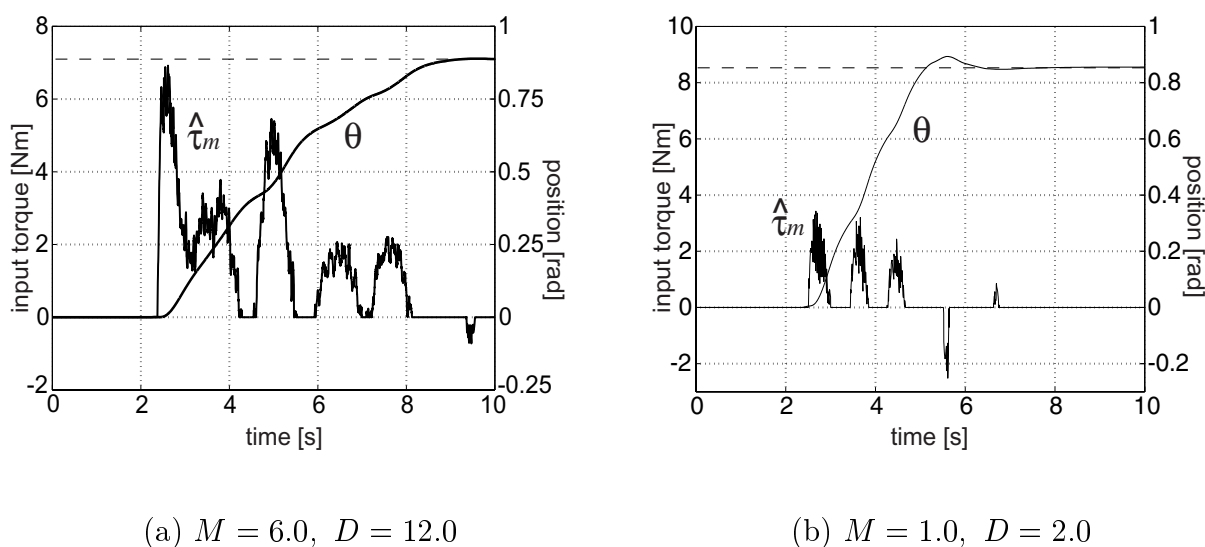


図 4.6: 一定粘性によるセンサレスインピーダンス制御

(a) のように大きなインピーダンスパラメータの場合は、立ち上がりが遅く、動きの大きさが小さいため操作者には多くの力が必要となる。一方、(b) のように小さいインピーダンスパラメータの場合は、立ち上がりも速く、動く幅も大きいため少ない力で操作できるが、 $t = 5.5[s]$ で起こっているように、操作者が想定している停止位置を行き過ぎてしまう場合があり、逆方向の力を加える必要があることがある。これらの結果からも明らかなように、インピーダンスパラメータの設計が操作者の操作感に大きく影響を及ぼすこと、そして動作途中でも立ち上がりや位置決めなどの状況に応じてインピーダンスパラメータを変化させることの必要性が浮かんでくる。

可変粘性法 1

ここで、前述のインピーダンスパラメータ M, D の影響を考慮して、より自然な、抵抗感のないパワーアシスト動作を実現する。

実際の介護動作を想定した場合、立ち上がりや動作そのものは速くなくてもかまわない。

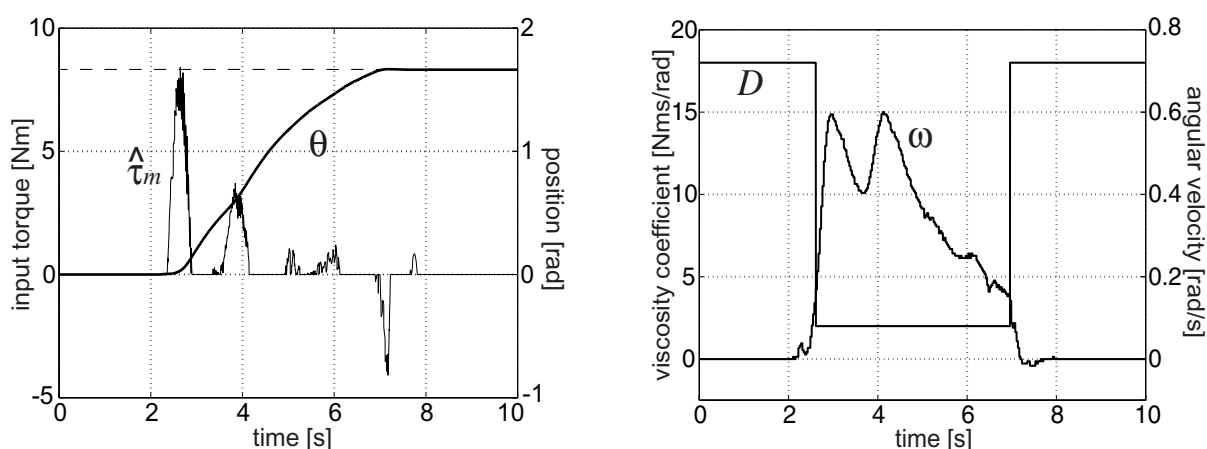
4.3 可変インピーダンスを用いたパワーアシストロボットの操作性の向上

そこで、慣性パラメータ M はそれほど小さくない値に固定する。一方、人が加える力ができるだけ小さいこと、位置決めがある程度できることが求められる。そこで、粘性パラメータ D の値は速度の大きさによって変化させる。速度が小さいときは D を大きく、速度が大きいときは D を小さくすることでそれらを実現する。

$$\begin{cases} C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_l s} & \omega < \omega_0 \\ C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_s s} & \omega \geq \omega_0 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$D_l > D_s \quad (4.7)$$

この可変インピーダンスの設計手法で実験を行った結果を図 4.7 に示す。



(a) 入力トルク推定値と位置応答

(b) 速度と粘性

図 4.7: 可変粘性によるセンサレスインピーダンス制御

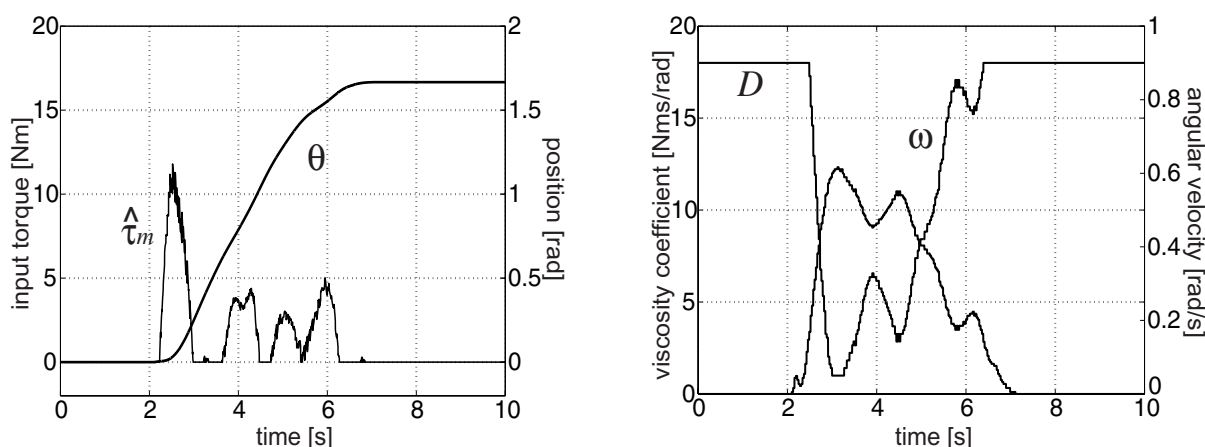
立ち上がり時に力を入れればすぐに速度が上昇し、 $t = 4[s]$ 付近での速度調整も容易に行われている。最後の位置決めもある程度うまく行えているが、 $t = 7[s]$ 逆方向に力を入れ、行き過ぎるのを止めるような感覚になっている。実際に何回も動作を行った結果からも、位置決めの際に、行き過ぎるのではないかという不安が感じられた。

可変粘性法 2

先ほどのように一気に粘性パラメータ D を小さくすることは、立ち上がり時にはよいが、位置決めが近くなったときにまだ速度が落せず、逆方向の力を入れて止めるような動作が必要であることが実験結果からもわかる。そこで、速度に応じて直線的に D を変化させる手法を考える。速度 ω_0 を越え ω_1 になるまでは、その比例的な変化を行う。つまり、式 (4.8) に示す可変粘性法である。

$$\begin{cases} C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_l s} & \omega < \omega_0 \\ C_I = \frac{1}{Ms^2 + \{D_l + \frac{D_s - D_l}{\omega_1 - \omega_0}(\omega - \omega_0)\}s} & \omega_0 \leq \omega < \omega_1 \\ C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_s s} & \omega_1 \leq \omega \end{cases} \quad (4.8)$$

この可変インピーダンスの設計手法で実験を行った結果を図 4.8 に示す。



(a) 入力トルク推定値と位置応答

(b) 速度と粘性

図 4.8: 可変粘性によるセンサレスインピーダンス制御

動作の前半において、先ほどよりもやや大きな力が必要となっているが、位置決め動作では逆方向に力を入れて停止させることもなく、うまく停止できていることがわかる。

可変粘性法 3

介護動作ではなく、荷物の移動などある程度大きな加速をもってもよい場合は、立ち上がり時には一気に加速して、動作の終わりにはゆっくり止まるような動きが望まれる。このような考えから、動作の前半、つまり加速時にはある速度 ω_0 を越えたら、粘性パラメータ D を一気に小さくし、大きく動ける状態にする。そして動作の後半、つまり減速時には、位置決めに向かう上で、先ほどのように速度と粘性パラメータに直線的な関係をもたせる。上記の二手法を組み合わせたような手法であるが、それぞれ式 (4.9)(4.10) に示される可変粘性法となる。

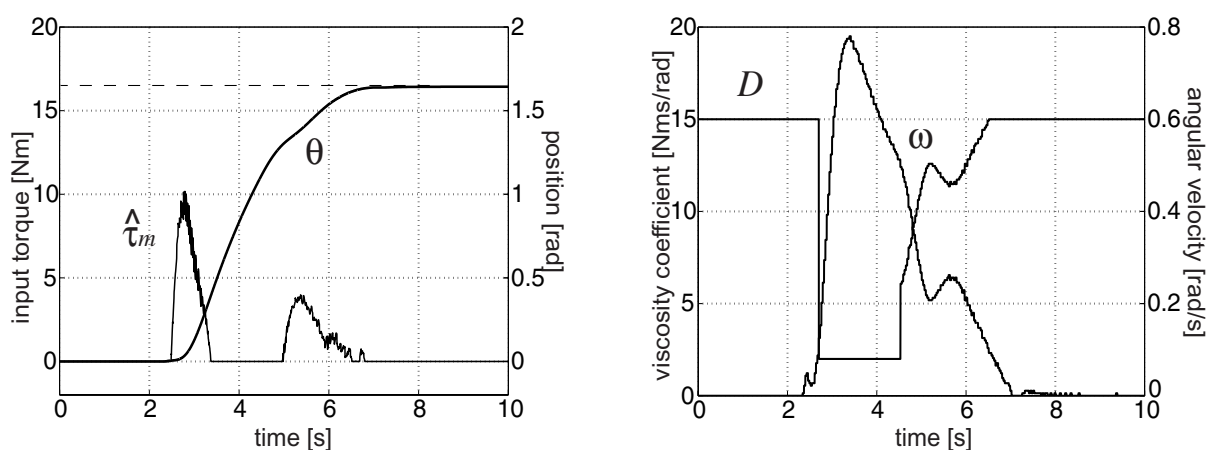
加速時：

$$\begin{cases} C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_l s} & \omega < \omega_0 \\ C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_s s} & \omega \geq \omega_0 \end{cases} \quad (4.9)$$

減速時：

$$\begin{cases} C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_l s} & \omega < \omega_0 \\ C_I = \frac{1}{Ms^2 + \{D_l + \frac{D_s - D_l}{\omega_1 - \omega_0}(\omega - \omega_0)\}s} & \omega_0 \leq \omega < \omega_1 \\ C_I = \frac{1}{Ms^2 + D_s s} & \omega_1 \leq \omega \end{cases} \quad (4.10)$$

この可変インピーダンスの設計手法で実験を行った結果を図 4.9 に示す。



(a) 入力トルク推定値と位置応答

(b) 速度と粘性

図 4.9: 可変粘性によるセンサレスインピーダンス制御

この手法は、上記の二手法の長所をそれぞれ組み合わせた手法であり、動作立ち上がり時には力を入れればすぐに動きだし、位置決めもスムーズに行えることが実験結果からも明らかである。

4.4 可変インピーダンスを用いたパワーアシスト制御の被験者評価による解析

ここまで示した従来のインピーダンス制御によるパワーアシスト手法と可変インピーダンスを用いたアシスト手法を、多くの被験者に使用してもらい、パワーアシスト動作でどのように感じるかを評価し、いくつかの評価点から考察する。

4.4.1 被験者を用いたアンケート評価の方法

評価方法は前章の被験者評価と同様である。すでに定義したパワーアシスト技術への要求事項をベースとして評価点をいくつか設定し、その点においてどう感じるかを被験者に点数をつけてもらうこととした。点数は+3(very good) から-3(very bad) の7段階とした。

この評価方法に基づき評価実験を行う。被験者は各実験ごとに8人用意し、前章の評価法と同じように、この点数の平均 m と標準偏差 σ を計算することで各パワーアシスト制御手法の比較検討を行う。

4.4.2 各アシスト制御法に対する被験者評価

ここでは、上述のように可変インピーダンスパラメータを用いたパワーアシスト制御法が、その操作者に与える操作感や感じる使いやすさを評価する。比較を行う手法は以下の二つである。

手法 A：一定インピーダンス制御によるパワーアシスト手法

インピーダンスパラメータ： $M = 5.0$, $D = 12.0$

手法 B：可変インピーダンス制御によるパワーアシスト手法

インピーダンスパラメータを $M = 5.0$, $D_l = 18.0$, $D_s = 2.0$ とし、上述の可変粘性法 3 のように動作の立ち上がりは一気に粘性を D_l から D_s に小さくし、位置決めに向かうにつれて粘性を速度と直線的關係で大きくしていく手法を用いる。

ロボットの 1 軸のみを用い、何かを運んでいるというアシスト動作をイメージして、力センサに力を入れ、協調相手としてのロボットの挙動を評価してもらう。特に決まった停止位置などは指定しなかったが、被験者自身にその目標速度や停止位置を想定してもらい動作をしてもらう。これらのアシスト法を比較する上での評価ポイントは、前章での評価実験と同様である。

評価点 1：力の増幅・補助

評価点 2：安定性、安心感

評価点 3：操作性、使いやすさ

また最後に、同じ作業をする上でどちらを好むかについても意見を聞くことにする。20 代の男性、計 8 人の被験者を対象に、上記二手法のアルゴリズムの詳細は一切知らせず、動作の立ち上がりや操作者の思う停止位置への位置決めなどを行ってもらった。以下の表が二つの手法の比較評価の結果である。

評価点	手法 A			手法 B			どちらを好むか
	1	2	3	1	2	3	
被験者 1(男)	-1	+2	+2	+1	0	0	A
2(男)	+1	0	+1	+2	-1	+1	A
3(男)	0	+1	+2	+2	+1	+2	B
4(男)	-1	+1	0	+2	+1	+1	B
5(男)	0	+2	0	+2	-2	-1	B
6(男)	-1	+1	-1	+1	0	-3	B
7(男)	-1	+2	-2	+2	-1	+2	B
8(男)	-1	+1	+1	+2	0	-1	B

4.4 可変インピーダンスを用いたパワーアシスト制御の被験者評価による解析

これらの結果を各評価点ごとにグラフにまとめた結果を図 4.10 に示す。

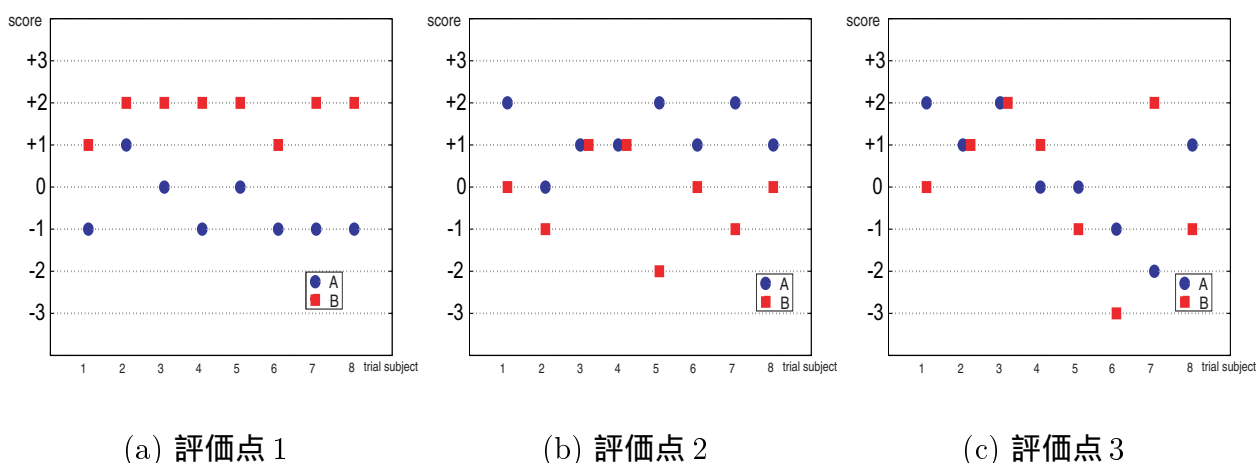


図 4.10: 各評価点における被験者の評価

これらの評価結果に対し、各評価点の平均と標準偏差を計算してグラフに表したものを図 4.11 に示す。

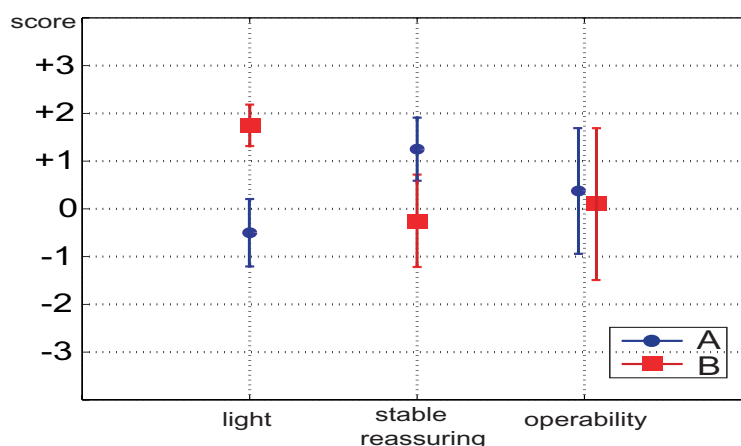


図 4.11: 平均と標準偏差による比較評価

評価点 1 の「力の増幅・補助」については、これらの解析からも明らかのように、可変インピーダンスを用いた場合には動作立ち上がり後に粘性を小さくして位置軌道を大きくしているため、被験者のほとんどが一定インピーダンス制御よりも軽くて楽であると回答した。パワーアシスト動作の第一要求事項である「力の補助」の点において優位性をもっていることが確認される。

評価点 2 の「安定性、安心感」については、一定インピーダンス制御の方が大きく動かないため、より安定に感じている一方、可変インピーダンスにより、立ち上がり以降は力を抜いてもある程度自動的に動いてくれるが、逆にそれが少し不安に感じさせる結果になっている。慣れの度合にもよると思われるが、人間は特に力を与えていないのに勝手に機械が動作することに人間は不安を感じるという結果が明らかになったと言える。

評価点3の「操作性、使いやすさ」については、前章の位置制御ベース法と力制御ベース法の比較評価実験の結果に見られたように、個人個人によって意見が分かれた。立ち上がり以降、ある程度自動的に大きく動き出す可変インピーダンス手法に少し抵抗感を感じ、位置決めが難しいという意見もあったが、逆に、速度の調整がしやすく動かしやすいという理由で高評価をした人もいた。

最終的にどちらを好むかという評価については、可変インピーダンス法では立ち上がり以降、ある程度自動的に機械が動いてくれるが、それに不安を感じ、少しずつでもいいから自分で調整しながら動作をしたいという理由で一定インピーダンス制御のほうを高く評価する被験者もいた。一方、ある程度機械にまかせて、自分とはとにかく楽なほうが良いという理由で可変インピーダンス法を好む人もいた。そしてそれは、男性であっても意見が分かれた。

4.4.3 評価結果に基づく考察

この評価実験の結果を考察すると、前章で行った評価実験と似た考え方が浮かび上がってくる。一つは、操作者それぞれがもっている意向があり、その意向にあった制御系設計を行ったほうを好むということである。そしてその制御系設計次第で、機械が人間側に歩み寄ってある程度主体的に動作するか、あまり主体的にはたらずに人間に調整能力を発揮させるか、という議論である。被験者に実験後さまざまな点でインタビューを行ったが、ある程度機械にまかせる時間帯があっても、とにかく楽だったらいい、というやや機械まかせにしたいという操作者の意向と、機械に勝手に動かれるのは不安もあってイヤであり、少しずつでもいいからある程度自分で調整してコントロールしながらやりたいという操作者の意向が聞かれた。同じ男性であっても人によって意見が分かれた。おそらく被験者それぞれの好みによるものであると考えられる。

ここで示した可変インピーダンスを用いたパワーアシスト制御手法は、速度に応じて粘性を変化させていくものであり、さらに動作の立ち上がりと位置決めに向かう段階でその変化のしかたも変えている。これは、機械の側が速度情報を用いて操作者の意志をくみ取り、その動作段階に応じた理想的な動作を実現していると考えられる。つまり、機械が操作者にいくらか歩み寄り、人間がそれほど調整能力を発揮しなくとも動作の初めから終わりまでをある程度補償する手法であると言える。一定インピーダンス制御も安定な位置軌道を生成することには違いないが、常に同じような動きであり、可変インピーダンス手法ほどは人間側に歩み寄っていないと考えられる。

前章と同じように、「人間と機械の距離」に関する考察を行ったが、まだはっきりと断定できる概念ではない。今回行った被験者評価実験を通じて見えてきた一つの見解にすぎない。被験者がどちらを好むかはばらばらであり、それはパワーアシスト動作の状況にも関係してくる。しかしこれらの中から、「人間と機械の距離」のような尺度が見え、人間機械協調系のとらえ方の一手法として意義があるはずであり、これは本研究の成果でもある。

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

4.5.1 慣性変動の意味とその影響

ここでは、環境からの力を測る力センサを用いない場合を考えているが、ロボットに荷物や患者がのることを慣性変動とみなし、環境からの情報を得ようとしている。ここでいう慣性変動とは、ロボット制御において抑圧されるようなものではなく、もっと大きな変動である。

慣性変動に対する安定性を考慮せずにインピーダンスを小さく設定した場合のシミュレーション結果を図 4.12 に示す。荷物が落ちたり患者の姿勢が変化するなどで慣性モーメントが軽くなったときに、小さいインピーダンスパラメータでパワーアシストした場合には不安定になることがわかる。

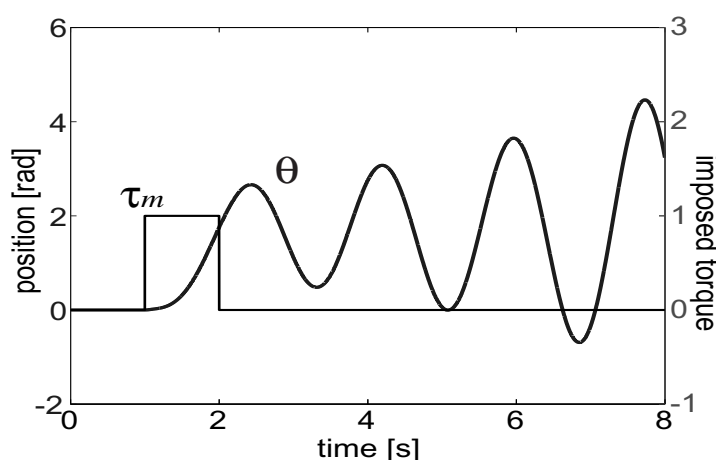
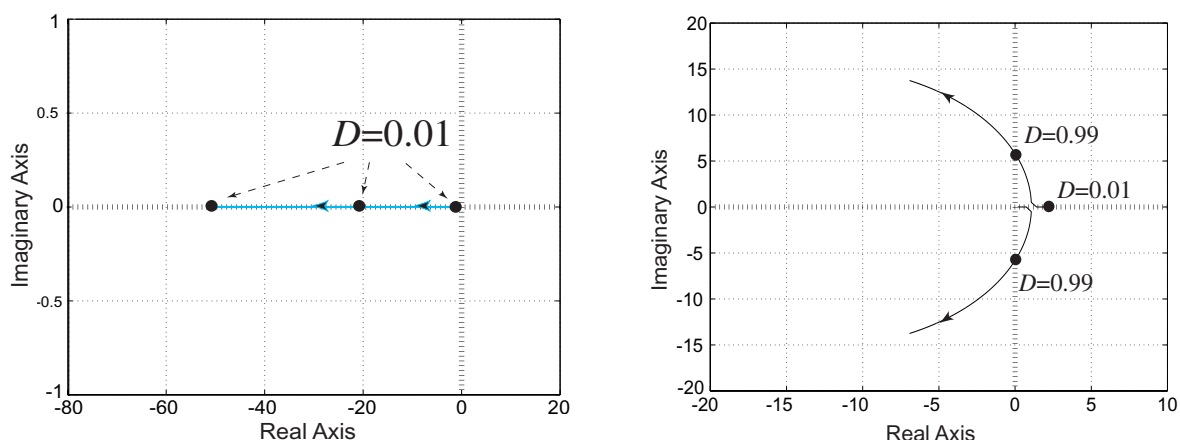


図 4.12: 慣性変動の影響

4.5.2 慣性変動とインピーダンスパラメータの安定性における解析

前述のような慣性変動に関して、式 (4.5) の伝達関数について考察する。図 4.13 は慣性変動のある場合とない場合の根軌跡を示したものである。慣性のノミナル値のほうが小さい場合 ($J_n < J$) か、あるいは慣性変動がない場合 ($J = J_n$) はインピーダンスの値によらず安定であるが、慣性のノミナル値が3倍になった場合 ($J_n = 3J$) は、小さいインピーダンスに対して極が右半平面に存在し、系が不安定になる。また、虚軸に近い極では応答が振動的になることから、これらを目安としてインピーダンスパラメータの設計に用いるべきである。

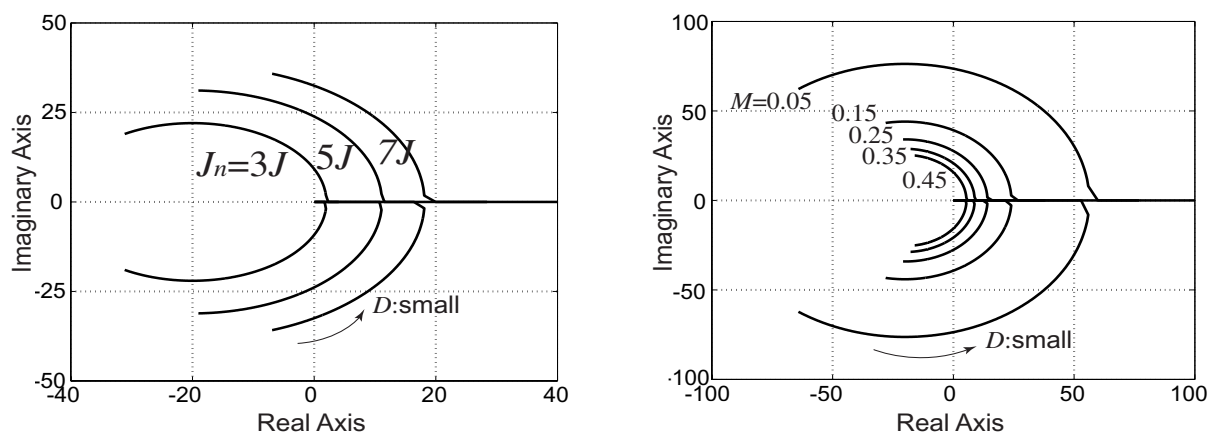
4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法



(a) 慣性変動なし
 $(J_n = J, M = 0.3)$
 (b) 慣性変動あり
 $(J_n = 3J, M = 0.3)$

図 4.13: 粘性係数 D を変化させたときの根軌跡

また、図 4.14(a) のように慣性変動が大きいほど、図 4.14(b) のように慣性パラメータ M が小さいほど極が右に移動し、小さな粘性パラメータを設定できなくなることがわかる。



(a) 慣性変動の大きさの影響
 (b) インピーダンス M の影響

図 4.14: 粘性係数 D を変化させたときの根軌跡

これにより、例えば荷物が落ちたり患者の姿勢が変化した場合などに安定性の問題が生じると言える。つまり、操作性を考慮してインピーダンスを可変にしたりする場合の設計指針として、このような慣性変動による安定性の意味で、パラメータを設定できる範囲が限られることがわかる。

また、式 (4.5) の伝達関数からラウスの安定判別法を利用して、安定限界を求めると次式が得られ、粘性パラメータの設定に用いることとなる。

$$D > \frac{J_n - J - M}{\tau_{es}} \quad (4.11)$$

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

動作開始時にはロボットと環境をあわせた慣性値を知るため、何らかの試験動作をして同定し、 J_n に用いる。また、環境が落ちた場合には慣性値がロボットの慣性値のみとなるため、式 (4.11) の J にはロボット自体の慣性値を代入し、安定限界の粘性 D を求めておく。この安定限界のときの値に近い場合は振動的な応答を示すことも考慮して、なるべく遠い値を用いるべきであると言える。

一方、次節で述べるようにリアルタイムに同定を行う必要性も生じる。それが実現できれば、常に $J_n = J$ にすることができ、粘性の値に制限がなくなるようにすることも可能となる。

慣性変動を実現するため、ロボットの先端に図 4.15 のようなおもりを取り付ける。用意したおもりはそれぞれ、1.25kg、1.25kg、2.5kg である。また、固定するための鉄心が約 1kg である。



図 4.15: 慣性変動を実現するおもり

ロボットの 2 軸に対し等速運動の指令を与え、位置制御系と外乱推定機構における慣性のノミナル値をそれぞれ、 $J_n = 0.144$ (おもりのない場合の慣性値)、 $J_n = 0.44$ (おもり 2.5kg を載せ、後に述べる手法で同定した慣性値) とした場合の、速度応答と外乱推定値の実験結果を図 4.16 に示す。

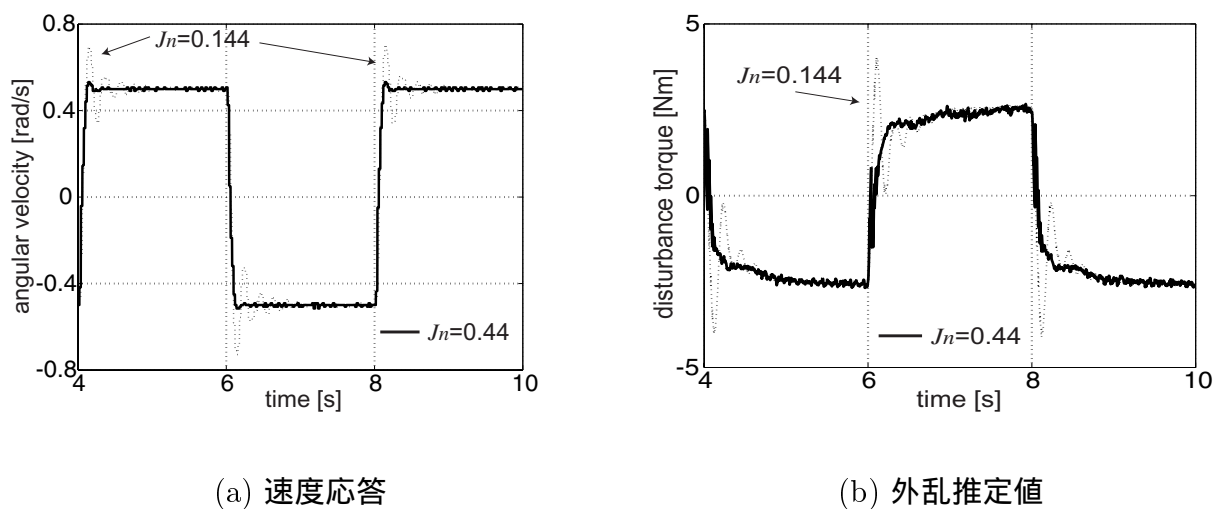


図 4.16: 等速運動における速度応答と外乱推定値 (おもり 2.5kg)

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

同様に、ロボットの2軸に対し等速運動の指令を与え、位置制御系と外乱推定機構における慣性のノミナル値をそれぞれ、 $J_n = 0.144$ (おもりのない場合の慣性値)、 $J_n = 0.58$ (おもり 3.75kg を載せ、後に述べる手法で同定した慣性値)とした場合の、速度応答と外乱推定値の実験結果を図 4.17 に示す。

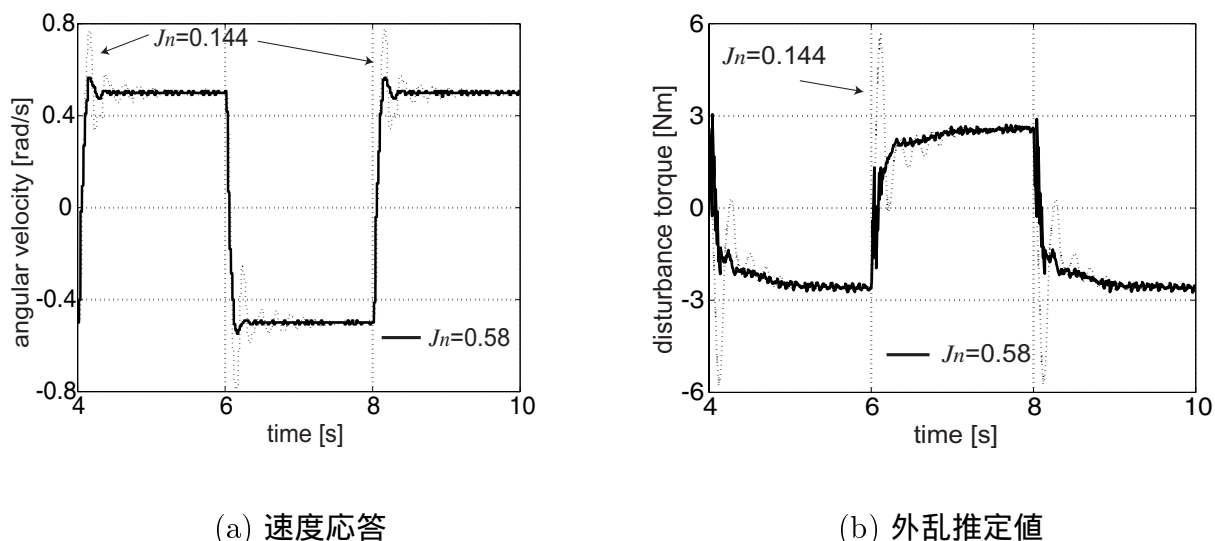


図 4.17: 等速運動における速度応答と外乱推定値 (おもり 3.75kg)

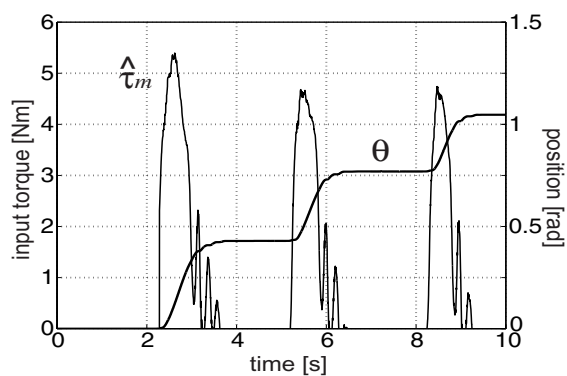
おもり 2.5kg、3.75kg、いずれの場合も、動作の立ち上がり、つまり加速度の大きいときに速度応答が乱れ、外乱推定値が不安定になることがわかる。操作者の加えるトルクを外乱とみなして推定し、インピーダンス制御に用いることを考えると、実際と異なる慣性値を用いて外乱推定値が不安定になると使いものにならないことがわかる。慣性値を最初に知る必要があることがわかる。

ここで、実際にロボット先端におもりをのせて慣性変動をほどこし、位置制御系と外乱推定機構のノミナル値には、慣性変動がないと想定したときの値 $J_n = 0.144$ を用いて、センサレスインピーダンス制御を行った結果を以下に示す。この状況は $J_n < J$ であり、理論上は常に安定である。

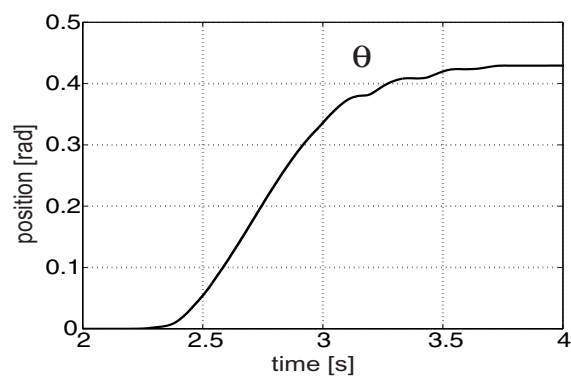
最初に、おもり 2.5kg を取り付け、インピーダンスパラメータを (a) $M = 0.5$, $D = 8.0$, (b) $M = 0.3$, $D = 6.0$, (c) $M = 0.2$, $D = 4.0$, (d) $M = 0.2$, $D = 2.0$ とした実験結果を図 4.18 に示す。

$J_n < J$ で理論上不安定ではないものの、操作者の入力トルクの推定値、つまり外乱トルクの推定値が不安定であり、インピーダンスパラメータが小さくなるほどそれが顕著となることがわかる。この不安定な推定値に基づきインピーダンス制御を行うため、その位置応答も非常に不安定になることが見てとれる。

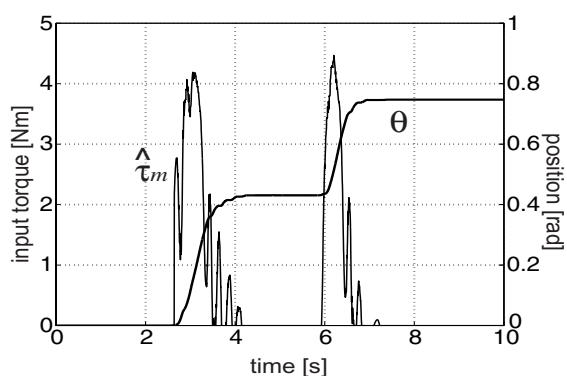
4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法



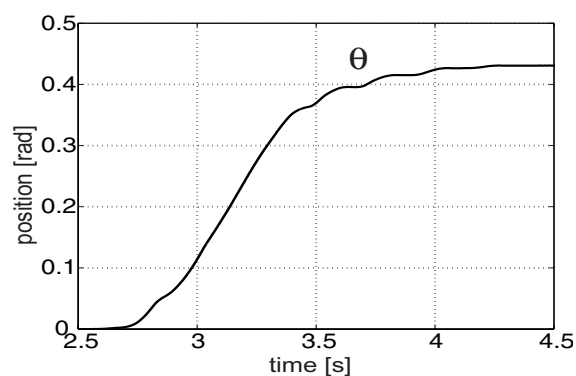
(a-1) $M = 0.5, D = 8.0$



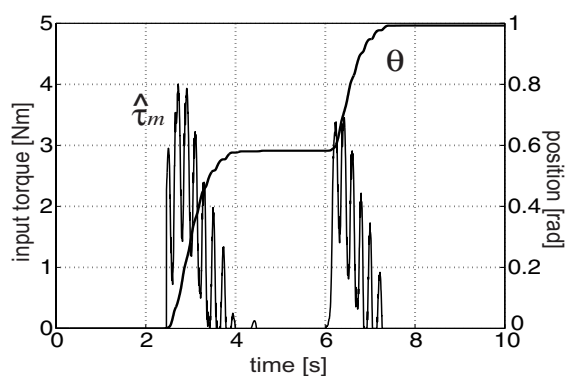
(a-2) 左図の位置応答拡大図



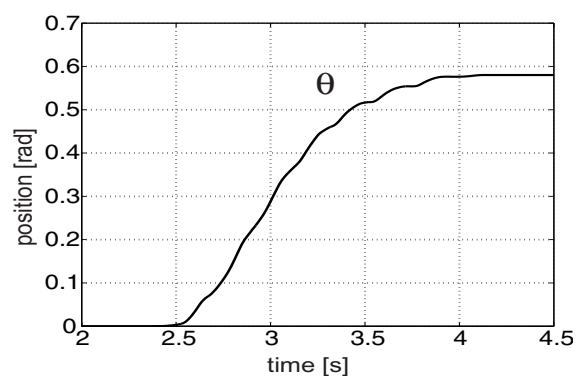
(b-1) $M = 0.3, D = 6.0$



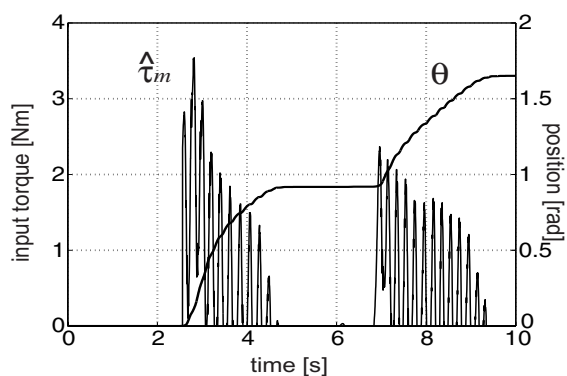
(b-2) 左図の位置応答拡大図



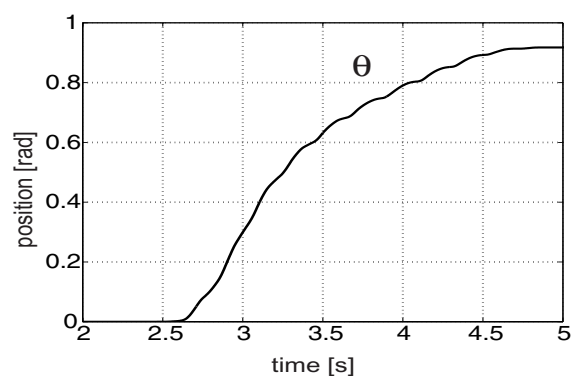
(c-1) $M = 0.2, D = 4.0$



(c-2) 左図の位置応答拡大図



(d-1) $M = 0.2, D = 2.0$

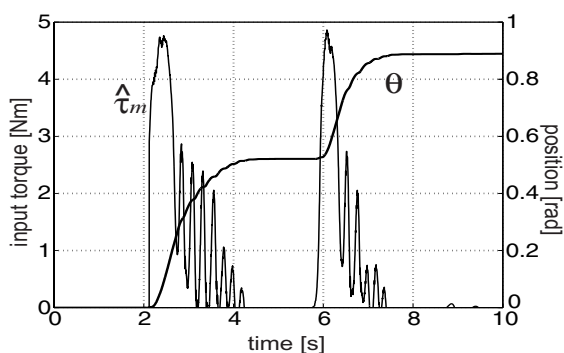


(d-2) 左図の位置応答拡大図

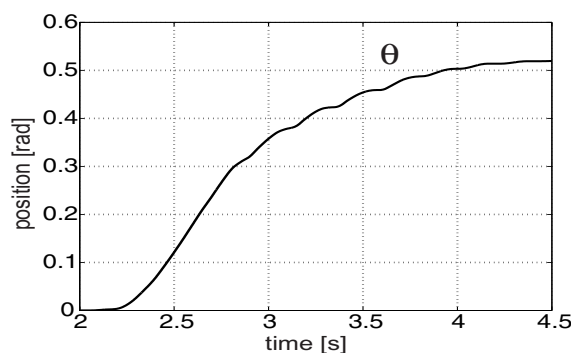
図 4.18: 慣性変動した際のセンサレスインピーダンス制御 (おもり 2.5kg)

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

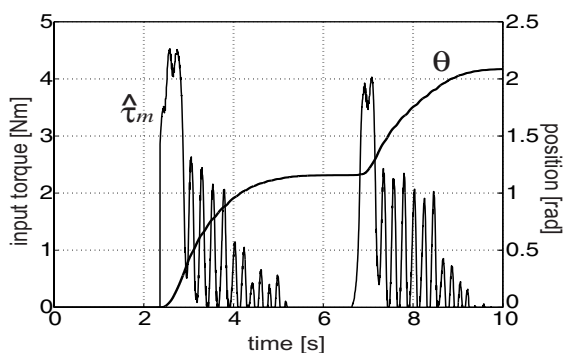
次に、おもり 3.75kg をロボット先端に取り付け、インピーダンスパラメータを (a) $M = 1.0$, $D = 7.0$, (b) $M = 1.0$, $D = 3.0$, (c) $M = 0.5$, $D = 6.0$ とした実験結果を図 4.19 に示す。



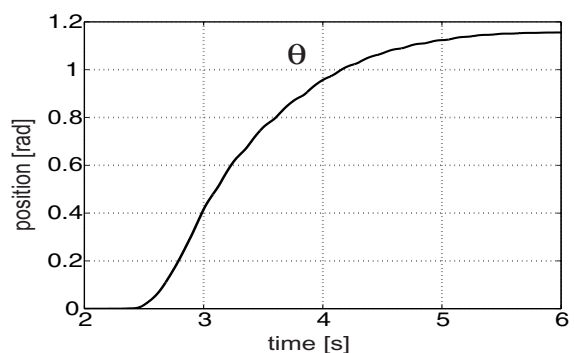
(a-1) $M = 1.0$, $D = 7.0$



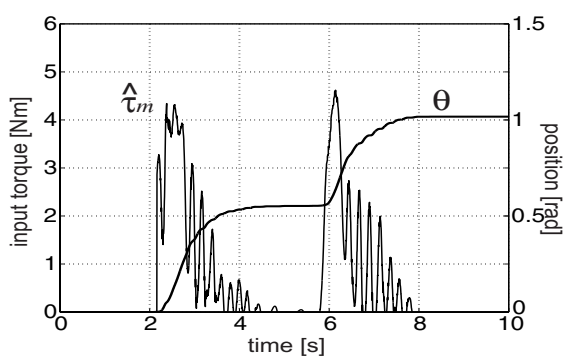
(a-2) 左図の位置応答拡大図



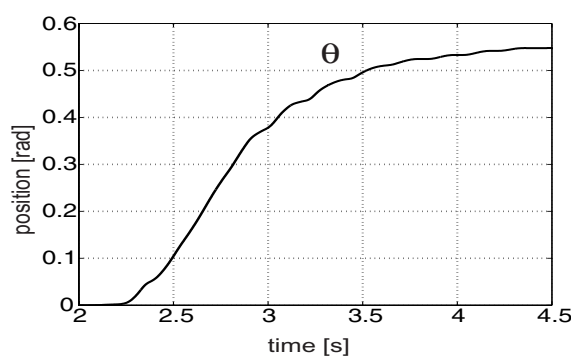
(b-1) $M = 1.0$, $D = 3.0$



(b-2) 左図の位置応答拡大図



(c-1) $M = 0.5$, $D = 6.0$



(c-2) 左図の位置応答拡大図

図 4.19: 慣性変動した際のセンサレスインピーダンス制御 (おもり 3.75kg)

このように慣性変動がより大きくなった場合は、図 4.18 ほど小さいインピーダンスパラメータでなくても外乱トルク推定値が不安定となり、同様に位置応答も不安定となる。

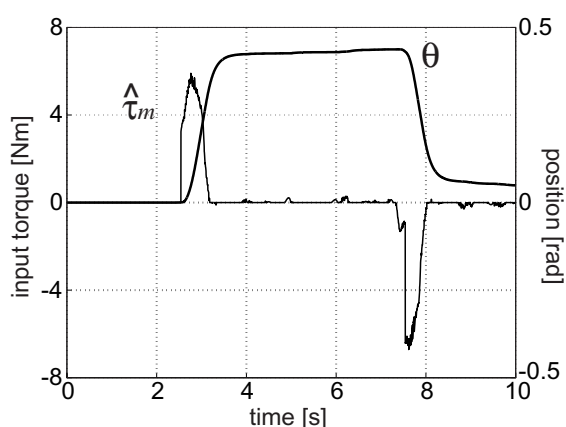
これらの実験からわかるように、 $J_n < J$ で理論上安定であっても、大きく変動した実際の慣性値を知らないまま位置制御系や外乱推定機構を設計し、操作者の入力トルクを外乱

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

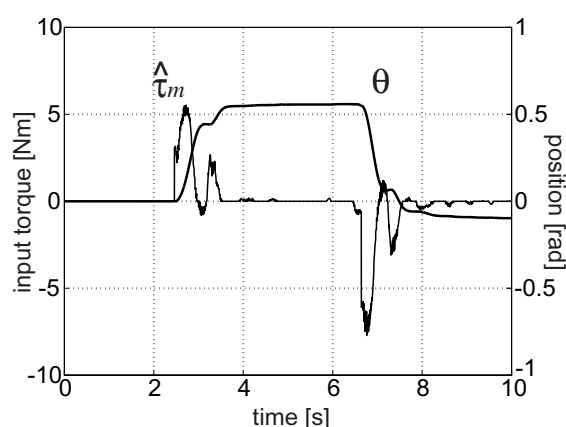
とみなして推定しインピーダンス制御を行うと、その外乱推定値は非常に振動的で不安定、言い換えると、本当の入力トルクを推定できず、その外乱推定値に基づいてインピーダンス制御を行うと、位置応答にも振動や不安定さが現れ、安定したパワーアシスト動作が実現できないことがわかる。

今度は逆に、慣性が大きくなったと想定して位置制御系と外乱推定機構を設計したときに、実はおもりがのっていなくて軽かったという場合の力センサレスインピーダンス制御の実験結果を以下に示す。この状況は $J_n > J$ であり、先ほどの理論展開からもわかるように、インピーダンスパラメータが小さいほど極が右へ移動し、不安定になることもある。

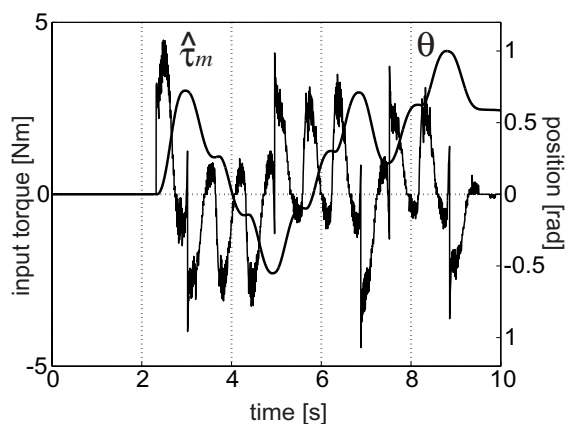
最初に、おもり 2.5kg がロボット先端にのっているものと想定し、位置制御系と外乱推定機構を $J_n = 0.44$ で設計した際に、インピーダンスパラメータを (a) $M = 1.0, D = 6.0$, (b) $M = 0.3, D = 4.0$, (c) $M = 0.2, D = 1.5$, (d) $M = 0.1, D = 3.0$ とした実験結果を図 4.20 に示す。この J_n の値は、後に述べる同定法で同定した結果を用いている。



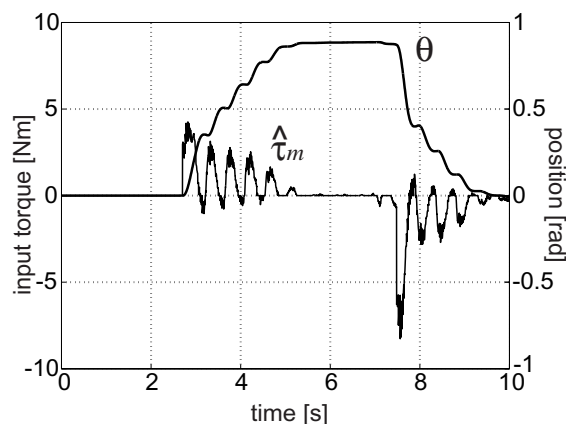
(a) $M = 1.0, D = 6.0$



(b) $M = 0.3, D = 4.0$



(c) $M = 0.2, D = 1.5$



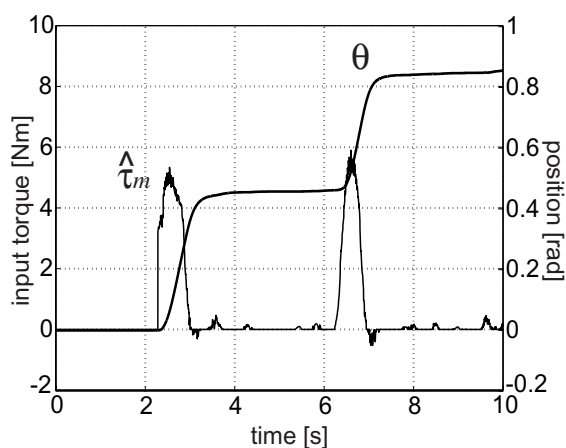
(d) $M = 0.1, D = 3.0$

図 4.20: 慣性変動した際のセンサレスインピーダンス制御 ($J_n = 0.44$)

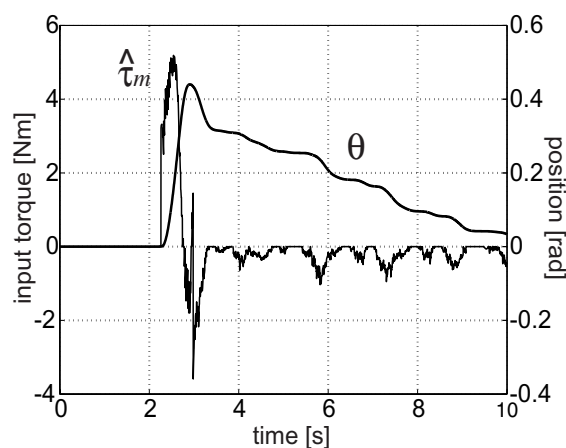
インピーダンスパラメータが小さくなるにつれ、操作者の入力トルクの推定値と、それに基づくインピーダンス制御の位置応答が不安定になることが見てとれる。

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

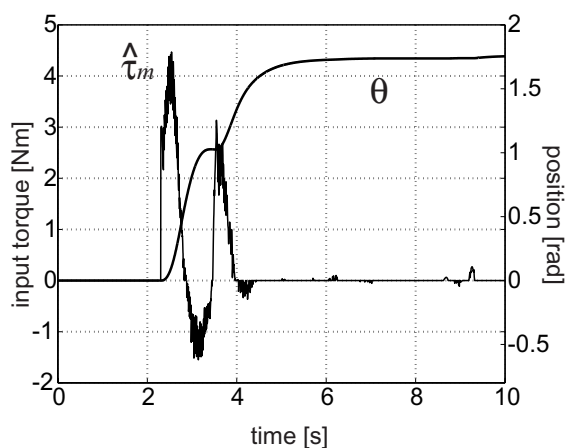
次に、おもり 3.75kg がのっているものと想定し、位置制御系と外乱推定機構を $J_n = 0.58$ で設計した際に、インピーダンスパラメータを (a) $M = 1.0, D = 6.0$, (b) $M = 0.3, D = 4.0$, (c) $M = 0.5, D = 1.0$, (d) $M = 0.3, D = 2.0$ とした実験結果を図 4.21 に示す。



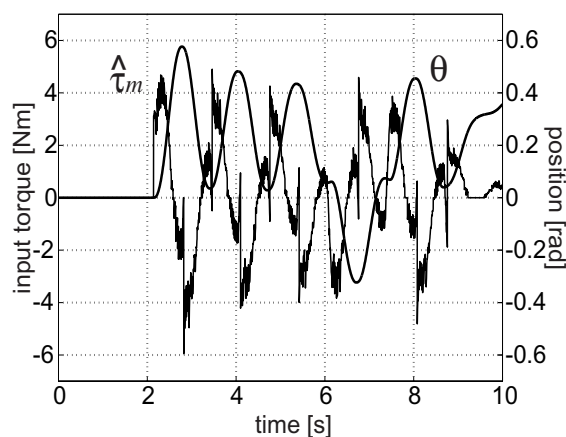
(a) $M = 1.0, D = 6.0$



(b) $M = 0.3, D = 4.0$



(c) $M = 0.5, D = 1.0$



(d) $M = 0.3, D = 2.0$

図 4.21: 慣性変動した際のセンサレスインピーダンス制御 ($J_n = 0.58$)

これらの結果から、軽いとっていて実は重かった場合 ($J_n < J$)、逆に、重いとっていて実は軽かった場合 ($J_n > J$)、いずれにしても慣性変動が大きく、しかもインピーダンスパラメータが小さいときは、外乱推定がうまくできず、その影響が位置応答にも現れ、安定したパワーアシスト動作が実現できないことがわかる。このことから、パワーアシスト動作を始める前に、環境がロボットと一体化された状態での慣性値を知る必要性が浮かんでくる。また、動作途中での慣性変動も知る必要性も同時に浮かんでくる。

ここで、力センサを用いてインピーダンス制御を行った実験の結果を図 4.22 に示す。力センサと取り付け用具を合わせた際の慣性値は約 $J = 0.44$ であるが、位置制御系にはもとの慣性値 $J_n = 0.144$ を用いてインピーダンス制御を行った。

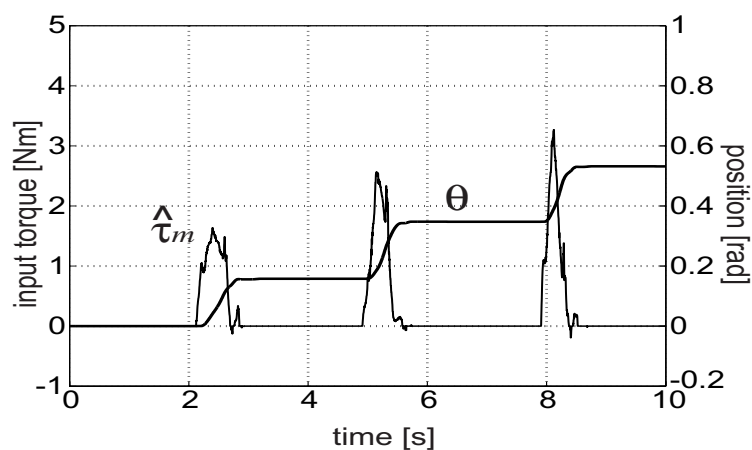


図 4.22: 力センサを用いた場合のインピーダンス制御

この結果からもわかるように、力センサを用いた場合は、慣性値の違いは位置制御系のみが存在することになり、そのずれは2自由度ロバスト制御系によりある程度打ち消され、位置応答に何の影響も現れない。ここまで述べてきた慣性変動とインピーダンスパラメータの大きさの関係、それに基づく不安定なパワーアシスト動作は、すべて力センサレスにし、外乱オブザーバで推定した操作者の入力トルクをインピーダンス制御器に通し、ポジティブフィードバックの形のループにしたために生じた問題であるということがわかる。

4.5.3 慣性モーメントの同定法

低精度エンコーダを用いるサーボモータの性能向上を目的として、電流情報を併用してエンコーダ読み込み点間の瞬時速度を推定する「瞬時速度オブザーバ」が提案されている。この瞬時速度オブザーバは開ループシミュレータで推定するため、慣性変動の影響を直接受ける。そこで、以下に示すような慣性モーメントの適応同定法が考えられている [50]。

直流機の運動方程式において、 T 周期の読み込み点で、

$$Ja[m] = K_{tn}i[m] + T_d[m] \quad (4.12)$$

が成立する。ここで、一周期前の式と辺々差し引くことにより以下の式が導かれる。

$$J(a[m] - a[m - 1]) = K_{tn}(i[m] - i[m - 1]) + (T_d[m] - T_d[m - 1]) \quad (4.13)$$

$$J\Delta a[m] = K_{tn}\Delta i[m] + \Delta T_d[m] \quad (4.14)$$

ただし、

$$\Delta a[m] = a[m - 1] - a[m - 2] \quad (4.15)$$

$$\Delta i[m] = i[m - 1] - i[m - 2] \quad (4.16)$$

$$a[m] = \frac{\omega[m] - \omega[m - 1]}{T} \quad (4.17)$$

である。

式 (4.14) において外乱の変化が T に比べて十分遅いと仮定すると、 ΔT_d は小さなランダム雑音とみなしてよい。このとき、式 (4.14) を直接用い、辺々 $\Delta a[m]$ で割れば推定できるように見える。しかし Δa には差分による大きな雑音が含まれるため、式 (4.14) を基本に据えた何らかの統計処理を行う必要があり、いくつかの手法が検討されている。

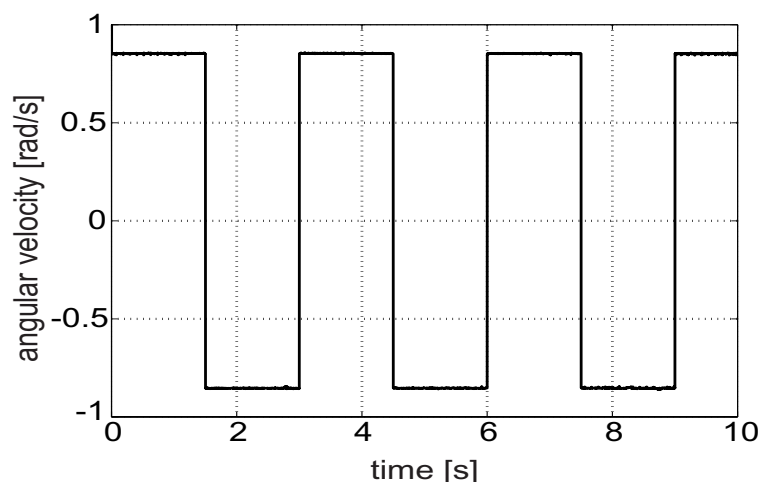
本研究では、このような慣性モーメントの適応同定の考えを利用し、環境の負荷がかかったロボットの慣性を推定して制御に利用することを考える。

ここで、粘性項 B に関する項については同定過程では外乱として扱い、 T_d に含まれるものとし、加速度の変化のみに注目することで慣性項 J を同定を行うこととするが、一方、制御器においては $\frac{1}{Js^2 + Bs}$ という粘性項を含めたノミナルモデルを利用することもありうる。また統計処理の手法については、一括形最小二乗法、逐次最小二乗法、固定トレース法を用いた検討がなされているが [50]、ここでは逐次最小二乗法を用いることとする。

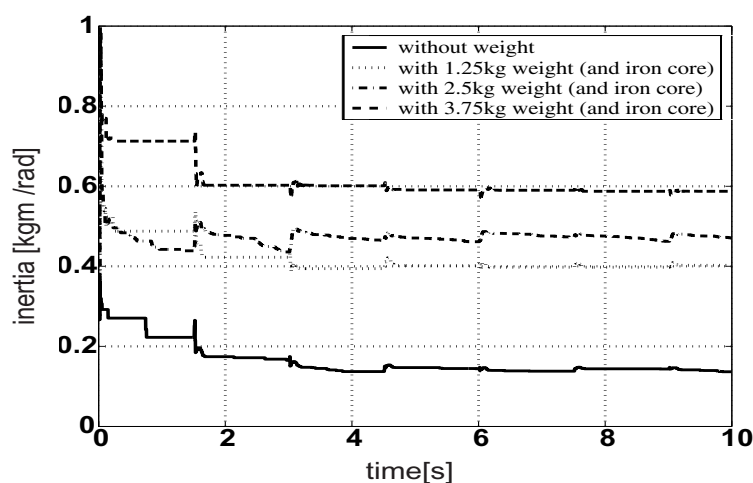
逐次最小二乗法は、新しいデータが追加されるごとに前の推定値を修正していく最小二乗法であり、 $0 < \lambda < 1$ である忘却係数による重みを付けた逐次最小二乗法を用いれば、ある程度の観測雑音の影響を取り除くことができる。

4.5.4 慣性同定に基づくパワーアシスト法

上述の同定法を用いて、おもりを載せない場合と3種類のおもり (1.25kg, 2.5kg, 3.75kg) を載せた場合それぞれに対して慣性モーメントの同定実験を行った結果を図 4.23 に示す。



(a) 目標速度



(b) 各おもりに対する慣性モーメントの同定

図 4.23: 慣性モーメントの同定実験

いずれの場合も慣性同定値がある値に収束している。おもり 1.25kg で 0.26kgm/rad 増加、おもり 2.5kg で 0.34kgm/rad 増加、おもり 3.75kg で 0.46kgm/rad 増加しており、固定するための鉄心の重量が約 1kg 強であることを考慮すると、1kg の重量で慣性値が約 0.72kgm/rad だけ変動するという計算で、ほぼ実験結果が説明できる。

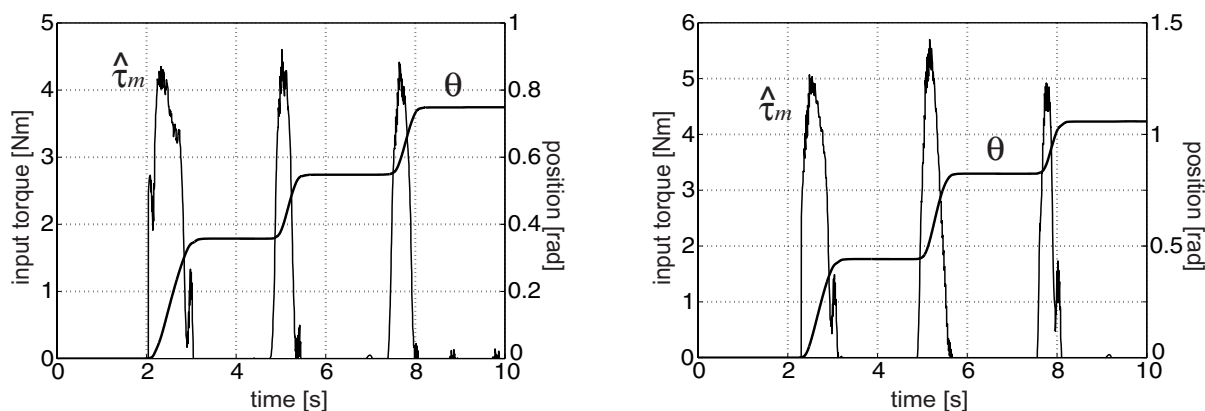
同定の計算は、大きな加速度をもつ時間、つまりこの実験では速度が反転するタイミングでのみ行ったが、同定の収束の速さについては、2、3回の速度反転を行えば十分であり、

4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

極めて簡単な慣性同定試験が実現できる。

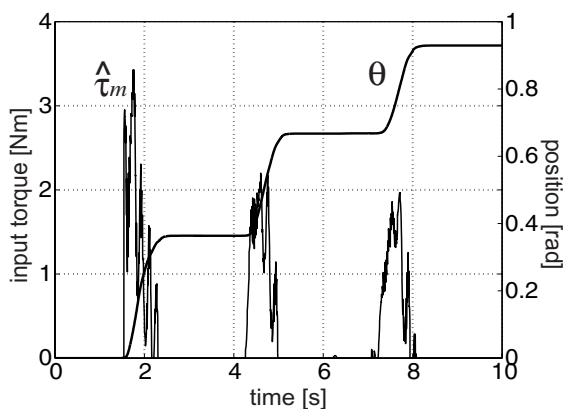
この慣性同定の結果をノミナルモデルとして用い、同様にセンサレスインピーダンス制御の実験を行う。

最初に、おもり 2.5kg を載せた場合にノミナル慣性値を $J_n = 0.44$ 、インピーダンスパラメータを (a) $M = 0.5, D = 8.0$, (b) $M = 0.3, D = 6.0$, (c) $M = 0.2, D = 4.0$ とした実験結果を図 4.24 に示す。インピーダンスの値は、図 4.18 の実験と同様である。



(a) $M = 0.5, D = 8.0$

(b) $M = 0.3, D = 6.0$



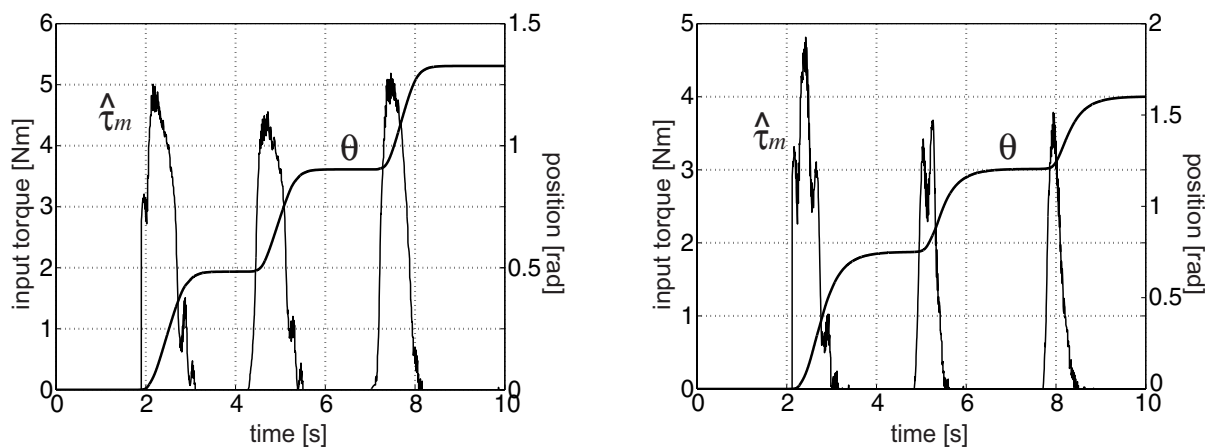
(c) $M = 0.2, D = 4.0$

図 4.24: 慣性同定に基づくセンサレスインピーダンス制御 (おもり 2.5kg)

インピーダンスの小さい (c) の場合に、操作者の入力トルク推定値に若干の不安定要素が見られるものの、おもりによる慣性変動を無視して制御系を設計した実験結果である図 4.18 と比較しても明らかなように、慣性同定値を考慮して設計すれば、ある程度小さなインピーダンスパラメータも設計できることがわかる。

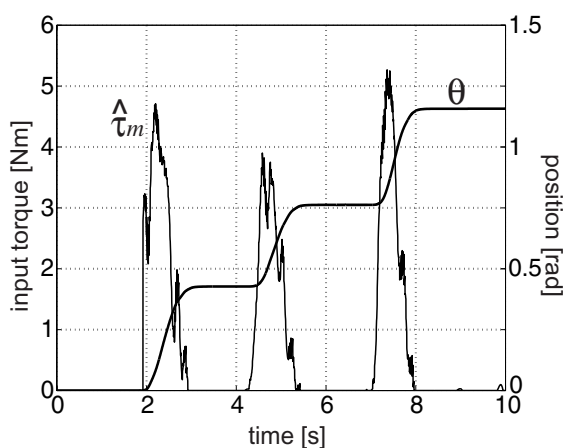
4.5 慣性変動が支配的な場面でのパワーアシスト制御法

次に、おもり 3.75kg を載せた場合に、ノミナル慣性値を $J_n = 0.56$ 、インピーダンスパラメータを (a) $M = 1.0$, $D = 7.0$, (b) $M = 1.0$, $D = 3.0$, (c) $M = 0.5$, $D = 6.0$ とした実験結果を図 4.25 に示す。インピーダンスの値は、図 4.19 の実験と同様である。



(a) $M = 1.0$, $D = 7.0$

(b) $M = 1.0$, $D = 3.0$



(c) $M = 0.5$, $D = 6.0$

図 4.25: 慣性同定に基づくセンサレスインピーダンス制御 (おもり 3.75kg)

おもり 2.5kg による先ほどの実験結果と同様、慣性同定値を考慮して設計した場合には、小さいインピーダンスパラメータであっても操作者の入力トルクの推定値も安定しており、安定したパワーアシスト動作を実現することができる。

4.6 まとめと今後の課題

4.6.1 本章のまとめ

本章では、三つに分類したパワーアシスト形態のうち、ロボットと環境が一体化されたことによる慣性変動の項が支配的になる形態において、操作者が感じる操作性や使いやすさの向上を目指した議論を行った。可変インピーダンスを用いた制御法により、操作者にとって軽く、しかも位置決め動作もしやすいパワーアシスト動作を実現した。さらに、慣性変動とそのインピーダンスパラメータには安定性において深く関連があることを根軌跡などを用いて示し、インピーダンス制御器設計における指針を明らかにした。また、変動した慣性値を逐次最小二乗法によって同定し、その結果に基づいて制御計を設計し直すことで、小さいインピーダンスも設定可能となることも示した。

インピーダンスを可変にした効果は、操作者は立ち上がり時にのみ力を必要とするだけで、全体的に楽な動作ができることや、位置決め動作も容易になることである。この結果として、図 4.26 のように、可変インピーダンスを用いた制御法は操作者から見て、ある程度機械まかせであると言える。逆に一定のインピーダンスを用いる制御法は、可変インピーダンスよりもやや人間主体の手法である。ロボット制御の面から操作性向上を目指すことは、機械側から人間側にいくらか歩み寄ることであるということもできる。

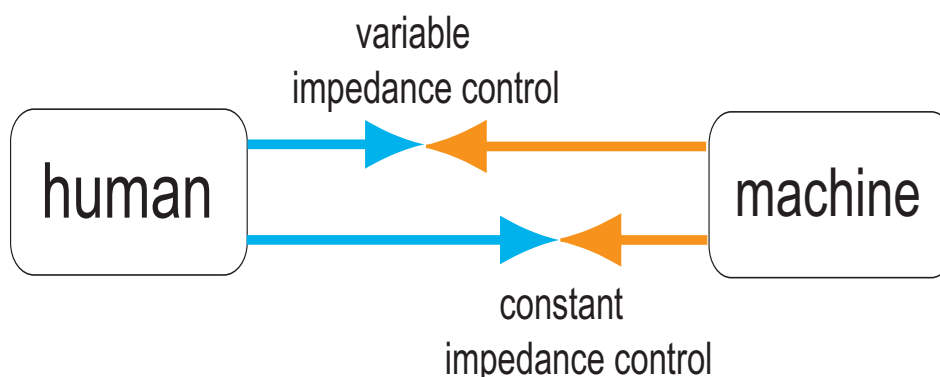


図 4.26: 人間と機械の関係

前章の結論においても述べたが、このように機械側から歩み寄るべきか、人間に大いに調整能力を発揮させるべきかは、操作者の意向やパワーアシスト動作の場面、状況に依存してくると考えられる。操作者の意向については、男女の性別にもよる。特に男性で多いと思われるが、機械に抵抗もなく慣れ親しんでいるような人は、ある程度自分自身が主体的に動作し、調整能力を発揮しようという意欲があるだろうが、一方、あまり機械に慣れてなく抵抗感をもつ人は、少し触ればあとは機械が勝手にやってくれたほうが良いと考えるであろう。このように前章、本章を合わせて本研究では、操作者の意向に合わせたさ

さまざまなパワーアシスト制御法を生み出し、設計の一つの指針を示したことが、この3章にわたって述べた研究の成果である。

ここで示した図のような人間と機械の関係性は、パワーアシストロボットの設計指針としてだけでなく、人間とロボットの共存という大きな課題に対しても意義ある概念であると考えている。

4.6.2 今後の課題と可能性

変動した慣性値を逐次最小二乗法により同定する手法を用いたが、本研究ではアシスト動作を開始する前にその同定を行った。しかし実際にはアシスト動作途中にも変動することは多いにありうることであり、いかにリアルタイムに推定し、パワーアシスト制御系に生かしていくかという問題については今後検討したい。これはパワーアシスト制御にとどまらず、一般のサーボ系設計においても重要な要素である。

前章で述べた今後の課題と同様であるが、本研究はパワーアシスト制御の原理を見出したものであり、今後具体的な機器、特に高齢者支援を目的とした動作支援について実験的検討を行いたい。

最初に三つのパワーアシスト形態に分類したが、三つ目の重力項が支配的な場合のパワーアシスト制御法については今後の課題となる。本研究のアプローチのように、操作者が加える力をセンサレスで推定し、またインピーダンス制御を用いてアシスト動作を実現することが可能である。しかしここで問題となるのが、外乱オブザーバから出力される外力には、操作者の加える力だけでなく、環境とロボットを合わせた重力項が含まれている。ロボットの重力成分はその姿勢によっても異なり、環境の重力成分にいたっては、ほとんど正確に知りうることはできない。それら未知の成分はロボット制御によって打ち消すことになるが、外乱オブザーバの出力値の中で、本当に知りたい操作者の入力値といかに分離し、情報を取り出すことができるかが課題となる。

これが実現できれば、例えばおむつ交換ロボットのように重力項が支配的な場面でのパワーアシスト動作に適用が可能となる。その他にも高齢者支援を目的とする場合、抱き上げ動作など重力成分が支配的になる場面は多い。本研究の成果を、より実用に近い形の機器へ応用し、有効性を確認していきたい。

第5章 電動パワーアシスト車椅子の現状 と多側面からの解析

5.1 パワーアシスト車椅子の現状と背景

5.1.1 パワーアシスト車椅子の登場と期待

おそらく最も広く普及している福祉機器は車椅子である。

世界で最初の手動車椅子と考えられるものが紀元前の中国の遺跡の石棺に見られるそうであるが、現在のようなスチール製パイプ材を用いたものは1932年ごろから製作され始めた。電動車椅子については、手動車椅子に改良を加えて、DCモータと減速機を付けスイッチ操作を行うようなものが1940年代に発売されているが、その後マイコンの出現により、複雑な制御も行われるようになってきた [51]。

手動車椅子を利用しているユーザや介助者からは、手動車椅子の携帯性と電動車椅子の軽快な操作性の両面を折衷した車椅子が望まれるようになり、補助動力ユニットが徐々に開発・商品化されてきた [52][53]。最初は、補助駆動輪を付加する方式などもあったが、車椅子搭乗者や介助者の駆動力や移動速度などを考慮しておらず、多くの問題があった。これをふまえて、人間の駆動力を検知し、補助動力を協調させて作動させるという新しい概念に基づくパワーアシスト車椅子が登場した。

パワーアシストを取り入れた車椅子としては、自走型および介助型が存在する。人間と機械が協調して車椅子を駆動するという比較的新しく、単純ではない問題に対し、学術レベルでいくつかアプローチがある。本研究では、自走型電動パワーアシスト車椅子の制御に焦点をあてることにする。

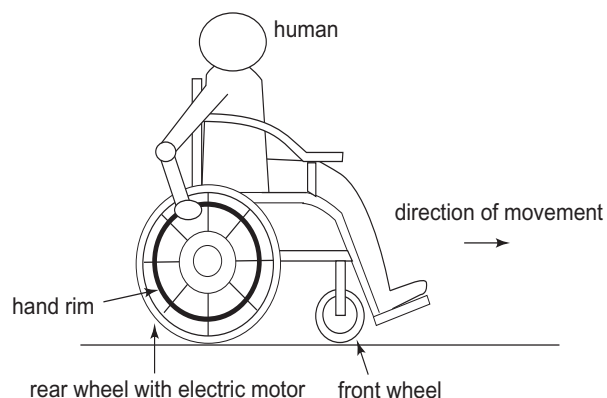
5.1.2 パワーアシスト車椅子の基本的なアシスト手法

パワーアシスト車椅子として最もよく知られている、1996年にヤマハ発動機社から発売された JWII [54] を中心に、パワーアシスト車椅子の基本的な制御手法について紹介する。図 5.1 は JWII の外観とその構成を示したものである。

5.1 パワーアシスト車椅子の現状と背景



(a) JWII の外観

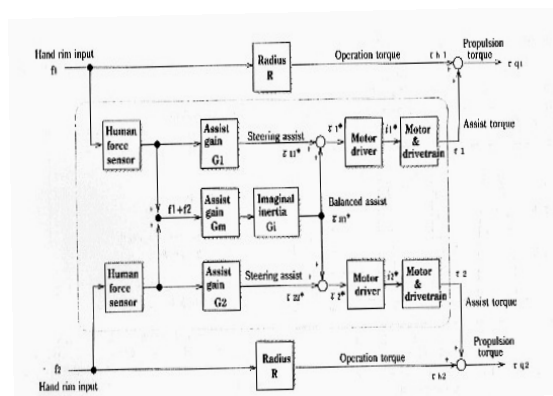


(b) パワーアシスト車椅子の構成図

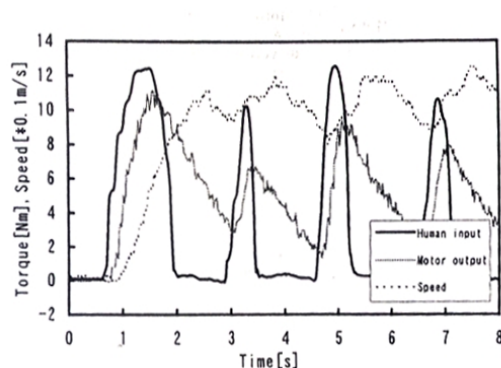
図 5.1: パワーアシスト車椅子の構成

最初に、ハンドリムを通して人間が加えるトルクを検出するトルクセンサが必要になる。JWII ではバネとポテンショメータを用いたセンサを用いているが、この他に歪みゲージなども利用できる。トルク信号とともに、速度センサの情報も取り込まれ、マイコンで処理しパワーアシスト量を決定する。そして算出したアシスト量となるように駆動用モータを制御している。パワーアシスト量の決定については、最高速度 6km/h までは一定の比で操作力をモータで補い、それ以上の速度ではパワーアシストを行わない。また駆動力が小さい領域ではアシストがはたらかないようにアシストの作動する閾値が設定されている。

ここで、ハンドリム駆動は手を持ち替える必要があるため、人間の駆動力は間欠的となる。JWII では駆動用モータと駆動輪の間でピニオンギアを介して常時接続しているため、駆動系の摩擦等が妨げとなって操作の自然さが損なわれる。そこで、慣性走行を制御的に模擬し、人力解放後も入力トルクを維持し時間的に減衰するようにしている。([55] も同様である。) さらに、左右の駆動輪を用いて走行するため、直進性を確保する必要があるが、図 5.2 にも示すように、お互いが相手輪への出力成分を有して直進性を高めている。



(a) アシスト制御の構成図



(b) 人間の入力トルクとモータ出力、速度

図 5.2: JWII のアシスト制御 ([54] より引用)

新しいバージョンの車椅子では、補助動力モータを回生ブレーキとして利用して下りスロープでの暴走を防いでいるものもある。操作者がハンドリムからうっかり手を離している間に、操作者の力では制動できなくなることがあるが、これを防ぐための一手法となる。

5.1.3 パワーアシスト車椅子に要求されるもの

パワーアシストロボットの場合と同様、パワーアシスト車椅子制御系にも< 操作者・機器・環境 >の三者が登場する。「操作者」となるのは、高齢者や障害者だけでなく、ちょっとした事故のため回復するまで一時的に使用するという人も含まれる。「機器」は当然ながらパワーアシスト車椅子本体である。「環境」は、パワーアシストロボットの場合と少し異なり、傾斜角度や摩擦などの路面状況やその他の障害物などを含む、まさに走行環境である。

パワーアシスト車椅子を考える上で、実際に使用する場面を考慮して、どのようなことが要求されるかを以下にまとめる。これは、前述のパワーアシストロボットの制御において述べたことと共通する部分もある。

< 第一要求事項 > : 力の増幅、動作の補助

これはパワーアシストそのものの実現である。操作者の入力したトルクを増幅して車椅子を駆動できることが最も基本となる。さらにこれを、どのような路面、環境であってもそのアシスト効果がある程度保たれることが望まれる。

< 第二要求事項 > : 安全性、安心感、操作性、使いやすさ

例えば、大きな加速度があっても後方に転倒しないようにするなど、安全性、安定性はもちろん要求される。また、操作者の感じる操作性や乗り心地、さらに左右独立のモータ駆動であっても直進を保つような機能も当然要求される。そしてパワーアシスト車椅子の大きな特徴として、操作者の入力トルクが間欠的であるため、手を離れた後もある程度惰性で走り続ける必要があるという問題がある。これをアシスト制御アルゴリズムの中でいかに実現するかは重要な問題である。

< 第三要求事項 > : 操作者に環境の情報を感じさせること

この項目もパワーアシストロボットの要求事項と関連している。第一次的要求では、どのような環境でもアシスト効果を保つことが必要であると定義したが、坂道や多少走りにくい路面で、完全に平坦地と同じように感じるのではなく、ある程度はその走りにくさや路面の変動が操作者に伝わるようなアシスト制御が実現されるべきであると考えられる。

< 第四要求事項 > : 幅広く対応できること

パワーアシストロボットと同様の事項であるが、パワーアシスト車椅子の場合も、操作者もさまざまな上、あらゆる走行場面、路面状況が存在する。多くのパラメータ、要素を自由に随時設定できる、つまり多くの自由度をもつような手法を考えていくことも要求されるであろう。

5.2 パワーアシスト車椅子に関わるさまざまな問題点

筋力のおちた高齢者・障害者でも利用でき、行動範囲を広げるものとして期待は大きい。しかし、現在市販されているパワーアシスト車椅子についてはさまざまな問題点が存在する [56]。以下にその問題点をいくつか紹介する。

<坂や不整地がしんどい>

例えばヤマハ製パワーアシスト車椅子 JWII では、駆動力が閾値を越えるとアシストが作動し、その人力と補助動力の比 (アシスト比) が一定となるようにしている。この場合、上り坂や不整地の走行時に付加が 2 倍になれば、人力の負担も単純に 2 倍になる。パワーアシスト機能がない場合に比べると確かに楽ではあるが、特に中高齢者にとっては大きな負担となるはずである。



(a) 平坦地



(b) 上り坂



(c) 石のガタガタ道



(d) 砂利道

図 5.3: 走行試験に用いた道

5.2 パワーアシスト車椅子に関わるさまざまな問題点

図 5.4 は、実際に購入した JWII を使って大学構内 (本郷キャンパス) のいろいろな道で走行実験を行った結果を示す。A, B 2 人の被験者について、毎回ほぼ同じぐらいのトルク入力を 1 回のみ行い、その走行距離を計測し、平均をとって示した。平坦なアスファルトでは進みすぎるほどであるが、石のガタガタ道、砂利道では走行距離が落ち、上り坂ではさらに顕著である。

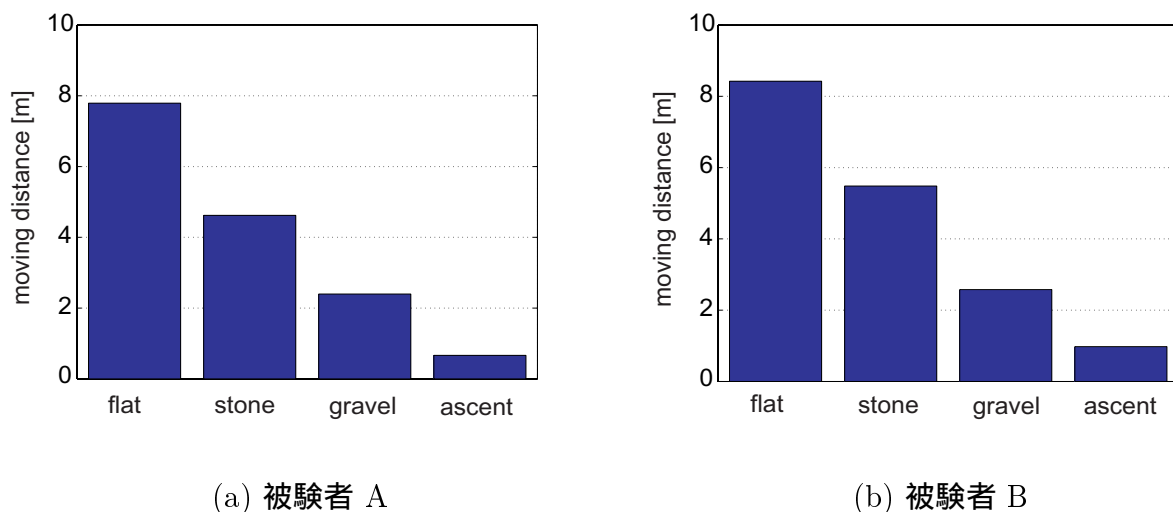


図 5.4: さまざまな路面による走行距離の比較

この問題は、アシスト量の決定アルゴリズムにかかるところであり、新たな手法が求められる。

また、この走行実験において、特に上り坂で加速を行う際には後方へ転倒しそうになるという場面が多く存在した。転倒に至らなくても、操作者に対して恐怖感等の精神的影響を与えるため、できるだけ前輪が浮かないようなアシスト制御アルゴリズムが必要となる。図 5.5 は、街角で見つけた坂の写真である。健常者が普通に歩いて上るのでも大変であるような急激な坂が至るところに存在していると感じる。



(a)



(b)

図 5.5: 街中の坂

< アシスト on/off の閾値 >

アシストのアルゴリズムとして、人力がある固定された閾値を越えるとアシストを作動させる手法が使われている。この閾値がもし小さすぎると振動の要因になり、また大きすぎるとなかなかアシストが作動せず、手動よりも逆に重い操作感覚になってしまう。使用者に応じて、あるいは上述のような路面変化に応じて閾値を柔軟に変動させるような仕組みが必要となるかもしれない。

< 特に上り坂で後方転倒が起きやすい >

特に上り坂において、人間が急激なトルク入力をした場合、つまり大きな加速度で発進した場合には、後方へのけぞり転倒してしまう危険性が大きい。実際に上り坂で走行実験をした際にその危険性を感じた。さらにそれは平坦地であっても起こりうる事が確認された。

< 段差を越えられない >

車椅子で移動する際、進行方向に段差があると、前輪を持ち上げてウィリー走行を行い前輪を段差の上に載せなければならない。しかし、パワーアシスト車椅子ではモータの補助動力の値を人間が調整することが難しく、前輪を浮かせた際に勢い余って後方に転倒しかねない。車椅子の後方に転倒防止バーが取り付けられているが、見た目も悪く、ウィリー時にはバーが地面についてしまうためウィリーできない。そこで、前輪を浮かせた状態を2,3秒程度の短い時間保てるような、何らかの姿勢制御が必要となるはずである。

< 直進性 >

左右のハンドリムにたとえ同じトルクを人間が与えたとしても、路面の状況や路面上の石や小枝などのため左右に曲がってしまう。これは実際に走行実験を行った際に感じたことである。

< バッテリと重量 >

手動車椅子をベースとしているため、重量の大きなバッテリーを搭載することは難しい。現在では単位重量あたりのエネルギー容量が大きなニッケル水素電池が使用されている。電気自動車用バッテリーの進展がめざましく、転用が期待される。

以上のように、手動車椅子や電動車椅子とは違ったさまざまな問題点が存在し、アシストアルゴリズムを含めてさらに高機能化をはかるための深い議論が必要であることがわかる。

5.3 パワーアシスト車椅子の数学的運動モデル

車椅子の運動モデルとして、Cooperによるモデル式[57]がよく知られている。これは特に、レース用の手動車椅子に対して数学的にモデル化のアプローチが行われたものである。ここでは、左右輪を合わせて一对の前後輪をベースとしてモデル化する。

$$f = M \frac{dV}{dt} + \left(\frac{I_f}{r} + \frac{I_r}{R} \right) \frac{dV}{dt} + kV + F_R + Mg \sin \theta + F_a \quad (5.1)$$

5.3 パワーアシスト車椅子の数学的運動モデル

$$F_f = \frac{W_f b_f}{r} \cos \theta \quad (5.2)$$

$$F_r = \frac{W_r b_r}{R} \cos \theta \quad (5.3)$$

$$F_a = CV^2 \quad (5.4)$$

f は操作者がプッシュリムに加える力、 r は前輪半径、 R は後輪半径、 M は操作者と車椅子全体の質量、 I_f , I_r はそれぞれ前輪と後輪の車輪慣性、 k は軸粘性減衰係数、 V は移動速度、 F_a は空気抵抗、 F_f , F_r は前後輪における転がり抵抗、 W_f , W_r はそれぞれ前後輪における重量、 b_f , b_r はそれぞれ前後輪における転がり抵抗係数、 θ は地面の傾斜角 (上り坂を正とする)、 C は空気抵抗係数を表す。これらの力学系を図示すると、図 5.6 のようになる。

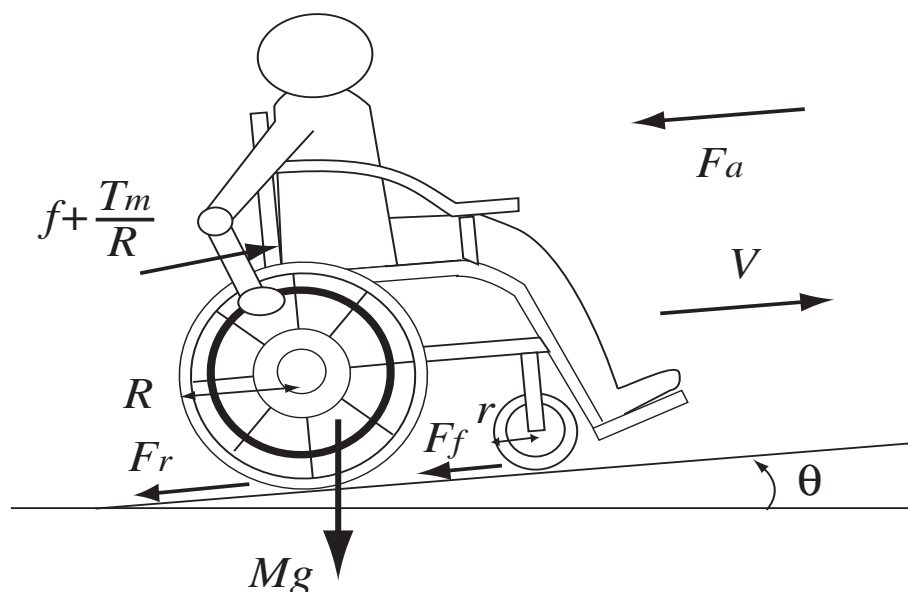


図 5.6: 車椅子の力学系

これをもとに、パワーアシスト車椅子の運動モデルを数学的に記述する。車輪慣性 I_f , I_r はその等価慣性質量が車椅子全体の質量に比べて十分小さく無視できるとする。また、レース用車椅子に比べて最大速度は小さいため、空気抵抗 F_a も無視できる。転がり抵抗 F_f , F_r については、転がり抵抗係数を抗力に対する係数でまとめることができる。

パワーアシスト車椅子の運動モデルは、モータの補助トルク T_m の項を左辺につけ加えて、

$$f + \frac{T_m}{R} = M \frac{dV}{dt} + kV + \mu Mg \cos \theta + Mg \sin \theta \quad (5.5)$$

と表すことができる。 μ は転がり抵抗係数、 g は重力加速度である。

また、パワーアシスト車椅子の一輪モデルは図 5.7 のようになり、タイヤ半径 r 、駆動輪回転速度 ω 、車椅子速度 V 、駆動力 F_d 、モータトルク T_m 、垂直荷重力 N を用いて式 (5.7)(5.8) のように表すことができる。

$$F_m = \frac{T_m}{R} \quad (5.6)$$

$$M_{\omega} \frac{dV_{\omega}}{dt} = F_m - F_d \quad (5.7)$$

$$M \frac{dV}{dt} = F_d \quad (5.8)$$

で与えられる。ただし車輪の運動は、

$$M_{\omega} = \frac{J_{\omega}}{r^2}, \quad F_m = \frac{F_m}{r}, \quad V_{\omega} = r\omega \quad (5.9)$$

により次元を変えている。 J_{ω} は車輪における回転慣性である。

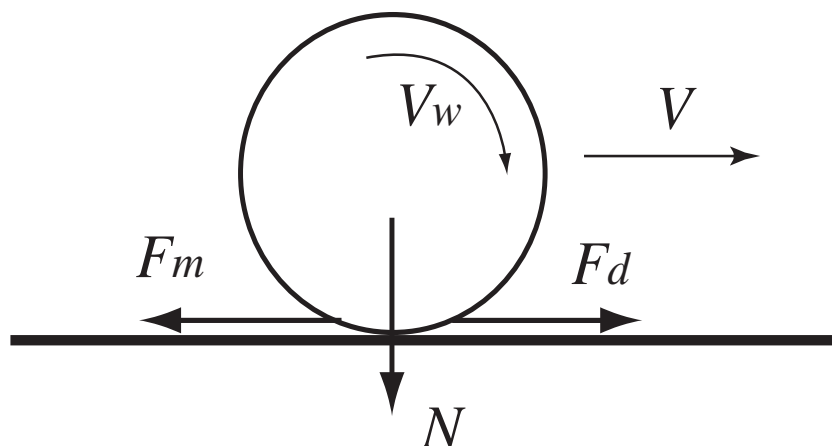


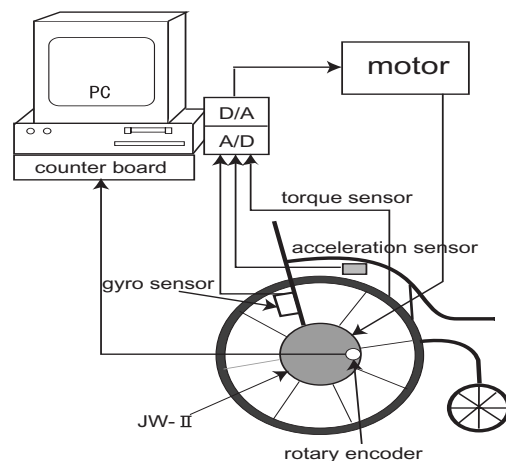
図 5.7: 車椅子の一輪モデル

5.4 実験用パワーアシスト車椅子の製作

電動パワーアシスト車椅子の多機能制御法について、実験的検討を行うために、ヤマハ製 JWII を改造する形で実験用車椅子を製作した。その実機と構成について図 5.8(a)(b) に示す。



(a) 製作した実験機の写真



(b) 実験機の構成

図 5.8: 実験用パワーアシスト車椅子

モータドライブに関しては、既存の基板の一部を利用し、計算機からの制御信号を PWM 信号に変換したものを基板上に与える形とした。既存のトルクセンサの他に、車輪の回転角度を測定するロータリエンコーダ、水平方向から前輪が何度浮き上がったかを測定するジャイロセンサ、前後方向の速度を測定する加速度センサなど、各センサを新たに取り付け、それぞれカウンタボードや A/D 変換ボードにより計算機に取り込み制御を行う。計算機には OS として ART-Linux を搭載し、計測・制御に欠かせないリアルタイム性を保証する。本研究における実験では、制御周期を 1[ms] としている。これらの装置の詳細については付録に記す。

第6章 電動パワーアシスト車椅子の新しいアシスト制御法の検討

電動パワーアシスト車椅子の走行を考える上で、その基本となるアシスト制御手法を本章で検討する。第3章で述べたパワーアシストロボットの制御法における考え方のような、位置、速度、力などのどの情報に基づいて制御を行うかという視点における考察も加えていく。ただし、本章での式や図においては、回転方向の次元、つまりトルクや車輪角度を用いて表現している。

6.1 パワーアシスト車椅子の基本構成とアシスト制御法の分類

パワーアシスト車椅子にかかわる情報は、操作者の入力トルク τ_h とモータのアシストトルク τ_m 、外乱トルク τ_d 、車椅子の位置・速度である。パワーアシスト車椅子制御系の基本構成を図6.1に示す。操作者の入力トルクとモータのアシストトルクの合計が車椅子を駆動し、走行状況によって変わる外乱トルクも存在する。

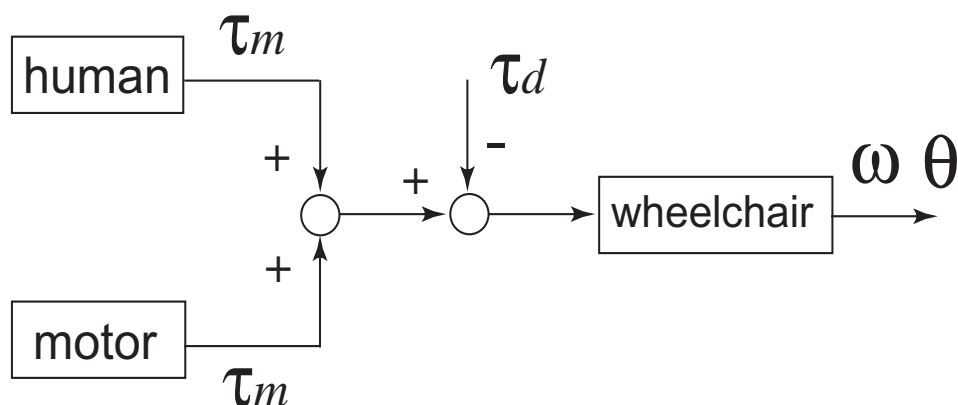


図 6.1: パワーアシスト車椅子制御系の基本構成

ここでの外乱トルクとは、タイヤと路面の間にはたらく駆動力、路面の傾斜によって車椅子に及ぼされる力、空気抵抗などである。

パワーアシスト車椅子のアシスト制御を考える上で、用いることのできる情報は、操作者の入力トルクと車椅子の位置・速度のみである。このことから明らかであるが、パワーアシスト車椅子のアシスト制御法として、パワーアシストロボットの制御と同様、位置や速度の規範値を生成する、つまり位置や速度制御をベースとしたパワーアシスト法と、力やトルクの規範値を生成する、つまり力制御をベースとしたパワーアシスト法が考えられる。さらに本章の最後では、操作者の入力トルクから見た車椅子の慣性の大きさを制御するという考え方を提案し、慣性制御に基づくアシスト手法も検討している。

垣本ら [58] は、介助型パワーアシスト車椅子の制御法として質量と粘性係数によるモデルを用いたモデル規範制御を行う上で、速度の規範値を生成しており、速度制御ベース型パワーアシスト法に分類できる。

6.2 トルク制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法

6.2.1 トルク制御ベース型アシスト手法の定義

操作者の入力トルク τ_h の情報から、何らかのトルクの規範値 τ_r を生成するアシスト手法をトルク制御ベース型パワーアシスト法と名付ける。 τ_r は車椅子に補助してほしいトルクの値である。入力トルク τ_h から規範値 τ_r を生成する機構には、何倍増幅したいかというアシスト比 α が含まれることは当然であるが、後に述べるような慣性走行を生み出すためにはたつきもこの中に必要である。トルク制御ベース型パワーアシスト法の構成を図 6.2 に示す。

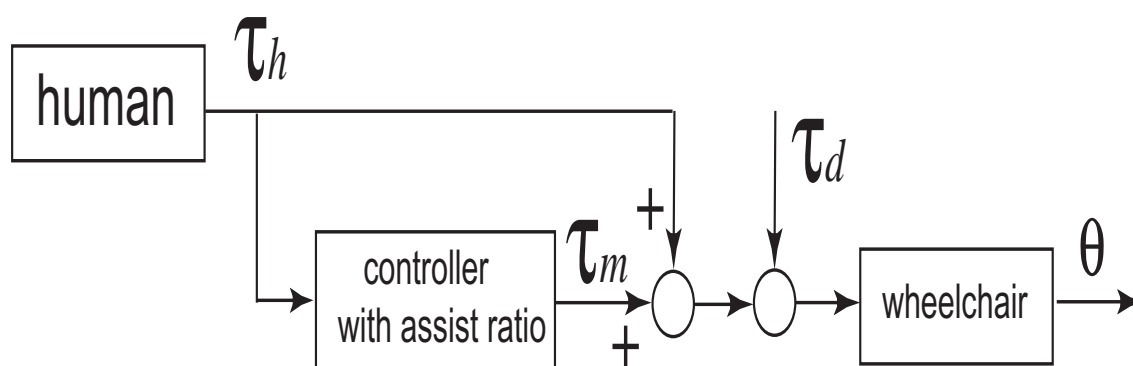


図 6.2: トルク制御ベース型パワーアシスト法の構成

6.2.2 惰性走行を考慮したトルク制御ベース型パワーアシスト法

アシスト制御系では最初に、操作者の入力したトルク τ_h を α 倍だけ増幅することになる。しかし、単にアシスト比 α によって増幅するだけでは、操作者がハンドリムから手を離してしまうと、まもなく車輪は停止してしまう。操作者が手を離れたあとも引き続きアシストトルク τ_m を出し続け、惰性走行を生み出す機構を制御系にもうける必要がある。

そこで、操作者入力トルク τ_h に一次遅れのフィルタを通し、その時定数を τ_h の挙動によって変化させる方法を検討する。操作者がハンドリムを握り入力トルクが増加している間は、フィルタの時定数を小さくし、ほぼ遅れることなく操作者のトルクを α 倍増幅し、ハンドリムを離しかけて入力トルクが減少していく際に、時定数を大きくし、惰性走行のためのアシストトルクを疑似的に生み出すこととする。

このアシスト制御の考え方を数式に表すと、式 (6.1) のように、操作者の入力トルク τ_h の微分値の符号によって、ローパスフィルタの時定数を切り替えていくことになる。

$$\begin{cases} C_a = \frac{\alpha}{\tau_1 s + 1} & \frac{d\tau_h}{dt} \geq 0 \\ C_a = \frac{\alpha}{\tau_2 s + 1} & \frac{d\tau_h}{dt} < 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

この可変時定数をもつトルク制御ベース型アシスト手法の制御系構成を図 6.3 に示す。

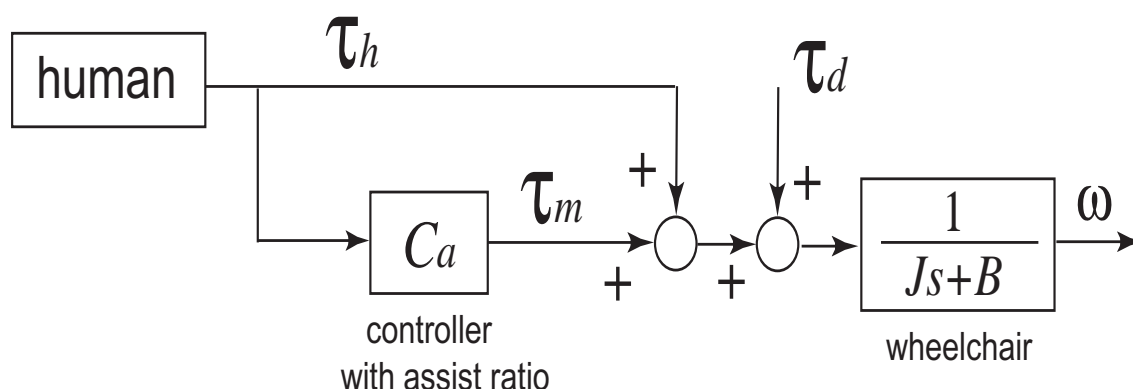


図 6.3: トルク制御ベース型パワーアシスト法の制御系

ここでは、フィードフォワード的なトルク制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御手法を示したが、パワーアシストロボットの制御における力制御ベース型手法のように、環境との作用力をフィードバックし、力の規範値と比較し誤差を見るということは行っていない。パワーアシスト車椅子の場合は、路面との間にはたらく駆動トルクなどの情報を見ることも考えられるが、これを制御系に返していかに用いるかなどの議論は今後の課題とする。

6.2.3 実機を用いた走行実験

上述のトルク制御をベースとしたアシスト制御法で、実機を用いてアシスト実験を行った結果を以下に示す。走行を行った路面は、室内のじゅうたんの上である。最初に、アシスト比を $\alpha = 2.0$ 、時定数を $\tau_1 = 0.08[s]$, $\tau_2 = 0.5[s]$ として行った走行実験の結果を図 6.4 に示す。

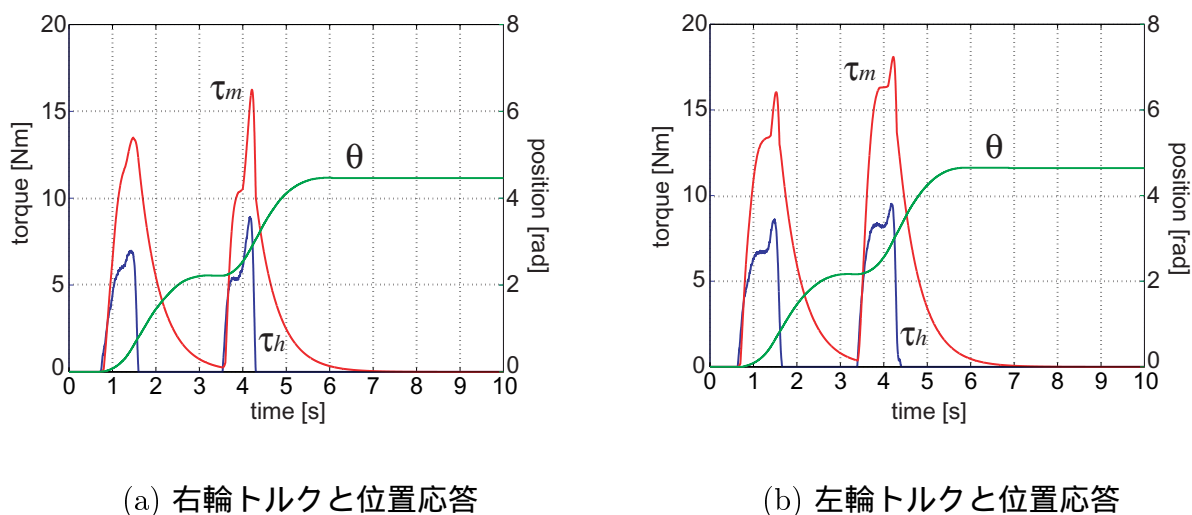


図 6.4: トルク制御に基づくアシスト制御法の実験結果

次に、アシスト比を $\alpha = 3.0$ 、時定数を $\tau_1 = 0.08[s]$, $\tau_2 = 0.5[s]$ として行った走行実験の結果を図 6.5 に示す。

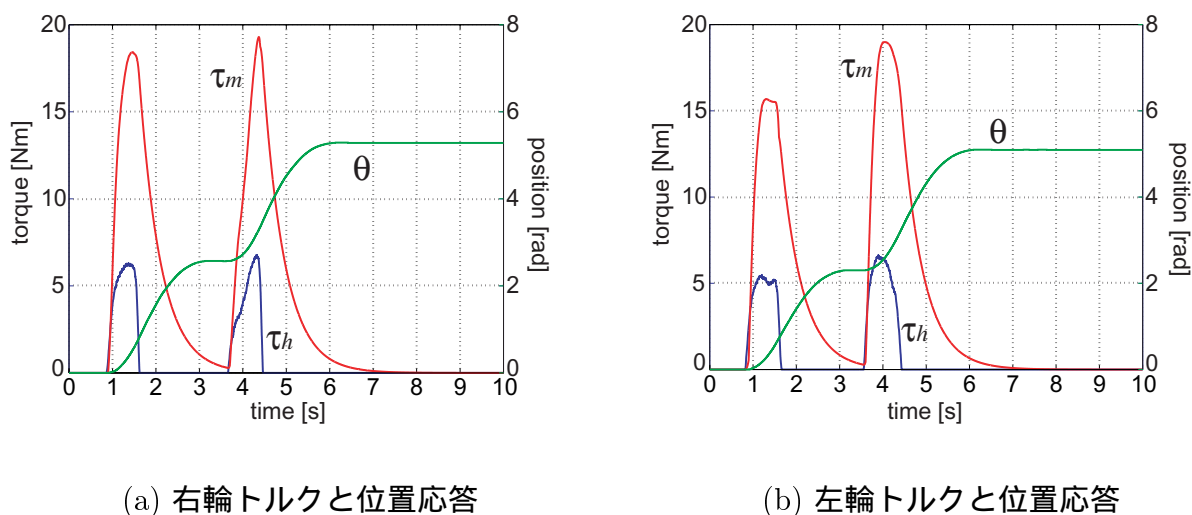
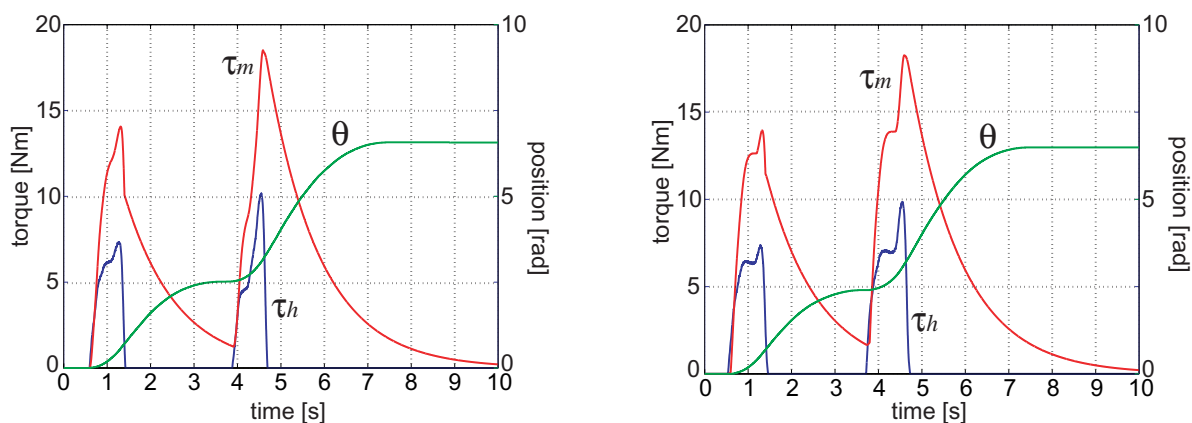


図 6.5: トルク制御に基づくアシスト制御法の実験結果

ともに安定に走行できていることはわかるが、結果を見て明らかのように、惰性を生み出すための時定数 τ_2 があまり大きくないため、操作者が手を離してからアシストトルクが減衰するのが速い。そのため、走行距離もあまり伸びていない。

6.2 トルク制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法

そこで、惰性を生み出す時定数 τ_2 をいくらか大きくした場合の実験結果を以下に示す。最初に、アシスト比を $\alpha = 2.0$ 、時定数を $\tau_1 = 0.08[s]$ 、 $\tau_2 = 1.2[s]$ として行った走行実験の結果を図 6.6 に示す。

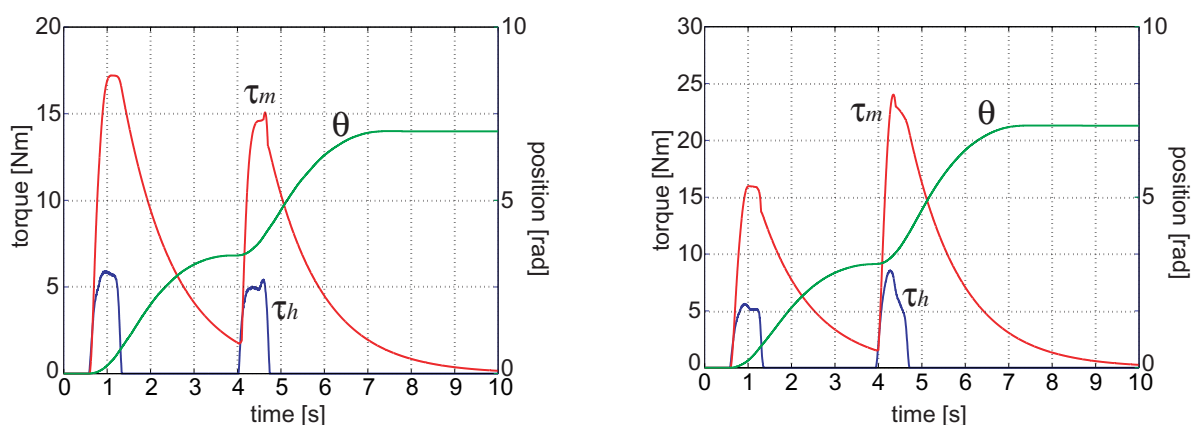


(a) 右輪トルクと位置応答

(b) 左輪トルクと位置応答

図 6.6: トルク制御に基づくアシスト制御法の実験結果

次に、アシスト比を $\alpha = 3.0$ 、時定数を $\tau_1 = 0.08[s]$ 、 $\tau_2 = 1.2[s]$ として行った走行実験の結果を図 6.7 に示す。



(a) 右輪トルクと位置応答

(b) 左輪トルクと位置応答

図 6.7: トルク制御に基づくアシスト制御法の実験結果

惰性を生み出す時定数 τ_1 を大きくしたため、操作者が手を離れたあとも長い時間アシストトルクがはたらき、走行距離も伸びていることがわかる。アシスト比が大きいほど走行距離が伸びることは言うまでもない。

しかし、このフィードフォワード的なトルク制御ベース型アシスト手法では、坂道や走りにくい路面ではその走行負荷がそのまま操作者に要求されることになり、楽な走行ができなくなる。そのような走りにくさを操作者に感じさせるべきであるため、完全にその走行負荷を打ち消す必要はないだろうが、この手法ではアシスト比を状況に応じて可変にし、坂道では多少上げるなどの工夫が必要かもしれない。また、図6.8のような外乱オブザーバの適用とパラメータ Q の設計により、全てではないにしろいくらかの負荷を打ち消して少し楽な走行を実現することも可能であろう。

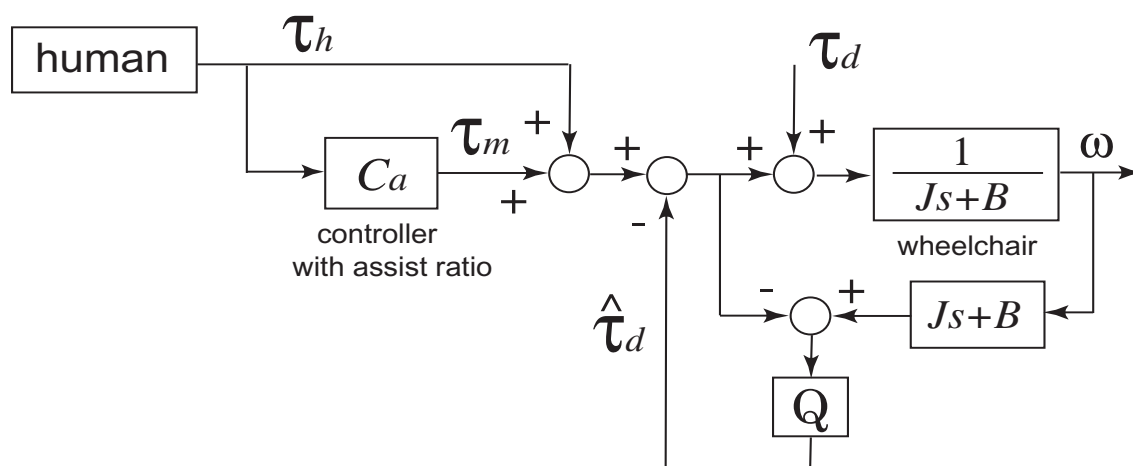


図 6.8: 外乱オブザーバを適用したパワーアシスト法の構成

また、このような制御系において、左右輪が直進性を保って走行するための左右輪間の情報交換やバランス制御はまだ行っていない。言い換えれば、直進性についてはすべて人間の調整能力に委ねた状態である。直進性をいかに保つかや、カーブする動作をいかに容易にできるかの議論については今後の課題としたい。

6.3 位置制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法

本節では、位置や速度の制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法について、その定義と実機による実験的検討について述べる。

6.3.1 位置・速度制御ベース型アシスト手法の定義

前節のトルク制御ベース型アシスト手法は、あるアシスト比 α を設定して、操作者の入力トルク τ_h を α だけ増幅するという考え方であったが、ここでは τ_h を増幅するのではなく、 τ_h を増幅したかのような挙動を示す位置軌道や速度を生成するという考えに基づいて車椅子のパワーアシスト制御を実現する。

操作者の入力トルク τ_h の情報から、何らかの速度の規範値 V_r を生成するアシスト手法を速度制御ベース型パワーアシスト法と名付ける。この場合、操作者の入力トルクから適切な速度指令軌道を生成する速度指令生成器をいかに作るかは重要となる。速度制御ベース型パワーアシスト法の構成を図 6.9 に示す。

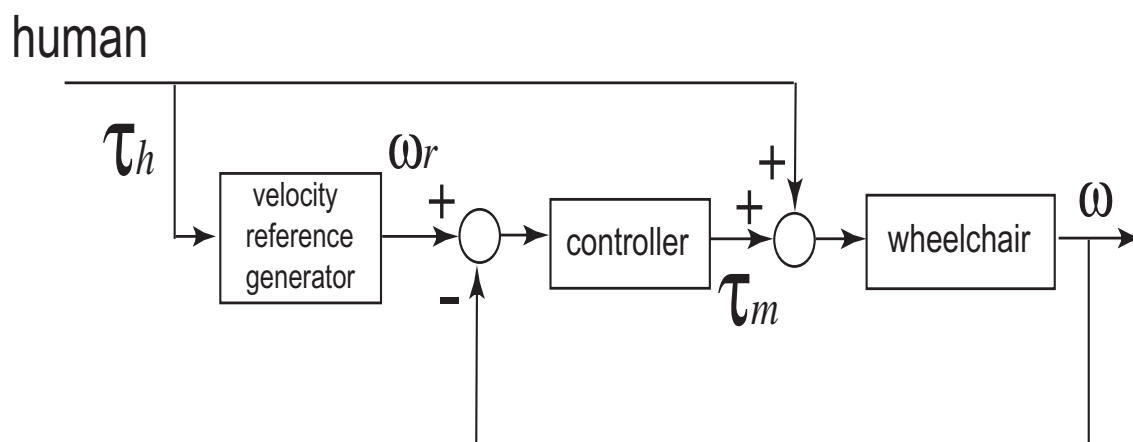


図 6.9: 速度制御ベース型パワーアシスト法の構成

また、速度制御ベース法とほぼ同様であるが、操作者の入力トルク τ_h の情報から、何らかの位置の規範値 U_r を生成するアシスト手法を位置制御ベース型パワーアシスト法と名付ける。同様にこの制御系では、操作者の入力トルクから、適切な位置指令軌道を生成する位置指令軌道生成器をいかに作るかは重要である。位置制御ベース型パワーアシスト法の構成を図 6.9 に示す。

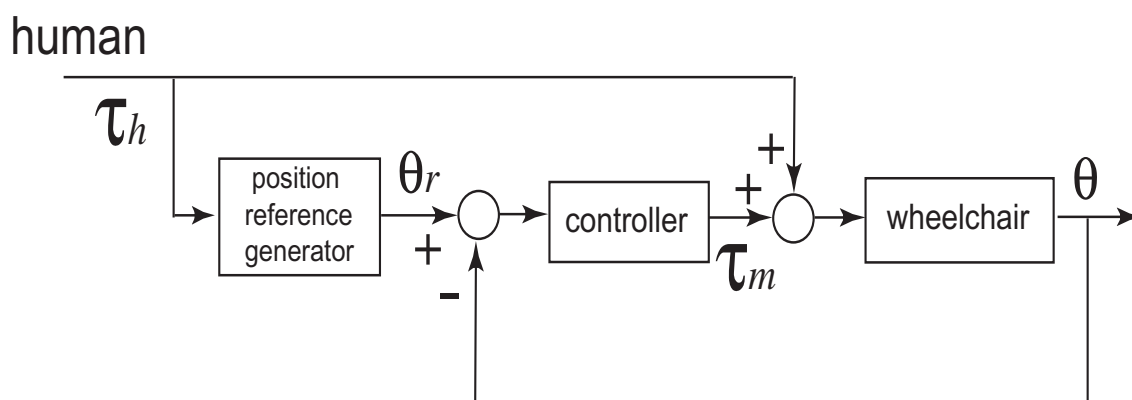


図 6.10: 位置制御ベース型パワーアシスト法の構成

これら位置・速度制御ベース型アシスト手法のブロック図を見て特徴的なことは、操作者の入力トルク τ_h がこの制御系への外乱として入ってくることである。

これらの手法の利点は、位置や速度という、操作者の感じる乗り心地や操作性に最も大きな影響を与える要素を直接生成することができ、もし外乱要素を抑圧することができれば、少し走りにくい路面や坂道でも、平坦地と同じように楽な走行が実現されうるといふことである。

6.3.2 位置制御ベース型アシスト手法の制御系設計

今回製作した車椅子の左右輪の角度を測定するロータリーエンコーダの分解能が低く、単純な差分計算では速度情報が劣化するため、本実験では、エンコーダ情報をそのまま用いて、位置制御をベースとしたパワーアシスト制御手法を実機を用いて検討する。

ここでは、簡単な PD 制御を用いて位置制御系を構成する。その位置制御ベース型パワーアシスト制御法の構成を図 6.11 に示す。操作者の入力したトルク τ_h から生成した位置指令軌道 θ_r に位置制御系が追従する形となるが、操作者の入力トルク τ_h がこの位置制御系への外乱トルクとして入ってくるのが特徴である。

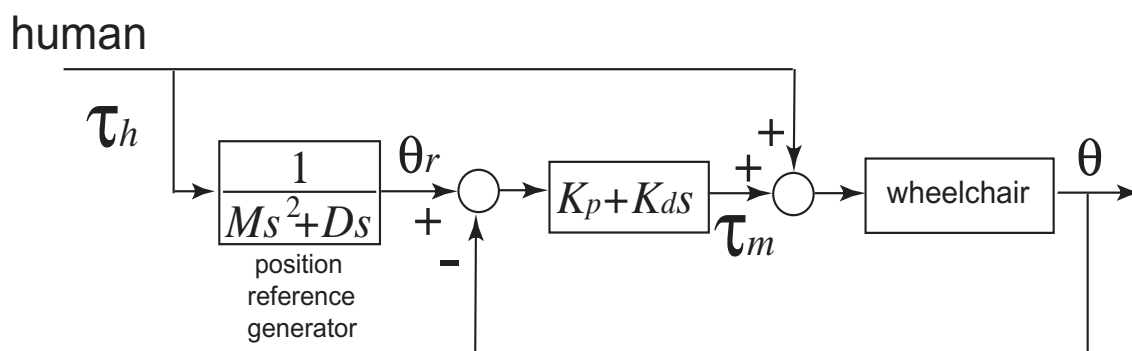


図 6.11: PD 制御による位置制御ベース型パワーアシスト法

位置指令生成の方法はさまざまなものが考えられるが、ここでは簡単に、垣本ら [58] の介助用アシスト車椅子の制御と同様に二次系の式を用いた。

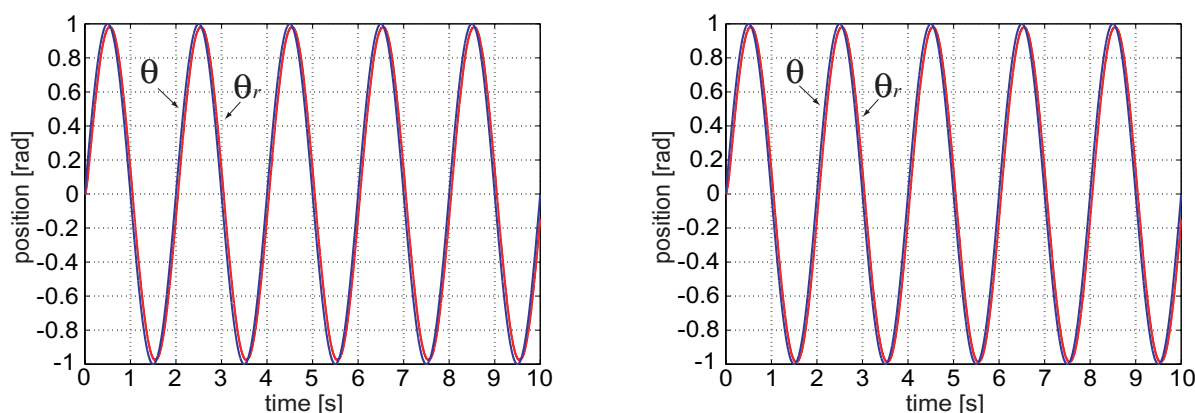
$$\theta_r = \frac{1}{Ms^2 + Ds} \tau_h \quad (6.2)$$

これは、パワーアシストロボットの位置制御ベース型手法で述べたインピーダンス制御に基づくアシスト位置軌道生成と同じような考え方である。 M は仮想慣性係数であり、 D は仮想粘性係数である。すでに述べたように、 M を小さくすることで位置指令軌道は速く立ち上がり、また D を小さくすることで同じ入力トルク τ_h に対して大きな位置指令軌道を生成することになる。パワーアシスト車椅子に適用する際に、この M と D は乗り心地や操作性に大きな影響を与えるパラメータとなる。

また、位置制御系に用いる PD 制御器のパラメータ K_p , K_d は、位置指令値から位置応答までの二次系の特性が時定数 $\tau_r = 50[\text{ms}]$ となるように設計した。

$$K_p = \frac{J}{\tau_r^2}, \quad K_d = \frac{2J}{\tau_r} - B \quad (6.3)$$

この PD 制御器で正弦波上の位置指令軌道に追従させた実験の様子を図 6.12 に示す。ただし、左右輪とも地面から浮かせて実験を行ったため、地面との間にはたらく駆動力などの外乱要素は存在しない。



(a) 右輪の位置指令と応答

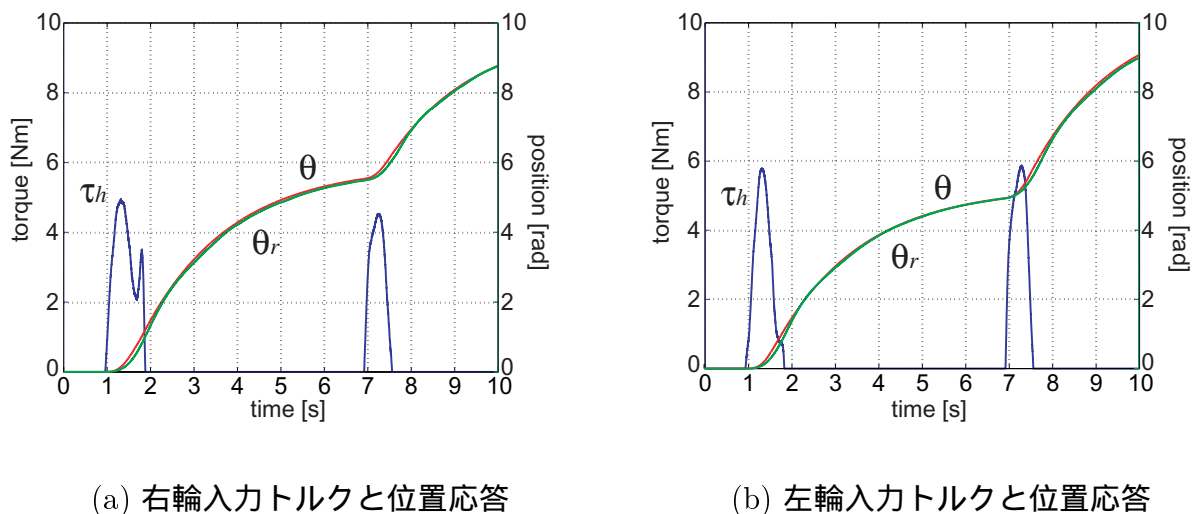
(b) 左輪位置指令と応答

図 6.12: PD 制御による車椅子の左右輪位置制御

この実験結果から、位置指令軌道に非常によく追従できていることがわかる。車椅子はこのように比較的ゆっくりした動作を行うため、今回は PD 制御を用いたが、走りにくい路面や坂道などでは外乱要素が大きくなるため、この制御系の中に外乱オブザーバなどを導入することも今後検討したい。

6.3.3 実機を用いた走行実験

ここから、操作者の入力トルク τ_h に基づいて生成した位置指令軌道 θ_r に車輪角度 θ が追従するようにして車椅子を走行させる実験を行う。最初に、仮想慣性係数と粘性係数を $M = 1.0$, $D = 0.5$ として行った走行実験の結果を図 6.13 に示す。



(a) 右入力トルクと位置応答

(b) 左入力トルクと位置応答

図 6.13: 位置制御に基づくアシスト制御法の実験結果

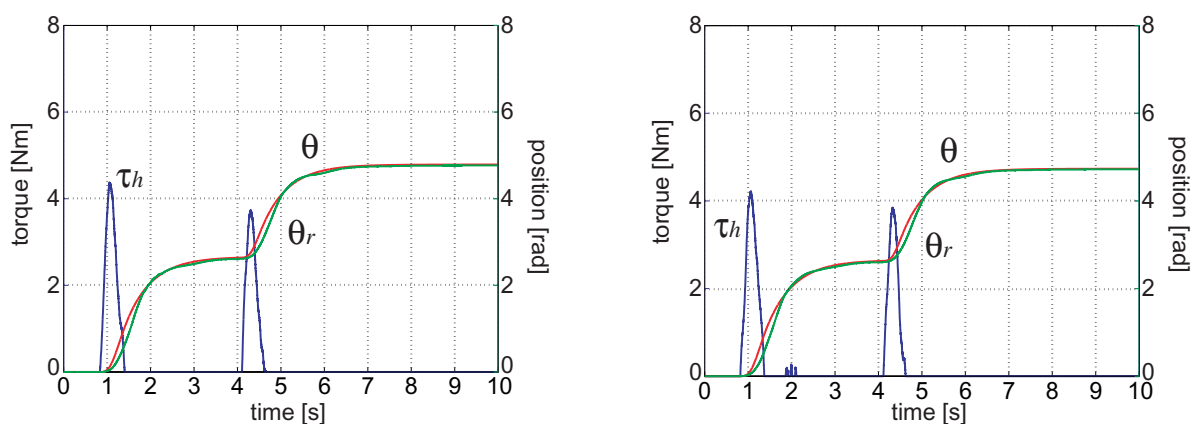
これは絨毯の上で実際に人間が乗って走行を行ってみた結果である。走行の立ち上がりの加速と停止に至る減速に関しては、慣性係数、粘性係数ともある程度よいパラメータであったが、操作者がハンドリムを介して力を入力しようとするときに不自然な動きが見られた。これは、操作者が力を入力した瞬間、位置指令値は初期状態からまだあまり大きく変化していないため、アシスト制御系は車輪角度をその位置に保とうとしている。つまり、操作者がハンドリムを介して車輪を前に転がそうとしている外乱要素と、車輪をまだその位置に保とうとしているアシスト制御系がお互いにぶつかり合い、びくびくと振動するような状況になっている。このような反応に対して、操作者はハンドリム操作を重く感じることになり、安心してハンドリムにスムーズに力を入力することができなくなる。いずれ位置指令軌道が大きくなっていけば、車輪は前方に進んでいくためこの問題は消えるが、操作者がハンドリムというインタフェースを介して操作しようとしている最も重要な時間帯に、このように動作の自然さが失われることは大きな欠点である。

この問題点は、パワーアシストロボットの制御においても起こりうる問題である。しかし、第3,4章で示した実験結果ではそのようなことは問題にならなかった。それは、ロボットの位置制御系の設計において2自由度制御系 [45][46] を用い、外乱に対して非常にロバストな制御系を設計していたため、操作者の入力トルクが外乱として入ってきても完全に打ち消し、アシスト機器であるロボットから見たときに、操作者側と環境側をある意味で切り離すことができていたからである。また、車椅子の場合と異なり、ある程度動作の立ち上がりが速く、位置指令軌道が立ち上がるのをしばらく待つようなことはなかった。車椅子の場合は、乗り心地などを考慮して、ある程度立ち上がりはゆっくりにしなればなら

ない。

パワーアシスト車椅子の場合にも、もし外乱に非常に強い位置制御系を設計し、操作者の入力トルクが外乱として存在しても完全に打ち消し、常に位置指令軌道をしっかりと追従するようにすれば、上述の問題はなくなるかもしれない。しかし、パワーアシスト車椅子は人間がその上に実際に乗り、すべて身を任せてしまう機器であるため、非常に強い位置や速度の制御系を設計することは、乗り心地などの観点から悪影響を及ぼすのではないかと考えられる。もう一つの議論である、走りにくい路面や坂道などの走行において、その走りにくいなどの情報を操作者に感じさせることが大事であるという面から考えても、すべての外乱を完全に打ち消してしまうような強い制御系を組むことは良くないのではないかと考えられる。

次に、上述のような操作感の悪さを解消するため、位置指令軌道の立ち上がりをなるべく速くする場合として、 $M = 0.3$, $D = 0.5$ と慣性係数を小さくして行った走行実験の結果を図 6.14 に示す。



(a) 右入力トルクと位置応答

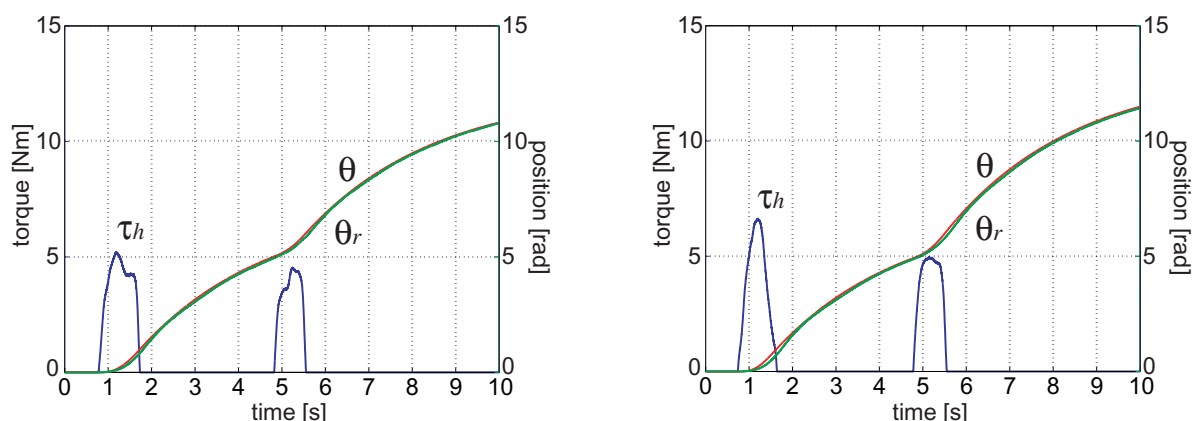
(b) 左入力トルクと位置応答

図 6.14: 位置制御に基づくアシスト制御法の実験結果

これも絨毯の上で走行した実験の結果である。位置軌道の立ち上がりが速いため、操作者が力を入力するとすぐ動き出し、先ほど述べたようなびくびく振動する問題は起こらない。しかしこのように M を小さくしすぎると、車椅子は急発進し、さらに減速度も大きく急停止することになり、乗り心地や操作性は悪い。実際に操作してみたが、大きな加速度で急に走りだし、走り出したかと思えば急に停止し、体が前に飛び出してしまいそうになり、操作者が恐怖感を憶えるような走行である。

6.3 位置制御をベースとしたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法

今度は逆に、動作の立ち上がりや停止動作ををある程度ゆっくりにした場合として、 $M = 1.5$, $D = 0.5$ と慣性係数をある程度大きくして行った走行実験の結果を図 6.15 に示す。



(a) 右入力トルクと位置応答

(b) 左入力トルクと位置応答

図 6.15: 位置制御に基づくアシスト制御法の実験結果

これも絨毯の上を実際に走行してみた結果であるが、ハンドリムに力を入力する時間帯以外は非常に安定性や乗り心地もよく、自然なパワーアシスト動作に近いものが実現できている。

M と D をこのように設計した実験のいずれにおいても、やはり操作者がハンドリムを介して力を入力するときの挙動において自然さが失われ、操作性や乗り心地の悪いアシスト制御系となってしまう。制御系が作り出した位置指令や速度指令にすべて支配されることがパワーアシスト車椅子の自然な挙動を失わせていると言い換えることもできる。これらのことから、パワーアシスト車椅子のアシスト制御系を考える上で、操作者がハンドリムを介して加える入力トルク τ_h が外乱として入ってくることを十分に考慮し、その入力トルクとモータからのアシストトルク τ_m 両方に対して望みの特性を実現できる制御系を考える必要性が見えてくる。

6.4 慣性制御に基づくパワーアシスト車椅子のアシスト制御法

本章では、外乱として入ってくる操作者入力トルク τ_h とモータのアシストトルク τ_m 双方に対して、車椅子がある慣性値をもった系に見えるような制御系を実現する慣性制御 [59][60] について述べ、そのパワーアシスト車椅子への適用の可能性をシミュレーションによる検討を通して議論する。

6.4.1 慣性制御の実現方法

堀ら [59][60] は、電動機の負荷装置として実慣性の数百倍の慣性を発生させることができる慣性シミュレータを構成している。直流機の速度の微分信号を電流指令にフィードバックするだけの簡単な構成で、外乱トルク τ_d や駆動トルク τ_e から見た慣性を自由に設定できるような慣性シミュレータが実現される。その慣性制御系の構成を図 6.16 に示す。

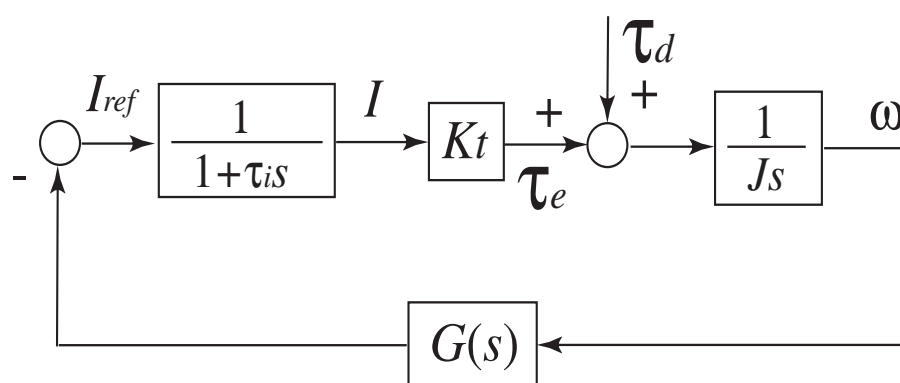


図 6.16: 慣性制御系の構成

K_t はトルク定数、 I 、 I_{ref} は電流とその指令値である。

慣性制御器 $G(s)$ は、新しく発生させる慣性値 J_N を用いて、

$$G(s) = \frac{J_N}{K_t} \frac{s}{1 + \tau_N s} \quad (6.4)$$

と表される。 J_N を制御慣性と呼ぶ。右辺第二項の $\frac{s}{1 + \tau_N s}$ は疑似微分の項である。このとき、外乱トルクから角速度までの伝達関数は、

$$\frac{\omega}{\tau_d} = \frac{1}{(J + J_N)s} \frac{(1 + \tau_N s)(1 + \tau_i s)}{1 + \frac{J(\tau_N + \tau_i)}{J + J_N} s + \frac{J_i a_N \tau_i}{J + J_N} s^2} \quad (6.5)$$

と表され、外乱トルクから見れば、右辺第一項のように制御慣性 J_N が新しく発生したように見える。右辺第二項の二次系が慣性制御系の応答を決める。 τ_i は電流制御系の時定数である。

6.4.2 パワーアシスト車椅子のアシスト走行制御への適用

位置や速度の制御に基づくアシスト手法では、外乱要素として入ってくる操作者の入力トルク τ_h は抑圧して打ち消すような制御系となっていたが、ここでは、入力トルク τ_h とアシストトルク τ_m いずれから見てもある慣性をもった系に見えるような設計を行いたい。

このような考えに基づき、上述の慣性制御を利用し、操作者の入力トルク τ_h とその α 倍のアシストトルク τ_m から見た系の慣性値を自由に設定できるようなパワーアシスト車椅子のアシスト制御法を検討する。慣性制御に基づいたパワーアシスト車椅子のアシスト制御法の構成を図 6.17 に示す。

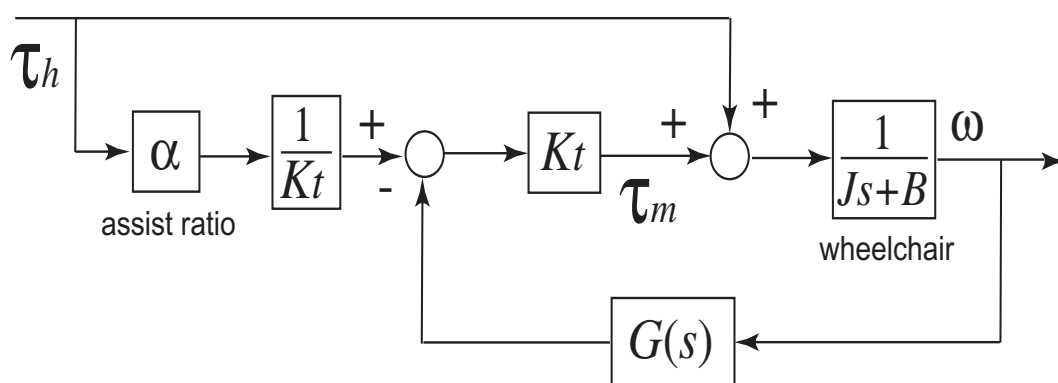


図 6.17: 慣性制御に基づくパワーアシスト車椅子のアシスト制御法

このとき、外乱要素として入る操作者の入力トルク τ_h や $\frac{\alpha}{K_t}$ 倍されたアシストトルクから車椅子の速度までは、伝達関数

$$H(s) = \frac{1}{(J + J_N)s} \quad (6.6)$$

である系に見える。そのため、両トルクの総和が $J + J_N$ という慣性値をもった物体を転がしているという状態に見せかけることができる。

6.4.3 シミュレーションによる検討

上述の慣性制御に基づくパワーアシスト車椅子のアシスト制御法について、シミュレーションを通して検討を行う。ここでは、制御慣性を小さくし、速く動きだしやすく止まりやすいような慣性を模擬した場合と、制御慣性を大きくし、動きだしにくく止まりにくいような慣性を模擬した場合のシミュレーションを示す。

制御慣性の値を (a) $J_N = 1.0$, (b) $J_N = 10.0$ として行ったシミュレーションの結果を図 6.18 に示す。ただし、アシスト比は $\alpha = 3.0$ とし、操作者の入力トルク τ_h は本章のトルク制御ベース型アシスト手法の実験で得たデータを用いてシミュレーションしている。

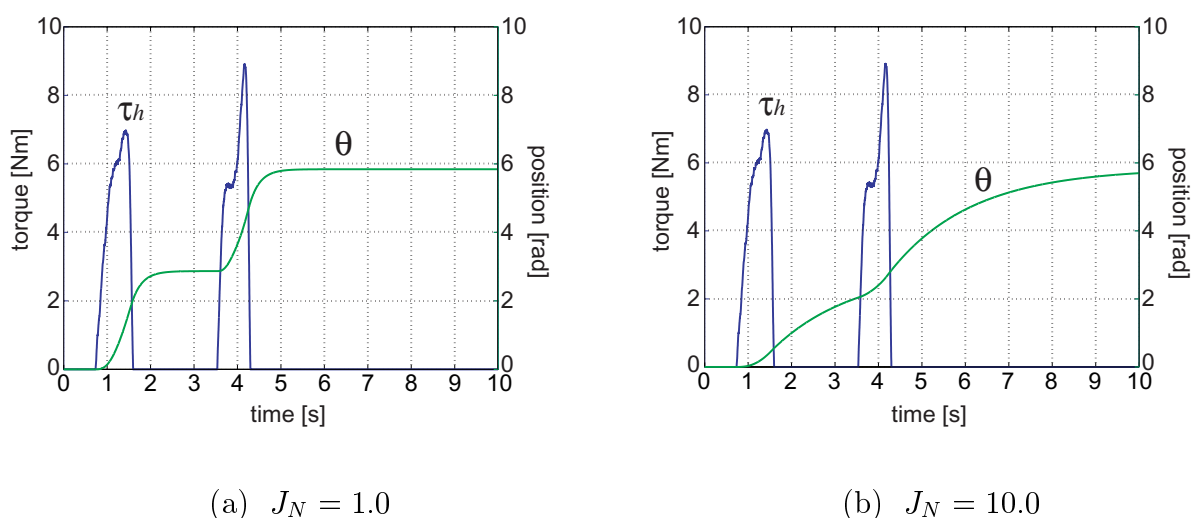


図 6.18: 慣性制御に基づくアシスト制御法のシミュレーション解析

(a) のように制御慣性 J_N が小さい場合は、動きやすく止まりやすいため、急加速急停止のような動きで乗り心地に悪影響を与える可能性がある。一方、(b) のようにある程度大きな慣性を模擬すれば、ゆっくり加速し惰性のような動きで緩やかに停止に至ることがわかる。トータルで車椅子が進む距離は操作者の入力トルク τ_h やアシストトルク $\tau_m = \alpha\tau_h$ の大きさで決まり、これは随時調整すればよい。

本手法の基本となる考え方は、操作者の入力トルクとモータのアシストトルク τ_m がある慣性値をもった物体を転がしているように見せかけることが操作者にとってもより自然なパワーアシスト動作になるのではないかというものである。模擬する慣性の値をいかに決めるかという点や、動作の途中で変化させる必要があるかなどの点については今後実機を用いた実験により検討したい。

6.5 まとめと今後の課題

6.5.1 本章のまとめ

本章では、人間と協調して走行する電動パワーアシスト車椅子のアシスト制御法について、トルクや位置・速度の制御をベースとした手法を実機による実験も通して検討した。さらに車椅子系の慣性を模擬することで自然なパワーアシスト動作を生み出すことを目指した慣性制御に基づくアシスト制御法についてもシミュレーションを通して検討した。惰性走行のためのアシストトルクなども含めて、いかにそれらの規範値を作り出すかにアシスト制御はかかっている。

これら三つの手法はまだ基礎実験の段階にとどまってはいるが、それぞれで生成する規範値やさまざまな走行場面に対応するために調整できるパラメータも異なり、優位性や特徴も異なる。どのような状況に各手法が適切であるか、あるいは操作者を用いた評価実験を通して明らかにしていく必要がある。

6.5.2 今後の課題と可能性

本研究では、ある一つの路面を用いて実験を行い、アシスト手法の原理とその有効性を確認するにとどまったが、これを実際に想定される様々な路面や環境でさらに実験的検討を行うことが今後の課題となる。位置制御系では簡単なPD制御器を用いたが、さまざまな路面を走行する上で、外乱オブザーバなどの少し強い制御系の適用も今後検討していきたい。実用場面では、操作者や路面、環境に応じて手法を使い分けたり、パラメータを調整したりする必要があるかもしれない。実際に高齢者・障害者に使用してもらい評価を行うことでこれらを明らかにしていきたい。

本章で示した制御系では、左右輪間の情報交換やバランス制御による直進性維持については行っていない。機械の側でどれほど直進性の補償を行うかはその程度によると考えられる。必要以上に左右のバランスを取りすぎると、操作者が曲がりたいときにその操作が難しくなる。場合によっては曲がることができなくなるかもしれない。この直進性に関する議論も今後の課題としたい。

また、路面との間にはたらく駆動力は外乱オブザーバによって推定することが可能であり、傾斜による負荷なども合わせて推定される。走りにくい路面や坂道での走行においては、その外乱要素を抑圧してしまえば走りやすい平坦地と同じような感覚で走行することが可能であるが、しかしそれら走りにくいなどのいわゆる走行環境の情報を全く感じさせなくすることはよくないとも考えられる。これはパワーアシスト車椅子への第三要求事項として冒頭で述べていることであるが、少し重くなったとか、走りにくい路面に入ったなどの情報がある程度操作者に感じさせるほうが、より自然なパワーアシスト動作ではないかと考えている。このような車椅子と外界(つまり環境)との間の作用力や外乱の情報をア

シスト制御系にうまく組み込み、力のアシストを行いつつも、走行環境の情報を操作者に返すことができるような制御系についても今後検討したい。

高齢者や障害者が長く使っていく上でのリハビリ効果を意識したパワーアシスト車椅子の制御法も今後検討したい。同じ操作者が継続的に使用し、その症状も日々変化していくような状況で、適応的にパラメータなどを変化させたり、学習機能などを利用したりすることも視野に入れ検討していきたい。

第7章 様々な走行場面に対応する電動パワーアシスト車椅子の多機能制御法

本章では、電動パワーアシスト車椅子が実際に社会の中で使用されるときに問題が起きうる走行場面において、それに対応し安全に走行するためのアシスト制御手法を提案し、実機を用いた実験的検討を行う。ここで扱う走行場面とは、我々が実際に行った車椅子ユーザへのインタビューや、我々自身がさまざまな路面状況で行った走行実験を通して、危険性などの問題点が存在すると感じたものである。

7.1 後方転倒防止を考慮したパワーアシスト車椅子の走行制御とその実験的検討

7.1.1 パワーアシスト車椅子走行時の後方転倒の危険性

この問題点は、我々が実際に市販のパワーアシスト車椅子で平坦地、坂道などを走行して見出したものである。上り坂だけでなく平坦地であっても、急な加速をしようとするとき前輪が浮上し後方へ転倒する恐れがあるという問題点である。上り坂では当然この現象は顕著に現れる。操作者である人間は、後方へ転倒しないように姿勢を前方に傾けて前輪浮上を避けようと努力をする。しかしそれでも、特にハンドリムをこいだ瞬間の動作加速時に浮上が起き、慌てて姿勢を変えることが実際の走行実験でも多くあった。

前輪が浮上する現象は、慣れている人にはそれほど問題にはならないかもしれないが、使い始めてまだ日が浅い人やお年寄り、さらに姿勢を急に大きく変えたりできない障害者にとっては、やはり後方へ転倒するかもしれないという恐怖感などがあり、精神的なダメージも起こりうる。上り坂だけではなく、平坦地はなおさら前輪が浮かずに安全に走行できるようなアシスト制御系を考慮する必要がある。

特に上り坂では、前輪が浮上することをある程度許容しなければほとんど前に進むことができないとも考えられる。前輪が浮上することを防止すればアシスト量を当然減じることとなり、上り坂では負担が非常に大きくなる。しかしここでは、最初から前輪浮上が起きないようなアシスト制御法を考え、万が一浮上したときには操作者に姿勢を変化させる

などの調整能力を発揮させることもありうるという立場に立って検討する。

通常走行時と前輪浮上時における人間 - 車椅子系の走行の様子を図 7.1 に示す。

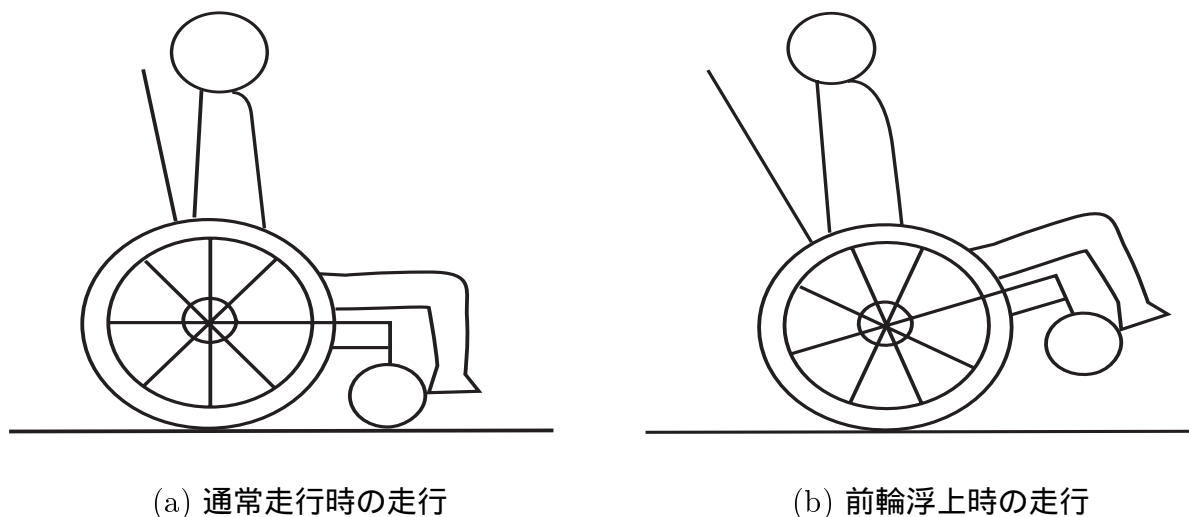


図 7.1: 通常走行時と前輪浮上時の走行の様子

7.1.2 後方転倒防止を目指したアシスト制御手法

どのような状況で前輪浮上が起こるかを調べるため、前章のトルク制御ベース型手法、つまり操作者の入力トルクの何倍かのトルクを時定数を介してそのままアシストトルクとする手法を用いて、前輪浮上を故意に起こさせる走行実験を行う。

最初に、前輪浮上が起こったときの走行実験の結果を図 7.2 に示す。左右両輪への操作者の入力トルクと、ジャイロセンサから得られた車椅子のフレームの浮上角速度を合わせて示す。

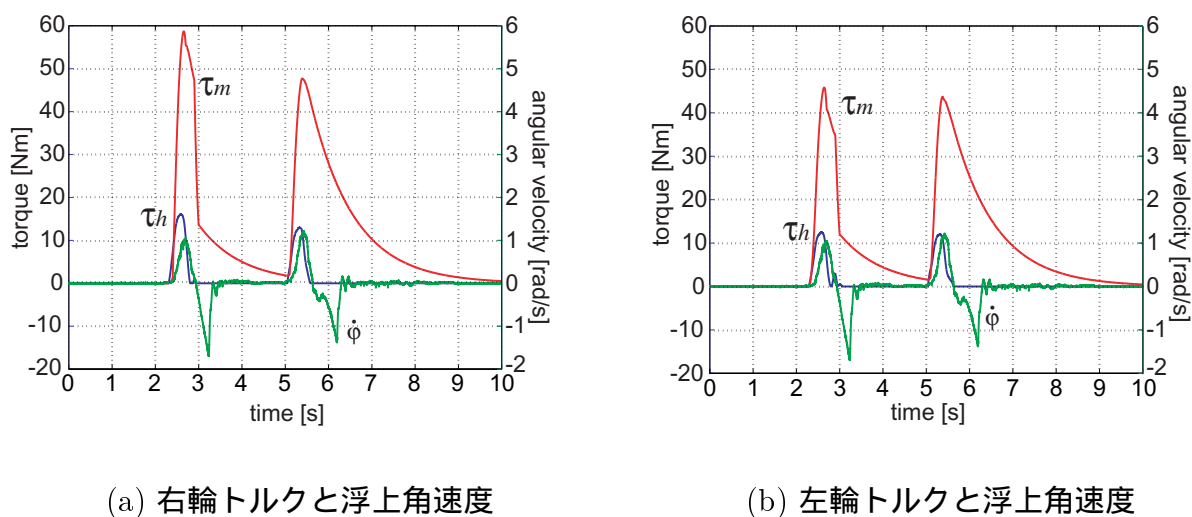


図 7.2: 前輪が浮上した走行結果

次に、前輪浮上が起こらなかったときの走行実験の結果を図 7.3 に示す。左右両輪への操作者の入力トルクと、各車輪の角度を合わせて示す。

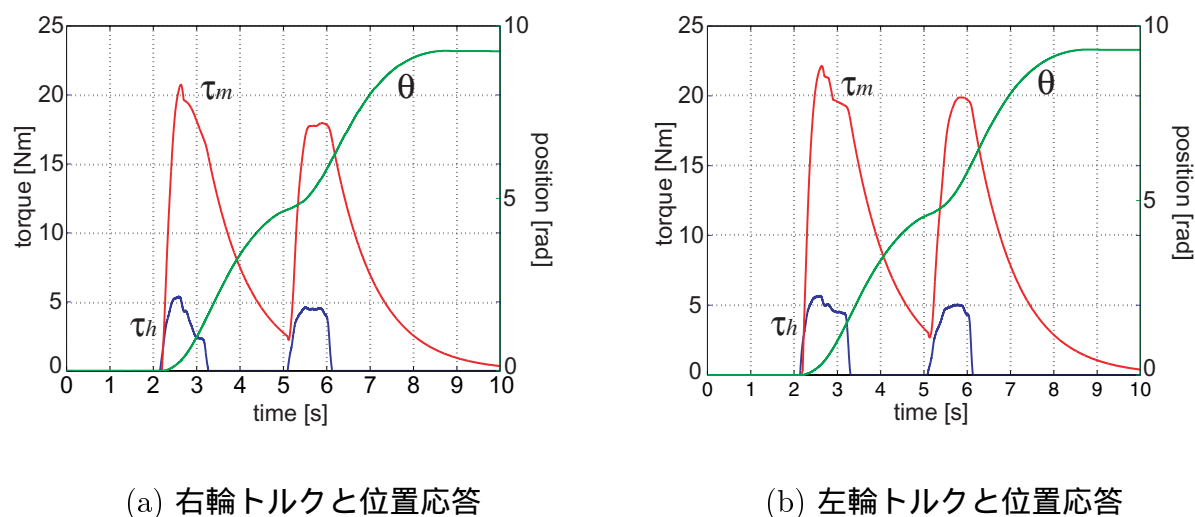


図 7.3: 前輪が浮上しなかった走行結果

図 7.2 からわかるように、操作者が急激に大きな力をハンドリムに入力すると、アシストトルクも速い立ち上がりで大きなトルクを出し、その瞬間に前輪が浮上している。一方、図 7.3 のように、操作者がじわじわとゆっくり力を入れ、大きさも大きくなければ前輪浮上は起きていない。これらのことから、後方転倒を引き起こす元となる前輪浮上現象は、アシストトルクの立ち上がりの速さやその大きさに原因があると考えられる。当然、操作者があまり前屈みではなくまっすぐの姿勢であるほど前輪浮上が起きやすいなど、操作者の姿勢に依存する。以下に、そのアシストトルクの大きさを調整したり、立ち上がりを調整したりすることにより後方転倒防止を実現するアシスト制御法を示す。

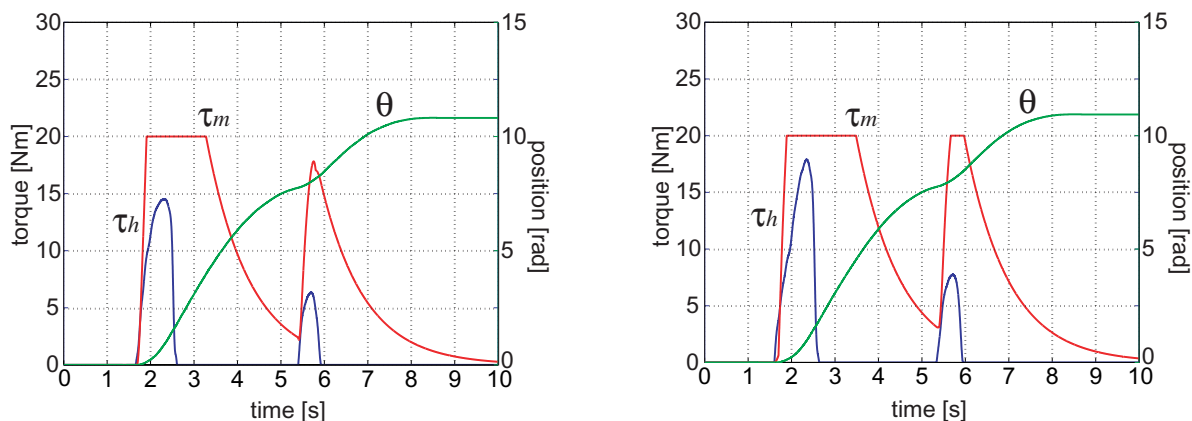
<後方転倒防止制御法 1：リミッタによるアシストトルク制限>

本手法は、アシストトルクをある値 τ_{lim} でリミッタをかけて制限する手法である。このとき、アシストトルクの立ち上がりを決める時定数 τ_1 と惰性走行を生み出す時定数 τ_2 は、通常走行のアシスト法と同じ値である。アシストトルクの制限のしかたは式 (7.1) のようにする。

$$\begin{cases} \tau_m = \alpha\tau_h & \text{if } \tau_m < \tau_{lim} \\ \tau_m = \tau_{lim} & \text{if } \tau_m \geq \tau_{lim} \end{cases} \quad (7.1)$$

7.1 後方転倒防止を考慮したパワーアシスト車椅子の走行制御とその実験的検討

最初に、アシスト比を $\alpha = 3.0$ 、トルクリミッタの値を $\tau_{lim} = 20[\text{Nm}]$ 、アシストトルクの時定数を $\tau_1 = 0.08[\text{s}]$, $\tau_2 = 1.0[\text{s}]$ として行った走行実験の結果を図 7.4 に示す。

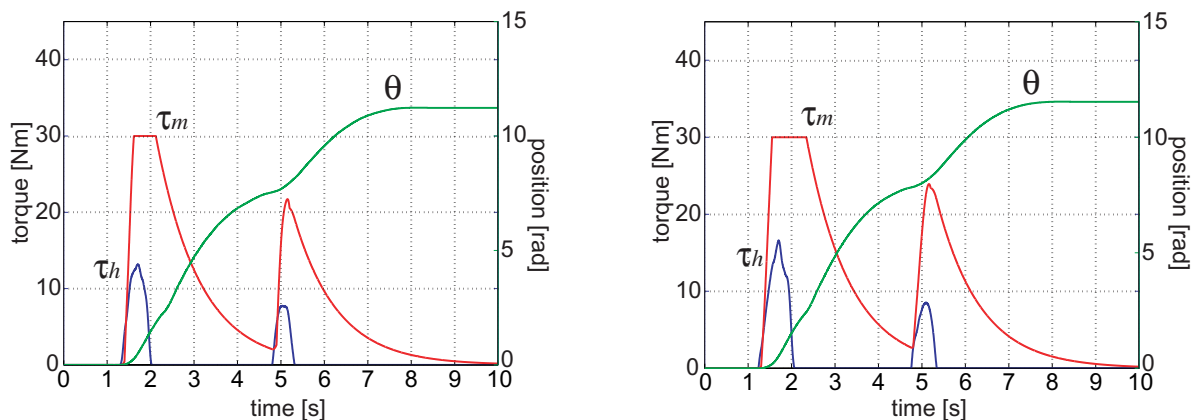


(a) 右輪トルクと位置応答

(b) 左輪トルクと位置応答

図 7.4: トルクリミッタによる後方転倒防止法の実験結果

次に、アシスト比を $\alpha = 3.0$ 、トルクリミッタの値を $\tau_{lim} = 30[\text{Nm}]$ 、アシストトルクの時定数を $\tau_1 = 0.08[\text{s}]$, $\tau_2 = 1.0[\text{s}]$ として行った走行実験の結果を図 7.5 に示す。



(a) 右輪トルクと位置応答

(b) 左輪トルクと位置応答

図 7.5: トルクリミッタによる後方転倒防止法の実験結果

いずれの走行実験結果においても前輪は浮上しなかった。アシストトルクの立ち上がりは通常走行時と同じであるため、人間の姿勢によっては浮上する可能性もあるが、トルクリミッタにより、アシスト比を落すようなはたらきがあり、後方転倒の危険性を減じている。

< 後方転倒防止制御法 2 : 時定数調整による加速低減 >

本手法は、アシストトルクの立ち上がりを決める時定数 τ_1 を調整する手法である。アシストトルク自体の大きさに対するリミットはない。時定数 τ_1 をやや大きめにして、アシストトルクの立ち上がりを鈍らせることにより、後方転倒を防止する。時定数の切り替えについては通常のアシスト手法と同じであり、式 (7.2) のようにする。

$$\begin{cases} C_a = \frac{\alpha}{\tau_1 s + 1} & \frac{d\tau_h}{dt} \geq 0 \\ C_a = \frac{\alpha}{\tau_2 s + 1} & \frac{d\tau_h}{dt} < 0 \end{cases} \quad (7.2)$$

最初に、アシスト比を $\alpha = 3.0$ 、アシストトルクの時定数を $\tau_1 = 2.0[s]$ 、 $\tau_2 = 1.0[s]$ として行った走行実験の結果を図 7.6 に示す。

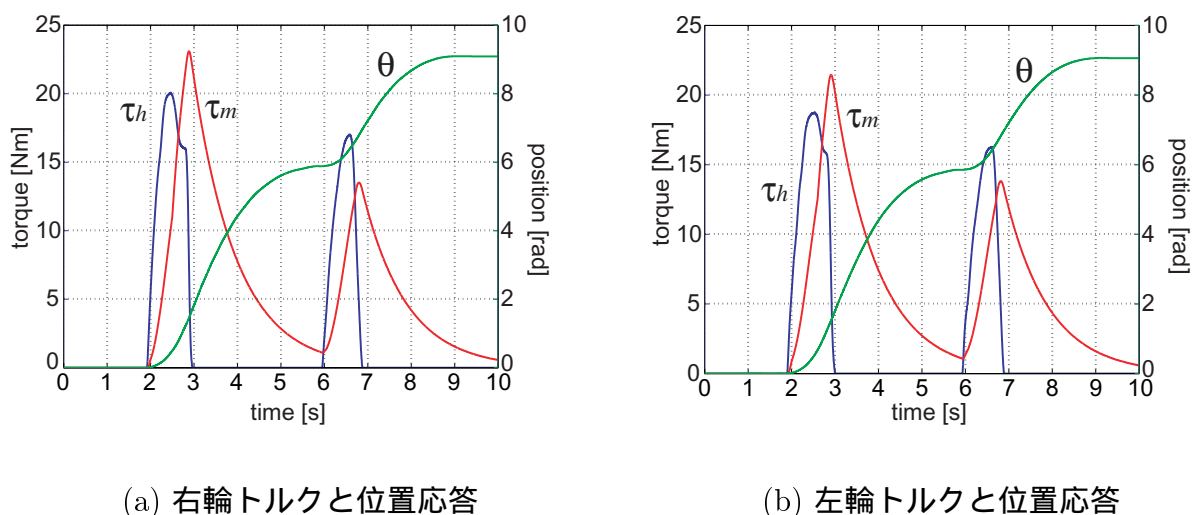


図 7.6: 時定数調整による後方転倒防止法の実験結果

次に、アシスト比を $\alpha = 3.0$ 、アシストトルクの時定数を $\tau_1 = 1.0[s]$ 、 $\tau_2 = 1.0[s]$ として行った走行実験の結果を図 7.7 に示す。

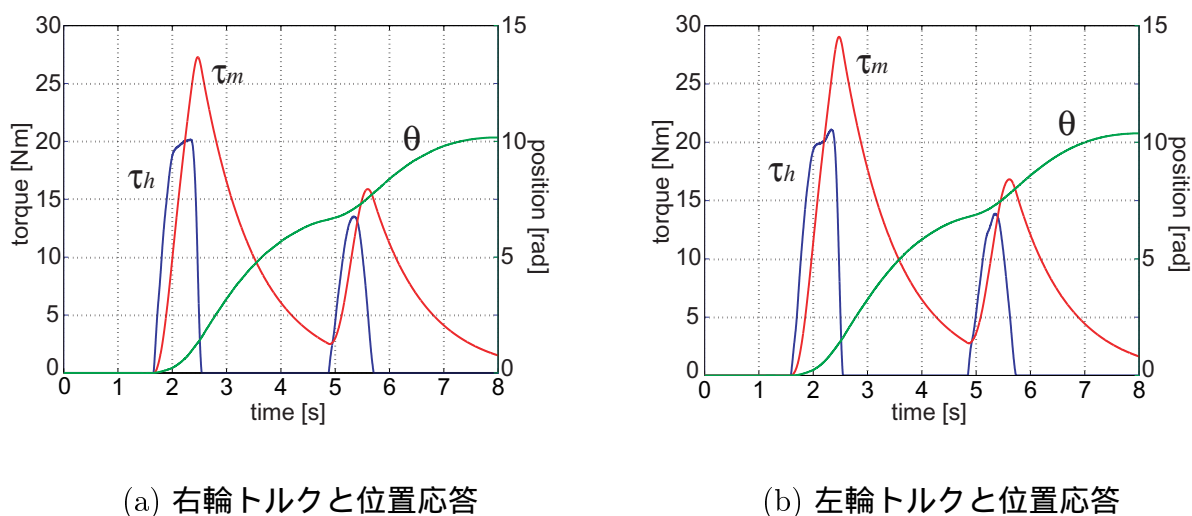


図 7.7: 時定数調整による後方転倒防止法の実験結果

図からも明らかなように、アシストトルクの立ち上がりは遅く、アシスト比も下がったような状態になり、いずれも場合も前輪浮上は起こらなかった。立ち上がりでのアシスト効果は落ちるものの惰性におけるアシストによって前への推進は保たれる。

以上のように、パワーアシスト車椅子の後方転倒防止を実現するアシスト制御法を二つ提案したが、それぞれアシストトルクのリミッタの値や、立ち上がりを決める時定数の値をいかに決めるかは実験を通して検討することとなる。それは、車椅子に乗る操作者によって、その体重やハンドリムへの入力トルクが異なり、前輪浮上の条件なども変わってくると考えられるからである。

7.1.3 被験者を用いたアンケート評価実験

ここで提案した二つの後方転倒防止アシスト制御手法の有効性を確認するため、通常のアシスト制御法と合わせて男女問わず多くの被験者に使用してもらい、前輪浮上が起きるかどうかなどだけでなく、いろいろな側面から評価を行ってもらおう実験を行う。図 7.8 にそのアンケート評価実験の様子を示す。



図 7.8: アンケート評価実験の様子

評価方法はパワーアシストロボットの被験者評価と同様である。すでに定義したパワーアシスト技術への要求事項をベースとして評価点をいくつか設定し、その点においてどう感じるかを被験者に点数をつけてもらうこととする。点数は+3(very good) から-3(very bad) の7段階とした。

この評価方法に基づき評価実験を行う。被験者は20代から50代の男女10人用意し、前章の評価法と同じように、この点数の平均 m と標準偏差 σ を計算することで各パワーアシスト制御手法の比較検討を行う。採用するアシスト制御手法は以下の三つである。

手法 A：通常のアシスト制御手法

アシスト比： $\alpha = 3.0$, アシストトルクの時定数： $\tau_1 = 0.08[s]$, $\tau_2 = 1.0[s]$

手法 B：トルクリミッタによる後方転倒防止制御手法

アシスト比： $\alpha = 3.0$, アシストトルクの時定数： $\tau_1 = 0.08[s]$, $\tau_2 = 1.0[s]$, $\tau_{lim} = 20[Nm]$

手法 C：時定数調整による後方転倒防止制御手法

アシスト比： $\alpha = 3.0$, アシストトルクの時定数： $\tau_1 = 1.0[s]$, $\tau_2 = 1.0[s]$

製作した実機に多くの被験者を乗せ、上記の三つのアシスト手法でそれぞれ実際に走行してもらい、以下の評価点について評価を行ってもらおう。

評価点 1：力の増幅・補助

これはすでに定義したパワーアシスト車椅子の第一要求事項であり、操作者に対し力の補助をして楽にさせているか、軽い力で押せるか、アシストされているかという点における評価である。

評価点 2：安定性、安心感

これはすでに定義したパワーアシスト車椅子の第二要求事項であり、操作者と車椅子を含めたシステム全体が安定した動作をしているか、安心できるような動きであるか、振動や脈動などないかという点における評価である。この評価点が悪い場合は、操作者に心配や恐怖感を与えることになってしまう。

評価点 3：操作性、使いやすさ、乗り心地

これもすでに定義したパワーアシスト車椅子の第二要求事項であり、操作者が自分の思うように操作できるかや、立ち上がりが速すぎたり遅すぎたりして乗り心地に悪い影響はないか、などである。

また最後に、もし何らかのきっかけでパワーアシスト車椅子に乗ることになったとき、どのアシスト手法の車椅子にのってみたいか、どの手法を好むか、についても意見を聞くことにする。20代から50代の男女、計10人の被験者を対象に、上記三つの手法のアシスト制御アルゴリズムの詳細は一切知らせず、被験者に走行を行ってもらおう。ハンドリムの漕ぎ方は、小さい力を細切れに入力するのではなく、1回大きく力を入れて漕いで前に進むようにしてもらおう。さらに、前輪浮上が起こりうることを被験者に意識させないため、前輪浮上の有無を調べるという実験の目的も知らせず、また、最初に前輪浮上起きた後その恐怖感で入力トルクが弱くなったりしないように、おそらく前輪浮上が起きにくいであろう手法 C から始め、手法 B、手法 A の順に走行実験を行う。以下の表が三つの手法の比較評価の結果である。

前輪浮上については、 が前輪浮上をしなかった場合、 が前輪浮上をした場合を示している。また一番右の欄に、その被験者が最後に総合的に判断して乗りたいと感じたアシスト手法の記号を示している。

7.1 後方転倒防止を考慮したパワーアシスト車椅子の走行制御とその実験的検討

評価点	手法 A				手法 B				手法 C				好み
	浮上	1	2	3	浮上	1	2	3	浮上	1	2	3	
1(男 20代)	×	+3	+1	+3	×	+1	+1	+1		-1	+1	-1	A
2(男 20代)	×	+2	-2	-2	×	+1	0	+1		+1	0	+1	B
3(男 20代)		+3	-2	+2		+2	0	+2		0	+3	-1	B
4(女 20代)		+3	-2	-1		+2	+1	+2		-2	+3	-1	B
5(女 20代)	×	+3	-1	0	×	+1	0	+2		-1	0	0	B
6(女 40代)		+3	+1	+3		+2	+2	+2		+1	+3	+1	A
7(女 30代)		+3	+2	+3		+1	+2	+2		+1	+2	+2	A
8(女 20代)	×	+2	-2	-3		+1	-1	-2		0	0	0	C
9(女 40代)	×	+3	-1	+2		+1	0	0		0	+1	-1	A
10(男 50代)	×	+3	-3	-3		0	+1	+1		-3	+1	-1	B

前輪浮上をした人の人数とその割合を以下の表に示す。

	手法 A	手法 B	手法 C
前輪浮上の人数	6人 / 10人	3人 / 10人	0人 / 10人
前輪浮上の割合	60%	30%	0%

何の後方転倒防止制御も施さない手法 A の場合、全員が前輪浮上をするわけではないが、6割の被験者が前輪浮上をしている。今回の実験では、全員姿勢はまっすぐにしていたため、前輪浮上をしない人は、ハンドリムをゆっくりこぎ、入力トルク τ_h とアシストトルク τ_m の立ち上がりが遅い人であると考えられる。手法 B ではその前輪浮上の割合が手法 A より半減している。アシストトルクにリミッタをもうけた効果であるが、アシストトルクの立ち上がりは手法 A と同じであるため、前輪浮上してしまう被験者が多少いた。手法 C では全員が前輪浮上を起こさず、時定数調整による後方転倒防止制御法の有効性が確認された。

7.1 後方転倒防止を考慮したパワーアシスト車椅子の走行制御とその実験的検討

また、その他の評価点における評価結果をグラフにまとめたものを図 7.9 に示す。

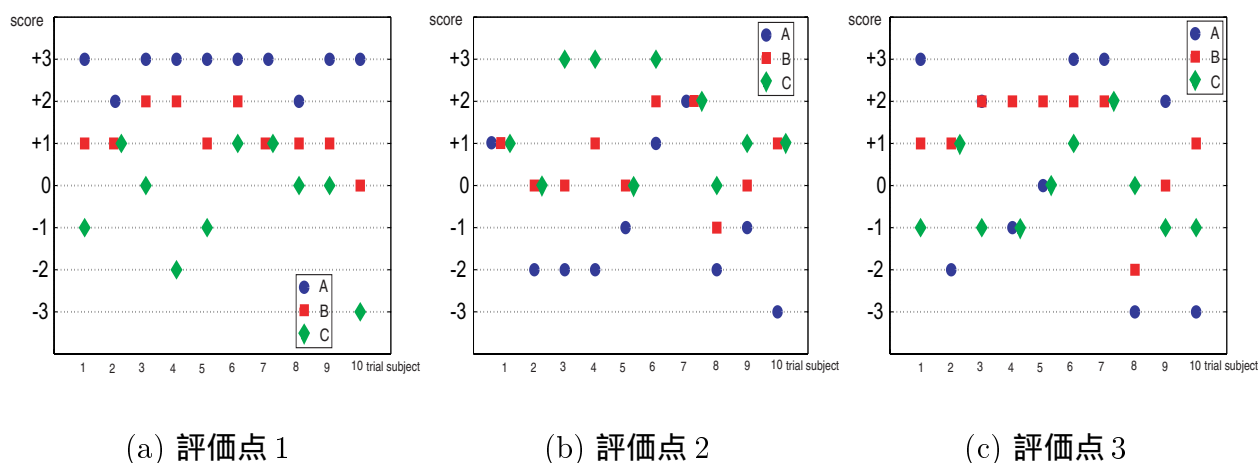


図 7.9: 各評価点における被験者の評価

これらの評価結果に対し、各評価点の平均と標準偏差を計算してグラフに表したものを図 7.10 に示す。

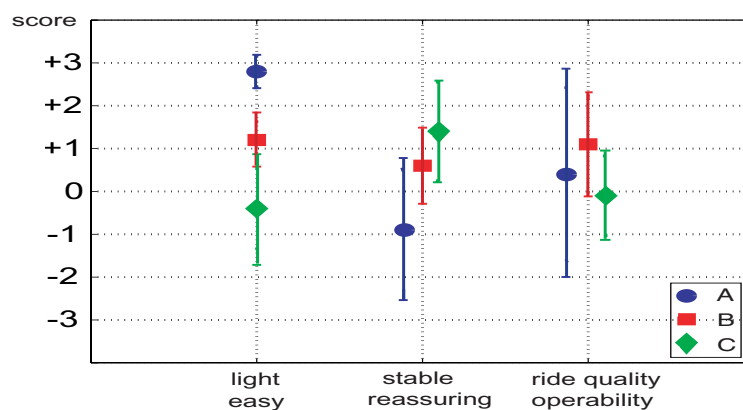


図 7.10: 平均と標準偏差による比較評価

最初に評価点 1 の「力の増幅」については、通常のアシスト手法である手法 A が高い評価を受け、手法 B、C の順に評価が下がっている。特に手法 C では時定数をある程度大きくしたため、アシスト感があまり感じられないとの評価を受けた。評価点 2 の「安定性、安心感」については、アシストの立ち上がりが遅い手法 C が最も高い評価であり、手法 B、A の順に下がる。通常的手法である A は、アシスト感は大いにあるが、逆に進みすぎるため恐怖感を憶える人が多かった。評価点 3 の「乗り心地、使いやすさ」については、上に示した図からもわかるように、評価の平均値はほぼ変わらないものの、三つの手法で評価が分かれた。立ち上がりが多少遅くてもいいから、とにかく前輪浮上しないような安心できるものを好む人もいれば、立ち上がりの遅さに不満を感じ、多少急であってもどんどんアシストしてほしいという人もおり、この使いやすさや乗り心地の観点において評価が分かれることとなった。

最後に、どの手法を一番好むかの評価においてもそれが現れている。アンケート実験後の感想を聞いてみると、例えば被験者 8 の女性のように、前輪浮上は大変恐く、多少アシスト感が弱くても確実に安定して少しずつ進んだほうが良いという人もいれば、被験者 9 の女性のように、多少の前輪浮上はほとんど気にならず、それよりも大いにアシストしてもらい楽に前に走れるものを好む人もいた。これは男女という性別に関係なく、男性でも両方の意見があり、女性でも両方の意見があった。結果的に、三つの評価点すべてにおいてバランスよく満足している手法 B を好む人が 5 人と最も多く、アシストトルクにリミッタをかける手法の有効性が示された。手法 A を好む人も 4 人おり、多少の前輪浮上は許容し、アシスト感の大きさに魅力を感じていたようである。安全第一の手法 C を最も好む人もいた。

7.1.4 アンケート評価実験に対する考察

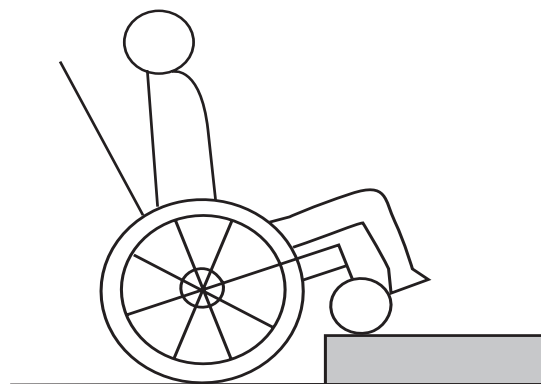
本アンケート評価実験からも、パワーアシストロボットのアンケート実験と同様、人間機械協調系における一つの設計指針が見えてくる。上述のように、操作者がどのようなことを最も重視し、どのようなことを機械に求めているかが全く違うことがわかる。今回のパワーアシスト車椅子の場合では、前輪浮上などの多少の危険性があっても、第一要求事項である「力の増幅」を最も要求する人もいれば、第二要求事項である「安定性、安心感」を最も重視する人もいる。どのような立ち上がりの速さを求めるかも人それぞれである。このように操作者の意向を制御系に反映させる必要性が見えてくるが、この点はパワーアシストロボットでの議論と重なるところがあり、人間機械協調系を設計する上での一つの指針となりうる。

7.2 後方転倒防止を考慮したウィリー動作の実現

第5章で述べたように、特にパワーアシスト車椅子においては段差を越える際に、図7.11(b)に示すような前輪を少しの時間浮上させるようなウィリー動作を実現させる姿勢制御が必要となる。多くのレストランやマンションの入口に、それほど大きくはないにしても段差が存在する。図7.11(a)がその例である。バリアフリー化を求める声が今日もなお叫ばれているが、それを待っていたのでは遅い。車椅子の高機能化の一つの要素として重要な項目である。



(a) 街角の段差

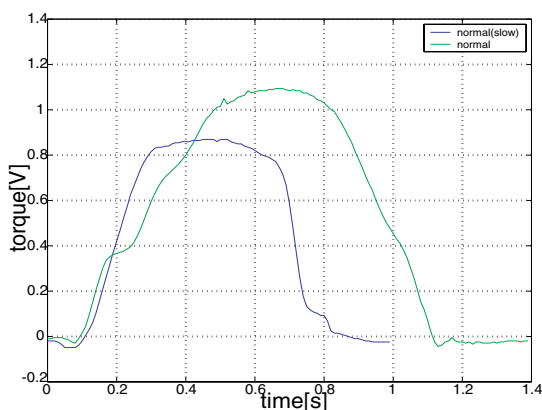


(b) ウィリー動作の様子

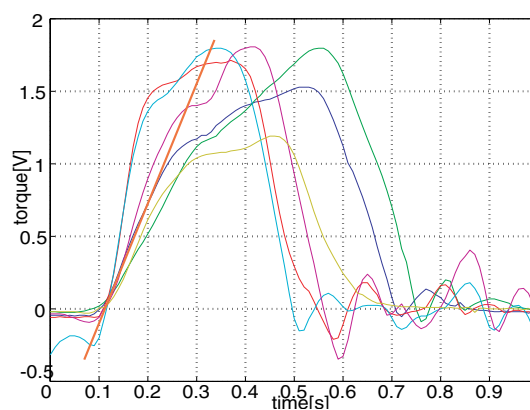
図 7.11: 車椅子のウィリー動作

7.2.1 操作者の入力トルクの解析

前節の後方転倒防止制御の議論においても示したが、通常の平坦地を走行する場合の操作者の入力トルクと後方転倒を起こす場合の入力トルクははっきりと異なる。操作者の入力トルクを計測した結果を、(a) 通常走行の際の入力トルク、(b) 後方へ転倒した際の入力トルクについて図7.12に示す。



(a) 通常走行の際の操作者入力トルク



(b) 後方へ転倒した際の操作者入力トルク

図 7.12: 操作者のトルク入力解析

この図からもわかるように、後方転倒を起こすような操作者の入力トルクは通常走行時に比べて、立ち上がりが速くその大きさも大きいことがわかる。段差を超えるために前輪浮上を起こそうとすると、操作者はその姿勢も少し調整する。最初はやや後方へ姿勢を傾け、ウィリーしやすくし、前輪が浮上したらそれ以上後方へ転倒しないように姿勢を前屈みに戻す。人間は自分の調整能力を発揮して、安全なウィリー動作を実現するためにそのような努力をしている。

しかしパワーアシスト車椅子の場合、操作者の入力トルクとともにモータによる大きなアシストトルクが発生するため、そのトータルのトルク量を調整することは難しい。長年パワーアシスト車椅子を使用して相当慣れている人であれば容易かもしれないが、使用する人はそのようなベテランばかりではなく、怪我をして一時的に使用する人や、あまり大きく姿勢変動ができない障害者の人、運動神経や反射神経がそれほど優れていない人などさまざまである。このことから、アシスト制御系の中でアシストトルクをうまく制御してウィリー動作の補助を行う必要性が浮かび上がってくる。

7.2.2 ウィリー動作の実現手法

パワーアシスト車椅子でウィリー動作を実現するための制御手法として、以下のようなものが考えられる。

<人間主体型ウィリー制御系>

これは操作者である人間が主体となり、車椅子の傾きを感じながら重心を移動させ傾きを調整しようとするときに、モータのアシストトルクが補助的に効果をもたらすような手法である。人間 - 車椅子系全体の重心位置を人間は体で知ることができる。補助動力は、その姿勢変化によるトルクと協調する形でウィリー動作を実現する。このように人間が主体的にウィリー動作を実現し、アシストトルクがさりげなく補助的にはたらくようなウィリー制御系を「人間主体型ウィリー制御系」と名付け、その構成を図 7.13 に示す。

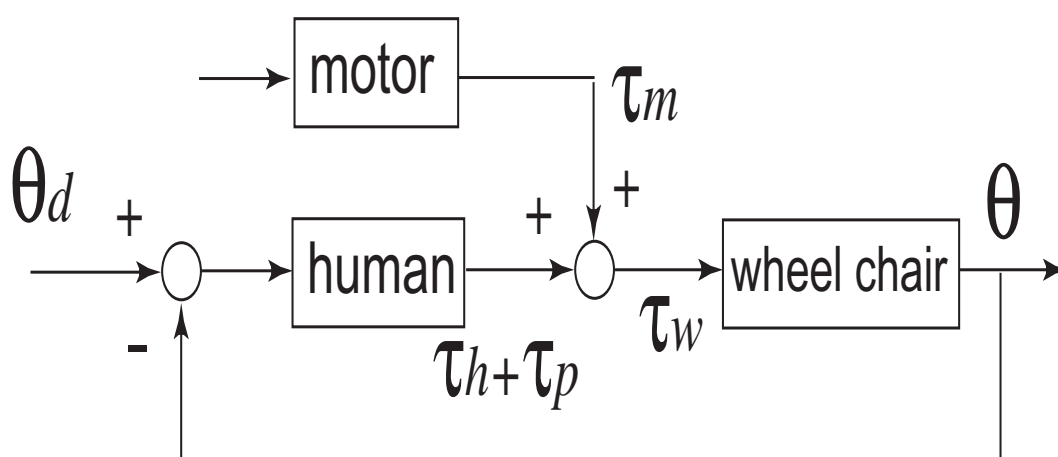


図 7.13: 人間主体のウィリー制御系

< 車椅子主体型ウィリー制御系 >

これは、車椅子の傾き ϕ をジャイロセンサ等で検出し、 15° 、 20° などと目標角度 ϕ_d を決めて、それに近付くようにコントロールする。このとき、図 7.14 のように、人間の姿勢変化や重心移動は外乱とみなされうる。このように車椅子自体が主体的にウィリー動作をしようとする制御系を「車椅子主体型ウィリー制御系」と名付ける。この手法の一つとして、後輪車軸をずらすという機械的手法と倒立振子モデルに基づく PI 制御を用いたウィリー制御が考えられている [61][62]。

これは、第 2,3,4 章のパワーアシストロボットの制御において議論した”人間と機械の距離”と似た議論であり、機械はあまり出しゃばらず、人間がもっている調整能力を大いに発揮させるか、それとも機械が人間側に歩み寄り、ある程度支配的に制御を行うかという二つの制御の考え方である。

ここで、操作者である人間がハンドリムを通して入力するトルクを τ_h 、姿勢を変えることによるトルクを τ_p 、パワーアシスト車椅子のモータが出すトルクを τ_m 、それら車椅子にかかるトータルのトルクを τ_w 、操作者と車椅子全体の重心位置とそのウィリー時の目標値を θ 、 θ_d 、車椅子の傾きとそのウィリー時の目標値を ϕ 、 ϕ_d としている。 θ は人間の姿勢変動なども含めた上での全体の重心位置を示し、 ϕ は人間の姿勢にかかわらず車椅子自体の傾きを表すため区別した。

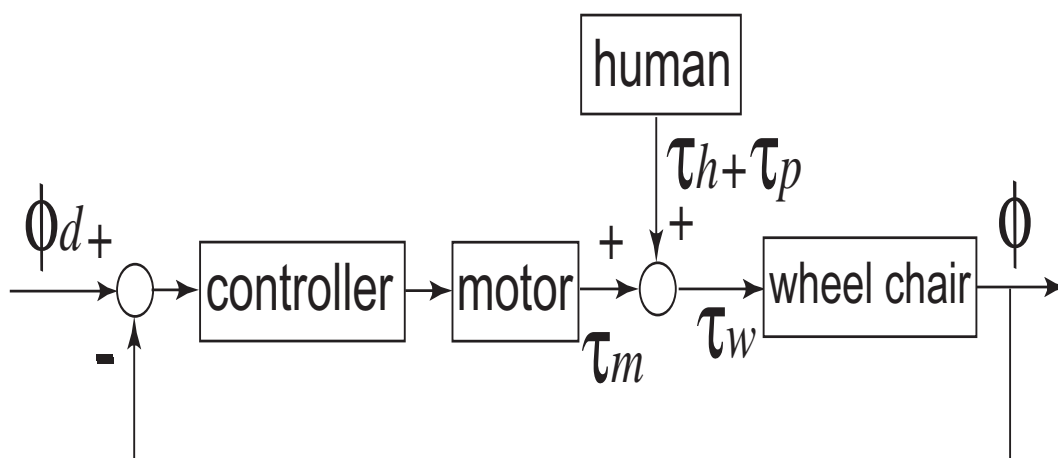


図 7.14: 車椅子主体のウィリー制御系

このウィリー制御に関する研究例はほとんどないが、後者の手法の一つとして、後輪車軸をずらすという機械的手法と倒立振子モデルに基づく PI 制御を用いたウィリー制御法 [61][62] が考えられている。

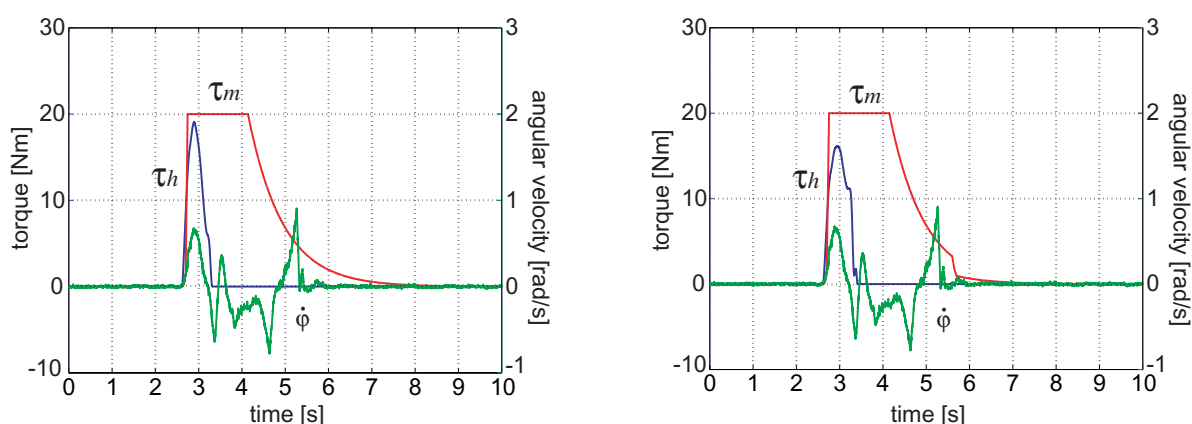
7.2.3 入力トルク制限による後方転倒防止の実現

操作者の入力トルクを解析した結果からもわかるように、その入力トルクの立ち上がりや大きさが前輪浮上と後方転倒現象に大きく影響していることがわかる。ウィリー動作のように、少しだけ前輪浮上をしてそれ以上後方へ転倒せず着地するという動作の実現を考えたとき、アシストトルクはある程度速い立ち上がりをして前輪浮上を補助し、その後アシストトルクの大きさを制限することで後方まで転倒させないという実現手法がわかりやすい。アシストトルクの立ち上がりを遅くしてしまうと、操作者が相当の入力トルクを加え、かつ大きな姿勢変動を起こさないと前輪浮上すら起きないと考えられる。このような考え方に基づくウィリー動作実現のための制御手法は式 (7.3) のように表される。

$$\begin{cases} \tau_m = \alpha\tau_h & \text{if } \tau_m < \tau_{lim} \\ \tau_m = \tau_{lim} & \text{if } \tau_m \geq \tau_{lim} \end{cases} \quad (7.3)$$

この手法は、上述の二つのウィリー実現手法のうちの「人間主体型ウィリー制御系」にあたる考えられ、アシストトルクはあくまで、速い立ち上がりによって前輪浮上を誘発させ、リミッタにより後方転倒の可能性を減じて安全性を高めているだけのさりげない役割である。

ここで、アシストトルク τ_m を制限する制御手法を用いてウィリー動作を行った実験の結果を図 7.15 に示す。基本となるアシスト手法は前章で示したトルク制御ベース手法であり、その時定数は $\tau_1 = 0.08[s]$, $\tau_2 = 0.8[s]$ 、アシスト比は $\alpha = 4.0$ 、アシストトルクのリミッタの値を $\tau_{lim} = 20[Nm]$ としている。この τ_{lim} の値は前節の後方転倒防止制御における評価実験と同じ値である。



(a) 右輪のトルクと浮上角速度

(b) 左輪のトルクと浮上角速度

図 7.15: トルクリミッタによるウィリー動作の実現

アシスト比 α だけ増幅したアシストトルクをそのまま出す場合は、操作者は自分の加えたトルクとの総和を調整する必要があり、この感覚を習得することは難しい。しかしトルクリミッタによりアシストトルクに制限をもうける場合は、操作者の入力トルクが多少強

7.2 後方転倒防止を考慮したウィリー動作の実現

くても、リミッタ以上はアシストされないため、操作者にその微妙な調整能力を要求することなく、安心感を与えることになる。

このような人間主体型のウィリー制御系では、ウィリー動作が成功するかしないかは人間の調整能力に依存する部分が大きく、ある程度慣れることも必要であると考えられる。しかし、ジャイロ等を用いて位置制御を行うような車椅子が支配的なウィリー制御系よりも、より自然で人間に優しいパワーアシスト車椅子であると言えるかもしれない。

7.2.4 被験者を用いたウィリー動作実験

リミッタをもうける後方転倒防止効果を確認するため、アシストトルクに何の制限ももたない手法とリミッタをもうける制御手法それぞれについて、20代の男女3人の被験者を用意し、それぞれ8回ずつウィリー動作を試み、どれほどの割合で成功するかを調査する。用意した段差の高さは約6cmである。各手法の詳細は以下のとおりである。当然、各制御手法の詳細は被験者に一切知らせていない。

手法A：通常のアシスト制御手法

$$\text{アシスト比} : \alpha = 4.0, \text{時定数} : \tau_1 = 0.08[\text{s}], \tau_2 = 0.8[\text{s}]$$

手法B：トルクリミッタによる後方転倒防止制御手法

$$\text{アシスト比} : \alpha = 4.0, \text{時定数} : \tau_1 = 0.08[\text{s}], \tau_2 = 0.8[\text{s}], \tau_{lim} = 20[\text{Nm}]$$

被験者を用いたウィリー動作の実験の様子を図7.16に示す。



図 7.16: ウィリー動作実験の様子

7.2 後方転倒防止を考慮したウィリー動作の実現

以下の表に、各被験者がウィリー動作に成功したか、あるいは失敗したかについて示す。ここで失敗と判定する動作は、段差を超えるほど前輪が浮上せず段に激突する場合や、逆に前輪が浮上しすぎて後方へ転倒しかかり、車椅子についている転倒防止バーが地面に触れる場合を意味する。各記号の示す意味は以下のとおりである。

- : ウィリー成功
- △ : 転倒防止バーが地面に接触 (失敗)
- × : 段に激突 (失敗)

被験者	手法	1	2	3	4	5	6	7	8
1(男)	A	×							
	B	×		×					×
2(男)	A								
	B	×							
3(女)	A					×		×	
	B	×							

各手法でウィリー動作による段差超えが成功した確率を以下の表に示す。

	手法 A	手法 B
被験者 1(男)	12.5%	62.5%
2(男)	12.5%	50%
3(女)	37.5%	87.5%

いずれの被験者においても、アシストトルクを制限した結果、段差超えのための安全なウィリー動作を成功する確率が上がっていることがわかる。制限をしない手法でも全く成功しないわけではなく、制限をする手法で全て成功するわけでもない。しかし、明らかにリミッタによる効果がこの被験者評価実験の結果によって確認されている。

例えば被験者 3 の場合、アシストトルクに制限をもうけない手法では、あまり力をいれずに段に激突し失敗した後、今度はその反省から力を強くしたがその結果後方へ転倒しかかり、また次には力を抜きすぎて段を超えられない、という悪循環となっている様子が表から見てとれる。被験者 3 は女性であったが、体重も軽く入力するトルクも男性ほど大きくないためスムーズに段差を超える動作ができていた。

評価実験後に感想を聞いたが、何の制限も施さないアシスト手法は前輪を浮かせる一連の動作において力の加減がしにくく、調整が難しいとのことであった。しかしアシストトルクに制限をもうける手法では、調整もしやすく安心感があったという意見が聞かれた。

これらの結果から、アシストトルクの立ち上がりはある程度速くし前輪浮上を誘発し、その大きさのある値で制限して後方転倒の危険性を減じるという制御手法で、段差を超えるためのウィリー動作を安全に実現できる可能性が大きくなることがわかる。当然、操作者自身がどれほどトルクを入力し、どのような姿勢変動をすればよいかを慣れによって習得していけば、さらに安全なウィリー動作の実現が可能となる。人間と機械の距離という観点から考察すれば、このリミッタをもうける手法は操作者である人間に高度の調整能力を發揮させず、多少トルクを加えすぎても後方へ転倒する危険性のある程度回避する保証をしているため、機械が人間側にいくらか歩み寄ったような制御系であると考えられる。もちろん浮上角度を測定して位置制御をするような場合ほど機械が支配的ではないと言える。

7.3 まとめと今後の課題

7.3.1 本章のまとめ

本章では、段差を超える際のウィリー動作や上り坂などでの後方転倒防止走行など、実用場面で必ず遭遇することになる様々な走行場面に対応するためのパワーアシスト車椅子の多機能制御法について実験的に検討した。最初に、平坦地や上り坂などで問題となる後方転倒を引き起こす前輪浮上現象に対し、これを防止するためのアシスト制御手法を検討し、多くの被験者を用いたアンケート実験で各手法の有効性や特徴を見出した。次に、段差超えの際に必要なウィリー動作を安全に実現するためのアシスト手法として、同様にリミッタをもうける手法を検討し、被験者評価実験により有効性を確認した。ともにアシストトルクにある制限をもうけるのみの簡単な制御系であり、人間が調整能力を大いに發揮し、主体的に動作を実現するような手法であり、機械が支配的に人間を制御してしまうような手法に比べて、より自然で人間に優しいパワーアシスト車椅子になると言えるかもしれない。

実際に起こりうる走行場面での問題点とそれを解決するための新しい制御方法を見出し、多くの被験者を用いた実験的検討を行うとともに、あまり検討されてこなかった観点から操作者である人間の意向や精神的要素にまで議論を広げ、人間機械協調系の制御系設計という点においての一つの指針を見出すことができたことが本研究の大きな成果であり、これらのことが今後の電動パワーアシスト車椅子の高機能化と普及に貢献するところは少なくないと考えている。

7.3.2 今後の課題と可能性

本章で議論した車椅子の後方転倒防止制御においては、一種の倒立振り子モデルの議論が前輪が浮上したときに適用できる。この考えをベースに人間 - 車椅子系全体での重心位置の推定や、その位置制御による後方転倒防止制御が可能となるかもしれない。これは、前

輪が浮上することは許容し、浮上してからそれを戻すような対策を行うという考え方である。本研究で検討したアシストトルクリミッタや時定数調整という方法が、機械はさりげなく防止効果を助けるだけであり、ある意味で人間主体の制御手法であるのに対し、それら倒立振子モデルによる位置制御などは、機械がある程度支配的に後方転倒を抑止するような機械主体の制御手法であると言える。先ほども議論したが、これらのうちでどちらを用いるのがいいかという判断は、その操作者の意向や走行場面にもかかってくる。今後このような点についても検討したい。

また、パワーアシスト車椅子の操作者となるのは、怪我をして一時的に使用する若い人や、障害をもって長い期間使用することになる人、足の弱ったお年寄りなど、さまざまである。今回行ったアンケート評価実験では、20代から50代の男性女性を対象にしたが、実際の高齢者や障害者に使ってもらってさらに検討することも今後の課題としたい。

本章で行ったような、実際の走行場面に対応するためのパワーアシスト車椅子の多機能制御は不可欠であり、さらなる高機能化を目指して研究を進めていきたい。

第8章 高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた人間の異常動作検出

8.1 カメラを用いた高齢者モニタリングシステムの提案

本章では、高齢者の部屋をカメラでモニタリングし、普段と違う非日常的な動きを検出する「高齢者モニタリングシステム」の実現を目指す。1995年の阪神淡路大震災の後、仮設住宅において一人暮らしの高齢者が孤独死し、何日も経ってから発見されるというニュースがあった。また、一人で暮らせるほど元気な高齢者でも自宅でいつどんなアクシデントが起こるかわからない。例えば脳卒中や心筋梗塞などの病気で急に倒れたり、あるいは家の中の段差で転倒したり、浴槽で溺死したりする人は多く、家庭内の不慮の事故による高齢者の死者数は、交通事故による死者数を上回っている(厚生省調べ [63])。

高齢者の部屋をカメラでモニタリングし、普段と異なる様子を自動的に検出するシステムが実現できれば、すぐに家族や医療機関、福祉施設に通報でき、図 8.1 のようなネットワークを利用して高齢者を社会全体で守っていくためのケアシステムの中で大変有意義なものになる。

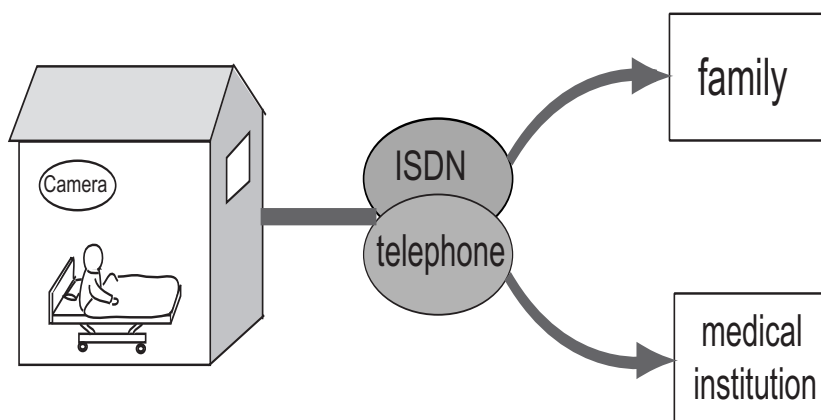


図 8.1: 高齢者モニタリングとケアシステム

地域社会のつながりも薄れていく中で、このような高齢者たちを守っていくために ISDN などを用いたネットワーク作りが NTT やその他の企業で進められている。例えば図 8.1 の

ように高齢者とその家族、医療機関をネットワークで結び、TV 電話などでコミュニケーションを円滑化するというものがある。映像や音声だけでなく体温、血圧などのバイタルサインなどが伝送されるものもある。

もしこのような異常検出システムが実現されれば、高齢者モニタリング以外にも、例えば工場で動く産業用ロボットや交通状況の監視、病室の患者のモニタリング、防犯カメラへの適用など多くの可能性が考えられる。

8.2 モニタリングシステムの必要性と背景

一人で暮らせるほど元気であっても、高齢者の場合はどんなアクシデントが突然起きるかわからない。脳卒中や心筋梗塞などの病気で急に倒れたり、また家の中の段差で転倒したり、浴槽の中などでの不慮の事故で死亡したりする人は多い。図 8.2 は年齢別の死亡原因に関する統計であるが、65 歳以上の高齢者については家庭内での不慮の事故による死者が交通事故による死者を上回っている。

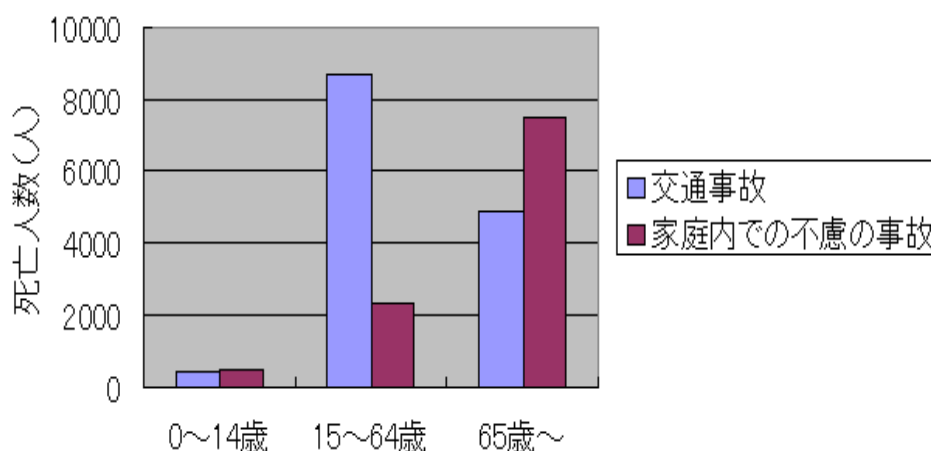


図 8.2: 交通事故と家庭内の不慮の事故による年齢別死亡数および百分率 (厚生省調べ [63]、平成 9 年)

家庭内での不慮の事故について具体的に見てみると、表 8.1 のように転倒・転落、浴槽での溺死・溺水、不慮の窒息などが原因となるものが多い。一人暮らしではこのような事故が起こったときに速やかな対応をとることが不可能である。

今後高齢化と核家族化が進み、一人暮らしの高齢者は多くなると予想されるが、一方、それぞれの家を訪問するヘルパーの数には少子化の影響もあり限界がある。

表 8.1: 家庭内の不慮の事故の種類別に見た 65 歳以上の高齢者の死亡数および百分率 (厚生省調べ [63], 平成 9 年)

死亡原因	65 ~ 79 歳		80 歳以上	
	死亡数 (人)	百分率 (%)	死亡数 (人)	百分率 (%)
総数	3549	100	3934	100
転倒・転落 (同一平面、階段、ステップ 等における転倒・転落)	661	18.6	753	19.1
不慮の溺死および溺水 (浴槽内および浴槽への転落 による溺死、溺水等)	1208	34.0	1192	30.3
その他の不慮の窒息 (胃内容物の誤えん、気道閉 塞を生じた食物の誤えん等)	1067	30.1	1492	37.9
煙、火及び火炎への曝露	356	10.0	317	8.1
熱及び高温物質との接触	54	1.5	71	1.8
有害物質による不慮の中毒 及び有害物質への曝露	89	2.5	39	1.0

8.3 カメラ画像による高齢者の異常動作検出

高齢者のモニタリングに関する研究例として、我々が提案するような異常検出を主目的としたモニタリングとは別に、赤外線センサやおいセンサ、ガスセンサ等を用いて高齢者のふるまいを同定し、別居家族がおおまかな行動状況を把握することを目的としたモニタリングが考えられている [64][65][66][67][68][69][70][71][72]。これらの研究では、高齢者にとっては、センサを通してどこかで誰かが自分の生活を見守ってくれているという安心感を得ることが可能であるとしている。

一方、本研究のように、異常検出を主目的としたものには、24 時間健康状態を監視する

ために動脈血流を長時間連続的にモニタリングできる指輪センサ [73]、徘徊老人が屋外に進出したことを検知するシステム [74]、FG 視覚センサをトイレ室内に設置し、気を失うなどの危機的状況を早期発見する監視システム [75] などの研究例がある。また、リアルタイムでの異常検出ではないが、傾斜センサを用いて転倒の頻度やその時刻を長時間計測するための老人転倒モニタの開発 [76] なども行われている。さらに医療方面への応用例として、就寝時の映像を解析し、突然死や無呼吸症候群を早期に発見することを目指した呼吸モニタリングシステムも研究されている [77]。

文献 [78] は、行動パターンをモニタリングし、非日常的な行動を検出するという本稿と同様の目的意識のもと、HMM を用いた手法を提案しているが、全方位センサを用いている点で本稿と異なっている。

これまで特に企業を中心に、実用化に向けて異常検出システムが考えられてきたが、以下のようにそれぞれ多くの問題点が存在する。

- カメラを設置して、介護者がモニタ画面を見る
介護者が常に見ている必要があり、特に夜間では負担が大きい。
- 送信機等を内蔵したペンダントを携帯させて行動を把握
外されると機能しない
- ベッド、照明、ドア、水道など部屋のあちこちにセンサを設置して様子を把握する
システム全体が大きなものとなり、コストも高くなり、容易に設置できるとは限らない

急激に高齢化が進む中で、できるだけ安価で設置しやすい装置を用いて異常検出を実現することが求められる。そこで、提案する異常検出システムは CCD カメラやテレビ電話のカメラをノートパソコン等につないだような安価で簡単なシステムを想定している。カメラを用いることで素早い検出が可能であり、通報があったときには画像によって正確に状況が把握でき、適切な対応ができる。

本論文では、日常的な動作・行動パターンの学習をした後、それに基づき非日常性検出を行うという一連の画像処理アルゴリズムを提案するが、モニタリングシステム全体として以下のような特徴をもつ。

1. 玄関やベッド、食卓の位置など、モニタリングする部屋に関する知識、また起床就寝時間や高齢者特有の行動特性のような人間行動学、心理学的な知識などはいっさい与えず、普段の様子を学習する。
2. システムは、高齢者が寝ている、トイレに行ったなどと動作の意味を理解することはなく、単に動作 A,B,C,・・・などと分類するだけである。これはプライバシー保護にもつながる。

3. システムはある程度誤報があってもかまわない。それにより家族や医療機関とある程度の頻度でコミュニケーションをとることになればいいからである。

以上のように、カメラによる異常動作検出システムを実現するという、これまであまり例のなかった試みに対して、本研究は、基礎的研究としてその意義や位置づけを明確にするとともに、異常動作検出のための一手法を提案するものである。

8.4 画像系列を用いた人間の動作解析

8.4.1 人間の動作解析法の例

画像系列から人間の動作、ジェスチャーを認識する研究はこれまで多く行われている。例えばDP マッチング [79][80]、HMM[81][82]、Temporal Template[83] を用いたものがある。しかし本研究では、動作のパターン認識が主目的ではなく、学習パターンと異常パターンとの差異をいかに表現するかが重要な問題となる。

8.4.2 カメラで検出できる非日常性の分類

高齢者モニタリングを考えた場合について、カメラで検出できる非日常性を以下の4つに分類する。

(Ab-1) 学習画像にない動き

例えば急に倒れる動作など、学習したどの画像とも異なるようなものは異常と判断する。

(Ab-2) 動きの速さ

高齢者は普通ゆっくり動くはずであるので、ものすごく速い、あるいは遅い動きがあれば異常と判断する。例えば階段ですべり落ちる事故や他人(泥棒など)が侵入してきた様子はその速さで検出できる。

(Ab-3) 動きの方向

これは特に、工場で動くロボットや交通状況の監視で役立つ要素である。

(Ab-4) 行動パターン

例えば真夜中に外出したり、一日中寝ていたりするような、普段と異なる行動パターンも検出しなければならない。

8.4.3 固有空間法による画像間の距離の抽出

本研究では、動作の分類や異常検出において、画像間の距離をもって判断する。画像間の距離を抽出するために、画像間相関の計算と画像データの圧縮に優れた性質をもつ固有空間法 [84][85] を用いる。これは主成分分析 [86] の考えに基づいており、多数の多次元デー

タから主要な成分を抽出し、データがもつ情報を縮約した本質的な低い次元軸で表現する手法である。この方法により、パターン認識による動作の分類も可能であり、これまで顔画像認識にも応用されている [87]。また、非日常的な動きの画像は学習画像との相関が低いものであると考えたとき、画像間の距離によって異常検出が行える。

固有空間法

ここで、固有空間法を画像データに適用する場合の原理について述べる。1枚の静止画像を、次元 N の画像ベクトル $\mathbf{y}_i (i = 1, \dots, I : I \text{ はサンプル数})$ で表す。各要素は各画素の濃度値を表している。

$$\mathbf{y}_i = [y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, \dots, y_N^{(i)}]^T \quad (8.1)$$

全サンプル画像ベクトル $\mathbf{y}_i (i = 1, \dots, n)$ の平均 \mathbf{c}

$$\mathbf{c} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \mathbf{y}_i \quad (8.2)$$

を計算し、次に各画像ベクトルから平均 \mathbf{c} を差し引き、行列 \mathbf{Y} を求める。

$$\mathbf{Y} \equiv [\mathbf{y}_1 - \mathbf{c}, \mathbf{y}_2 - \mathbf{c}, \dots, \mathbf{y}_n - \mathbf{c}] \quad (8.3)$$

このとき、画像集合の共分散行列 \mathbf{Q} は式 (8.4) で表される。

$$\mathbf{Q} \equiv \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T \quad (8.4)$$

固有空間 (例えば k 次元) は、次の固有方程式

$$\lambda_i \mathbf{e}_i = \mathbf{Q}\mathbf{e}_i \quad (8.5)$$

を解き、 k 個の大きい固有値 ($\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_k \geq \dots \geq \lambda_K$) に対応する固有ベクトル ($\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_k$) を基底ベクトルとすることにより得られる。十分小さい固有値を無視することで、サンプル画像の次元を落とすことが可能となる。有効な次数の決定には、式 (8.6) の固有値寄与率 W_k と適当なしきい値 T_s を用いる。しきい値 T_s には 0.8 や 0.9 という値が用いられることが多い。

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^K \lambda_i} \geq T_s \quad (8.6)$$

ここで1枚の画像 \mathbf{y}_i (次元 N) は、式 (8.7) により次元 k の固有空間ベクトル (固有空間上の1点) へ投影される。

$$\mathbf{z}_i = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_k]^T (\mathbf{y}_i - \mathbf{c}) \quad (8.7)$$

固有空間法による画像間距離の抽出

固有空間は画像間の相関値が空間上の距離値に対応するため、画像間相関の計算に対して優れた性質をもっている。

このことは数学的に容易に示すことができる [88]。ある 1 枚の画像は固有空間上のある 1 点に投影される。ここで、2 枚の画像 \mathbf{x}_m 、 \mathbf{x}_n とそれに対応する固有空間上の点 $\mathbf{g}_m (= [g_{m1}, g_{m2}, \dots, g_{mk}]^T)$ 、 $\mathbf{g}_n (= [g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nk}]^T)$ を考える。画像 \mathbf{x}_m は固有ベクトルを用いて、

$$\mathbf{x}_m = \sum_{i=1}^K g_{mi} \mathbf{e}_i \simeq \sum_{i=1}^k g_{mi} \mathbf{e}_i \quad (8.8)$$

と近似的に表現される。部分空間の次元 k の値を全空間の次元 K に近づける程近似精度は高くなる。この関係を用いることにより、固有空間上の 2 点間の距離 $\|\mathbf{g}_m - \mathbf{g}_n\|$ の 2 乗は、

$$\begin{aligned} \|\mathbf{g}_m - \mathbf{g}_n\|^2 &= \left\| \sum_{i=1}^k g_{mi} \mathbf{e}_i - \sum_{i=1}^k g_{ni} \mathbf{e}_i \right\|^2 \\ &\simeq \|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_n\|^2 \end{aligned} \quad (8.9)$$

と近似される。また、各画像のエネルギーは大きさ 1 に正規化されているので、式 (8.10) が成り立つ。

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_n\|^2 &= (\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_n)^T (\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_n) \\ &= 2 - 2\mathbf{x}_m^T \mathbf{x}_n \end{aligned} \quad (8.10)$$

式 (8.9), (8.10) により、

$$\|\mathbf{g}_m - \mathbf{g}_n\|^2 \simeq 2 - 2\mathbf{x}_m^T \mathbf{x}_n \quad (8.11)$$

の関係が導かれる。つまり、画像間の相関 $\mathbf{x}_m^T \mathbf{x}_n$ が高ければ、それに対応する固有空間上の点間距離 $\|\mathbf{g}_m - \mathbf{g}_n\|$ は小さくなるような順序関係が保たれていることがわかる。

空間上の距離が小さいということはその 2 枚の画像の相関が高いことであり、画像の分類に用いることができる。また距離が大きいということは相関が低いことであり、学習画像との比較で異常性を検出できる。

固有空間法を用いた画像認識について、主な性質をいくつか挙げる [85]。

(1) 固有空間はグローバル特徴

この方法は、画像全体のグローバルな情報を用いて照合する手法で、多少の雑音や物体の欠損は画像全体で平均化される。つまりそれらに対してロバストである。一方、物体が半分程度他の物体に隠されていたりすると画像の照合が困難になる。

(2) 固有空間法は視点の移動にはやや不得意

固有空間法はもともと 2 次元モデルであるため、物体の位置や向きの移動、あるいは視点の移動に対しては不得意である。これを解決する方法として後述のパラメトリック固有空間法があり、さまざまな方向から見た画像を固有空間中の多様体で表現したりする。

(3) 固有空間はブラックボックス

固有空間法は認識の問題をあまり細かい部分問題に分けずに認識の問題を解こうとするアプローチであり、最終ゴールにはより近いものとなっている。つまり固有空間法は一つのブラックボックスである。この手法はそこそこにはうまく動作するものの、一方で処理の内部構造が明らかでないために、エラーが発生したときにその原因を解析、あるいは説明しにくいなどの問題点もある。例えば、固有空間の固有ベクトルの物理的な意味もあまりはっきりしたことが言えない。

以上のような性質をもつ固有空間法を用いて、高齢者の動作の分類や異常な動きの検出を行う。

本研究では、背景画像から人間の領域を抽出した2値画像を固有空間法に適用する。例えば図8.3のような3種類の画像集合(各10枚、計30枚)を用いると、図8.4のように各画像の投影点が3箇所に分かれる固有空間が構築される。

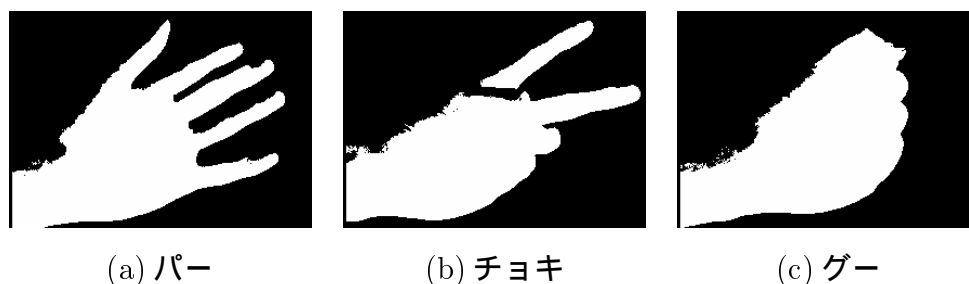


図 8.3: 3種類の学習画像

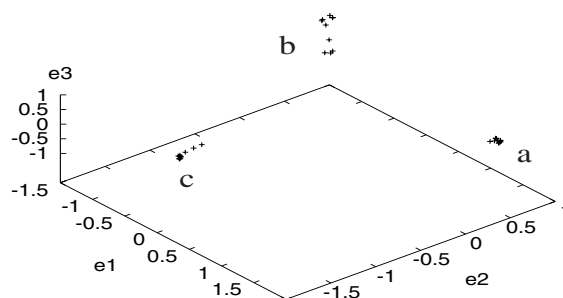


図 8.4: 図 8.3 の画像からつくった3次元固有空間

ここで、2枚の画像 y_m, y_n が固有空間上の2点 g_m, g_n にそれぞれ投影されるとすると、その画像間の相関 $y_m^T y_n$ が大きければ固有空間上の2点間距離 $\|g_m - g_n\|$ は小さくなるということが数学的に示されている [84]。また、数万次元の画像データが数次元(例えば3次元や4次元)ベクトルで表現されるため、4桁ものデータ圧縮が可能である。よって、固有空間法は

画像間相関の計算と画像データの圧縮において非常に優れた性質をもっているといえる。本研究では、学習にない異常な動作の画像は、学習画像との相関が低いと考え、学習画像の投影点との距離を測ることで異常性を検出する。

パラメトリック固有空間法

向きや大きさにおける連続的な画像の変化を考えた場合、連続する画像間の相関は高くなるため、その画像系列に対応した固有空間上の点集合は図 8.5 のようにスムーズな軌跡を描くことになる。

これは、固有空間法を発展させた手法としてパラメトリック固有空間法 (PEM)[84][89][90][91] と呼ばれる。パラメトリックに変化する画像を固有空間中の多様体で表現しようとする手法であり、パラメータとして対象物体のポーズ、光源の位置、時間などを用いることで [84][89][90][91]、さまざまなパターン認識が可能となる。

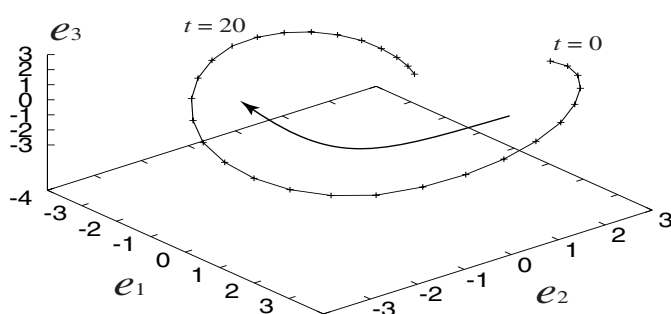


図 8.5: パラメトリック固有空間法

8.4.4 固有空間法における学習パターン数について

ここで、画像ベクトルのサイズ、すなわち特徴空間の次元数と学習パターン数との関係について述べる [92]。

学習パターン数 n を一定にしたまま特徴ベクトルの次元数 d を増大させる場合を想定すると、パターンの分布は特徴空間上でまばらになり、統計的な信頼度が低下することは直観的に明らかである。学習パターン数が特徴空間の次元数以下、つまり

$$n \leq d \quad (8.12)$$

の場合、 d 次元の特徴空間を用意したにもかかわらず、実際は $(n - 1)$ 次元の空間しか利用しておらず、 $(d - n + 1)$ 次元分を無駄にしていることになる。例えば、3 次元の特徴空間を

考え、その中に学習パターンが3つしかなかったとする。これらのパターンは特徴空間上に一つの2次元平面を決定する。つまり特徴空間が3次元であるにもかかわらず、パターン数が少ないために2次元平面上の分布にとどまっていることになる。したがって、パターンの分布が特徴空間の中でその次元数に見合った広がりをもつためには、

$$n \gg d \quad (8.13)$$

でなくてはならない。

ところが、現実には特徴の次元数が数百から数千といった規模であるのに対し、サンプル数はせいぜいそれとほぼ同程度か、それより少ない数ですませる例が多い。にもかかわらず、上述したようなことがあまり問題にならないのはなぜか。

その理由は、我々が用意する高次元の特徴ベクトルには、気づかないうちに相関の高い特徴の組みが含まれることが多いということである。すなわち、特徴相互に強い相関がある場合には、次元数が大きくてもそれは見掛けだけで、実際はより少ない次元数でパターンが記述できることが少なくない。現実の問題としても、互いに独立な特徴を用意することは難しく、必ず相関をもってしまうという事情がある。本実験でも示すが、さまざまな画像系列に対し累積寄与率を解析したとき、その値は10, 20次元程度でほぼ90%に達し、何万次元もの特徴空間ではあっても、実際には低い部分空間にパターンが分布していることが分かる。そのような理由から、少数の学習パターン数であっても、求められる主軸は正しい方向にほぼ一致することとなる。

見かけ上の次元数は大きくても、実際はより小さな次元の空間にパターンが分布しているとき、この実際上の次元数を固有次元数と呼び、式(8.13)の d は見掛け上の次元数ではなく、この固有次元数と解釈すべきである。

8.4.5 非日常性検出の流れ

本研究では、固有空間法を用いて4種類の非日常性(Ab-1)~(Ab-4)を検出する。

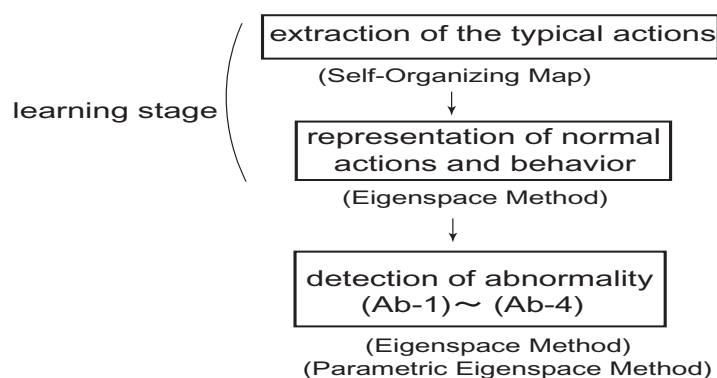


図 8.6: 非日常性検出処理の流れ

8.5 正常な動作パターンの学習方法

8.5.1 自己組織化マップを用いた代表的な動作の抽出

高齢者の行動パターンを考えた場合、食卓やベッドなど、ある場所に留まっている時間は、移動する時間に比べてはるかに多い。そのため画像中のある位置に留まっていることが多く、それら何種類かの類似した画像が多く見られるということになる。これらを代表的な動作として抽出する。

代表的な動作を自動的に抽出するための方法として、自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map)[93][94][95] を用いる。これは教師なし学習で、学習データをクラスタに分類する方法である。自己組織化マップを用いた学習のアルゴリズムを以下に示す。ただし、図 8.7 のような Kohonen ネットワークを構成する 1 つの要素を「ユニット」と呼び、それぞれのユニットは、ネットワークへの入力データに対応する重みベクトルをもつとする。

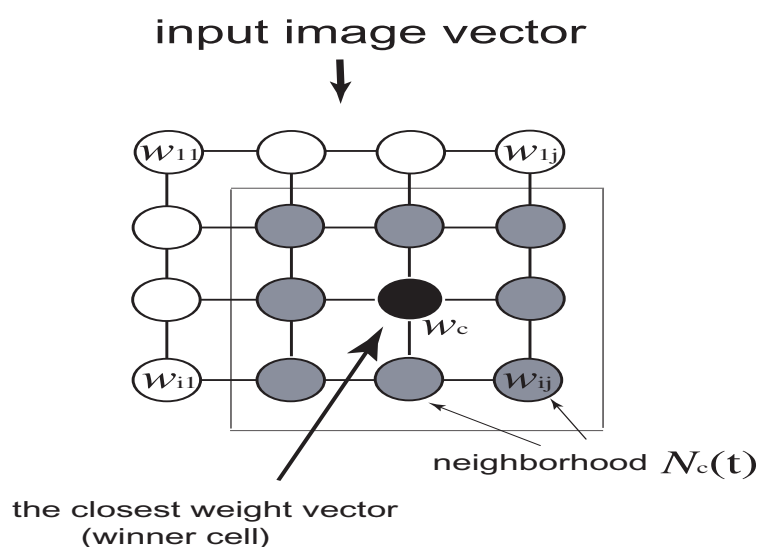


図 8.7: 2次元自己組織化マップ

[Step1] 初期化

各ユニットの重みベクトル $\{w_i, i \in \Omega\}$ をランダムに発生させる。

[Step2] 勝利ユニットを求める

入力ベクトル $x(t)$ ($t = 1, \dots, T$) に最も近い重みベクトル w_c をみつける。

$$\|x(t) - w_c\| = \min_i \|x(t) - w_i\| \quad (8.14)$$

[Step3] 勝利ユニットとその周辺ユニットの更新

Step2 で見つかった勝利ユニットと近傍 $N_c(t)$ に入るユニットの重みベクトルを式 (8.15)

で更新する。

$$\mathbf{w}_i := \begin{cases} \mathbf{w}_i + \alpha(t)(\mathbf{x}(t) - \mathbf{w}_i) & \text{if } c \in N_c(t) \\ \mathbf{w}_i & \text{if } c \notin N_c(t) \end{cases} \quad (8.15)$$

$\alpha(t)$ は学習係数である。

Step2に戻り、これを学習回数 $t = 1, 2, \dots, T$ について繰り返す。

学習データの中に類似したベクトルが多数ある場合には、それぞれ隣接した領域に集まり、非常に類似した重みベクトルとして浮かび上がってくる。逆に、類似するものが少ないようなデータが写像されるユニットの周辺では、学習される頻度が少ないので、隣り合った重みベクトルは大きく異なったものとなる。

2次元マップの場合の各クラスタを抽出するためのアルゴリズム [96] を示す。これは上述の性質を利用したクラスタリング手法で、非常に類似した重みベクトルをもつユニット集合を1つのクラスタとみなす方法である。近傍 $D(i, j)$ の重みベクトルとの距離を式 (8.16) で定義する。

$$d(i, j) = \frac{1}{|D(i, j)|} \sum_{(u,v) \in D(i,j)} (\mathbf{w}_{i,j} - \mathbf{w}_{u,v})^T (\mathbf{w}_{i,j} - \mathbf{w}_{u,v}) \quad (8.16)$$

この値が小さいものを見つけることで、学習頻度の高い画像ベクトルを抽出する。 $d(i, j)$ を2次元のユニットすべてについて求めたものをクラスタマップとよぶ。

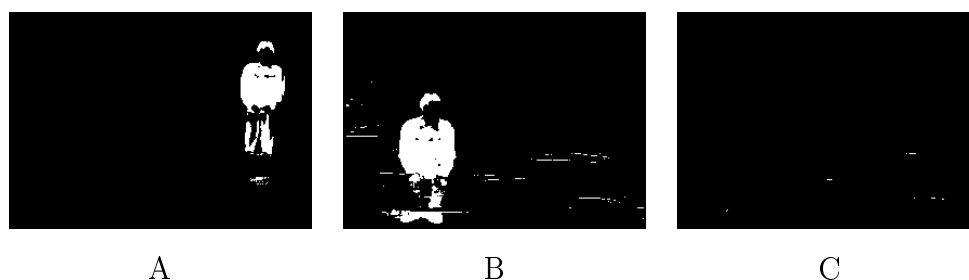
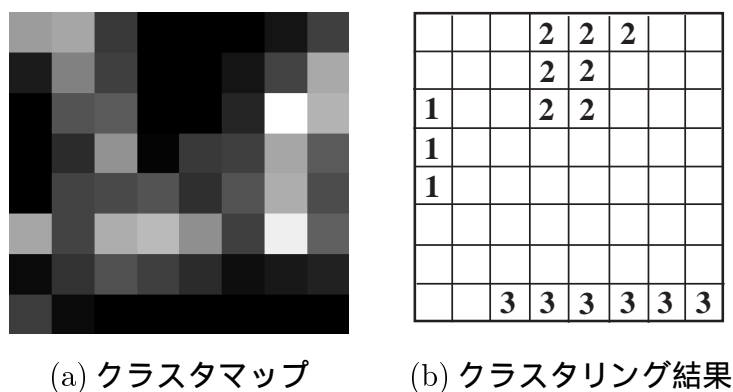


図 8.8: 3種類のサンプル画像

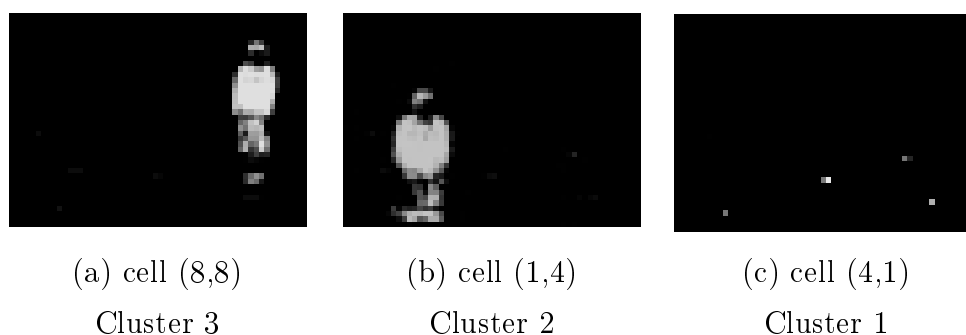
例えば図 8.8 のような3種類の代表的な画像を含む系列 (240 枚) を自己組織化マップで学習するとする。各画像は、A : 画面右端に立っている、B : 画面左下で椅子に座っている、C : 外出中であつたり、お風呂やトイレに行つて画面に映っていない、を表している。クラスタマップとクラスタリング結果は図 8.9(a),(b) のようになり、3種類の画像が抽出できる。なお、クラスタマップは、各ユニットにおける $d(i, j)$ の値を画素値とする画像で表現した。



(a) クラスタマップ (b) クラスタリング結果

図 8.9: 代表的な画像の抽出

$d(i, j)$ の値が小さい 16 個のユニットに対してラベルづけを行ったが、各クラスタの重みベクトルを画像で表現すると図 8.10 のようになる。



(a) cell (8,8) Cluster 3 (b) cell (1,4) Cluster 2 (c) cell (4,1) Cluster 1

図 8.10: 各クラスタの重みベクトル

8.5.2 固有空間法による動作の分類

自己組織化マップにより抽出した代表的な動作の画像ベクトル、つまりクラスタマップでラベルのついたユニットの重みベクトル 16 個から固有空間を構築すると図 8.11 のようになる。3 種類の動作を分類できる固有空間がつけられていることがわかる。これにより学習画像全てから固有空間をつくり、その投影点をクラスタリングする場合のように膨大な計算をする必要はなくなる。

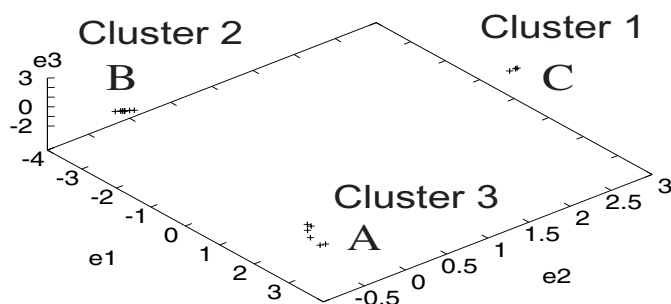


図 8.11: ラベルのついた 16 個の重みベクトルからつくった 3 次元固有空間

入力画像はこの固有空間上に投影され、動作の分類が行われる。図 8.12 は全学習画像を式 (8.17) により空間上に投影した結果を示す。

$$z(t) = [e_1, \dots, e_k]^T (y(t) - c) \quad (8.17)$$

A から B へ移動すると、固有空間上では A から B へ直線的には移らず、いったん C を経由する。これは A と B の間の領域では固有ベクトルが 0 であり、式 (8.17) を計算しても何も映ってない画像を投影したのと同じになるからである。

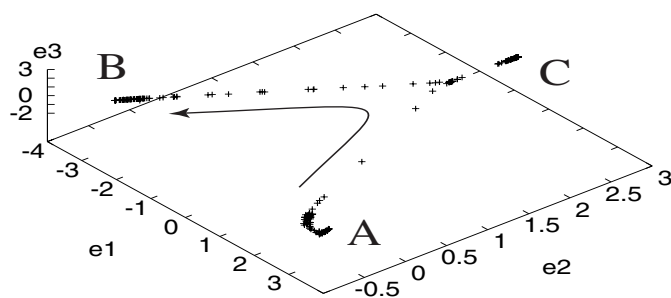
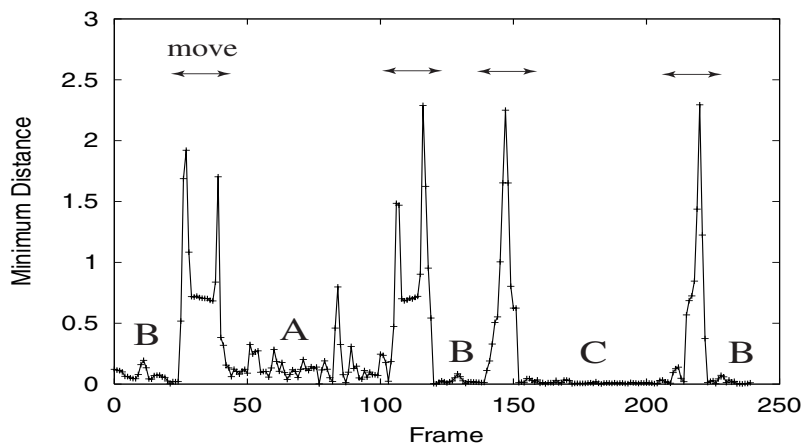


図 8.12: 全学習画像の投影

これらの投影点に対し、16 個の投影点との最小距離

$$d_1 = \min_i \|z(t) - f_i\| \quad (8.18)$$

を求めることで動作 A, B, C と分類する。図 8.13 は全学習画像を固有空間上に投影し最小距離 d_1 を求めた結果である。

図 8.13: 3次元固有空間上での最小距離 d_1

A,B,Cのいずれかの動作をしているときは最小距離 d_1 は小さい。一方、AからB、BからCへと移動しているときは、 d_1 は大きくなる。このことを用いて高齢者が移動しているときの画像も抽出することができる。

8.5.3 2段階固有空間法による動作解析

異常を検出する際、寝ている、食事している、歩いているなどの動作それぞれで詳しい解析を行うため、動作の行われる画像中の局所的な領域に固有空間法を適用することにする。固有空間法は画像のグローバルな特徴をとらえる手法であるので[85]、局所領域での解析が有効である。

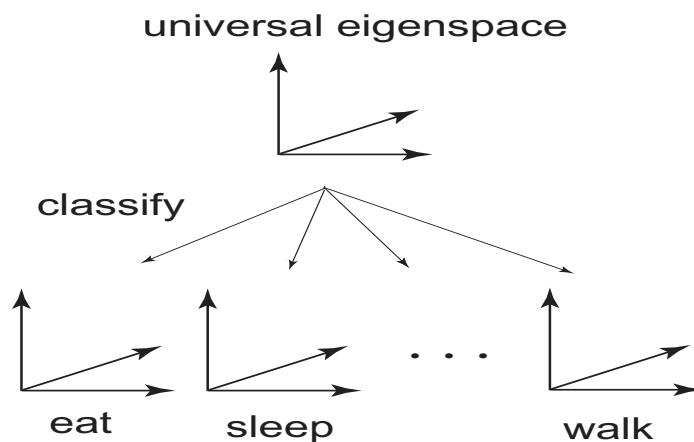


図 8.14: 2段階の固有空間法

つまり、図8.11のような1段階目の固有空間(以後、ユニバーサル固有空間とよぶ)上で動作の分類を行い、2段階目の動作ごとの固有空間上でそれぞれ詳しい解析を行うという、2段階の固有空間法で動作の分類、異常動作検出を実現する。

8.5.4 動作ごとの注目領域の決定方法

動作ごとの注目領域の決定には、動作の分類に利用した自己組織化マップの重みベクトルを用いる。人間の領域が中心に来るような領域をもうけるため、濃淡値を重みにした加重平均をとって中心画素を計算する。その後、中心画素から徐々にウィンドウを広げていき注目領域を決定する。

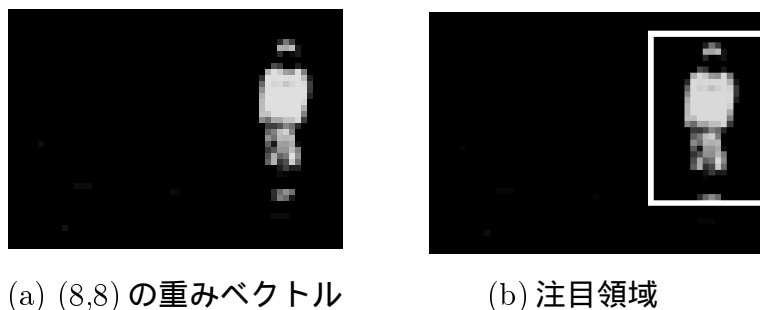


図 8.15: 動作ごとの注目領域の決定

8.5.5 正常な動作パターンの表現

正常な動作パターンは固有空間上の投影点により表現される。詳しく述べると、

[同じ場所での動作]

→ 動作ごとの固有空間上の投影点集合

[移動する動き]

→ パラメトリック固有空間上の投影点列 (軌跡)

[行動パターン]

→ ユニバーサル固有空間上の投影点に添付する時間情報

8.6 非日常的な動きの検出手法と実験的検証

8.6.1 学習にない動きの検出

上述のように、固有空間上の距離は画像間の相関を表すので、学習にない異常な動きを固有空間上の距離の大きさで検出する。動作 j について、学習画像の投影点 $f_i^{(j)}$ と入力画像の投影点 $z^{(j)}(t)$ との最小距離を

$$d_2 = \min_i \|z^{(j)}(t) - f_i^{(j)}\| \quad (8.19)$$

により計算し、これがある閾値より大きくなれば異常と判断する。

[非日常動作検出実験 1]

図 8.16(a) のように椅子に座っている画像を学習し、図 8.16(b)(c) のように椅子から倒れる画像 ($t = 11$ 以降) を入力すると、3次元固有空間上の軌跡と最小距離 d_2 は図 8.17, 図 8.18(a) のようになる。

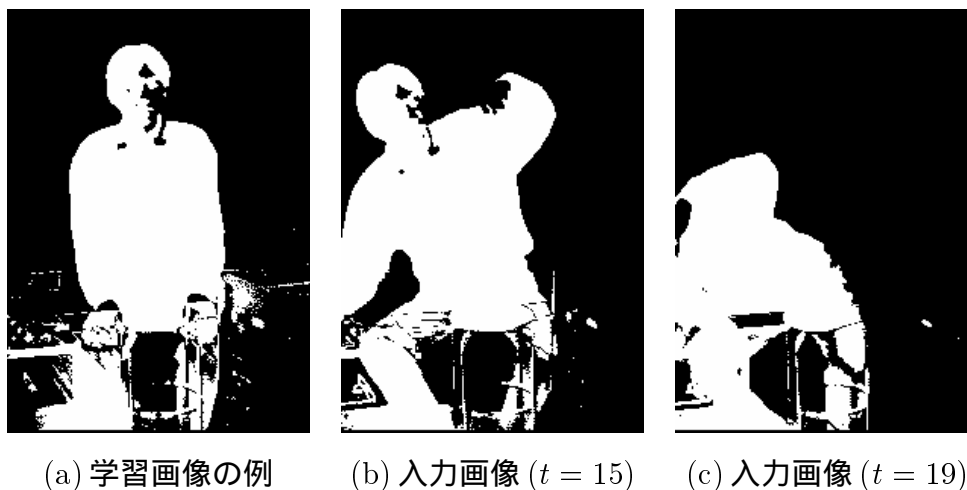


図 8.16: 学習画像と入力画像

固有値寄与率が $W_k = 0.87$ になる 5次元空間での最小距離 d_2 を図 8.18(b) に示す。倒れ始めた $t = 11$ 以降に d_2 が大きくなるのがわかる。例えば 3次元空間では 0.5、5次元空間では 0.7 という閾値をもうけると、 $t = 12$ で検出が可能である。これらの結果から、2値画像と固有空間法の組み合わせで十分、非日常動作検出が行えると言える。

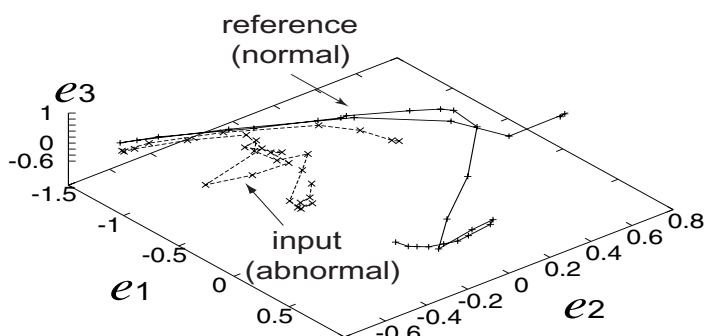


図 8.17: 3次元固有空間上の軌跡

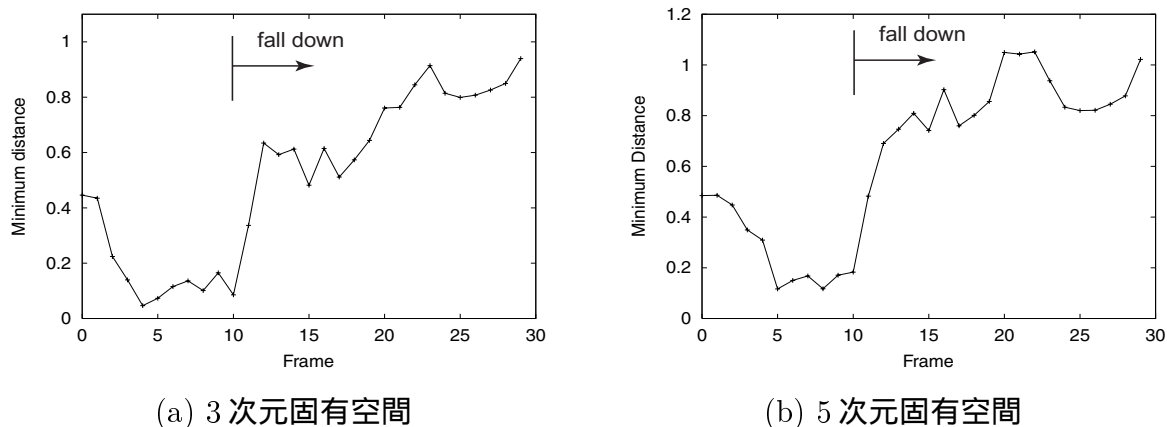
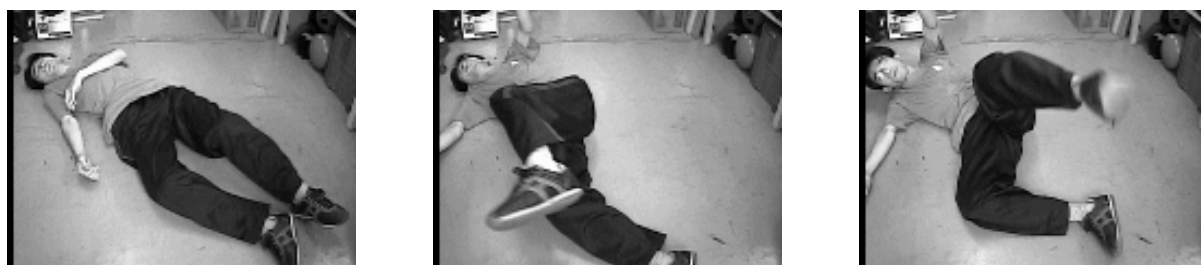


図 8.18: 固有空間上での最小距離 d_2

[非日常動作検出実験 2]

次に、寝返り動作も含めて普通に寝ている動作を学習し、非日常動作として、途中で激しく暴れ出すというパターンを撮影し固有空間法で解析を行う。ただし実験 1 と異なり、画像を 2 値化せず濃淡値をそのまま固有空間法に適用して解析を行う。学習画像と入力画像の例を図 8.19 に示す。



(a) 学習画像 $t = 13.3[s]$

(b) 入力画像 $t = 7.5[s]$

(c) 入力画像 $t = 13.4[s]$

図 8.19: 撮影画像例

寝ている動作の学習画像系列から構築した 3 次元固有空間とその投影点列を図 8.20 に示す。

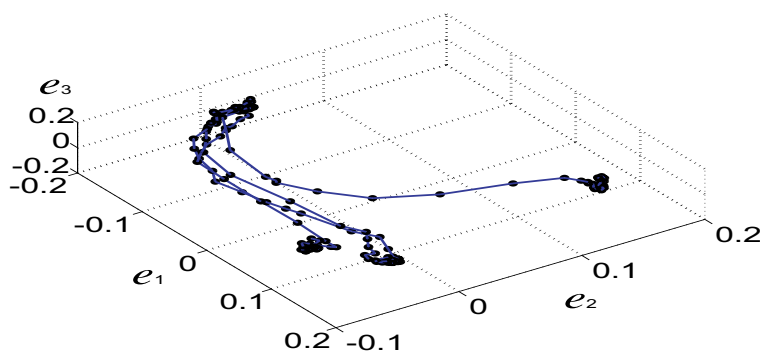


図 8.20: 3次元固有空間上の投影点列

8.6 非日常的な動きの検出手法と実験的検証

また、その固有値寄与率を図 8.21 に示す。26 次元で寄与率が $W_{26} = 0.901$ となり、後にこの空間で解析を行う。

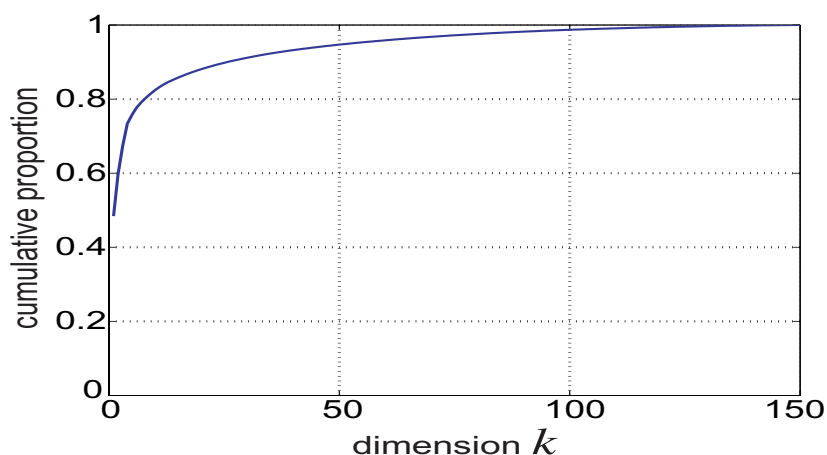


図 8.21: 固有値寄与率

ここで、図 8.19(b)(c) に示すような激しく暴れる非日常動作の画像系列と学習画像系列との最大相関値を計算した結果を図 8.22 に示す。 $t = 7.5[s]$, $11[s]$, $13[s]$ 付近で最大相関値が小さくなり、学習にない動作の画像が現れたと判定できる。しかしこの相関計算には膨大な時間を要する。

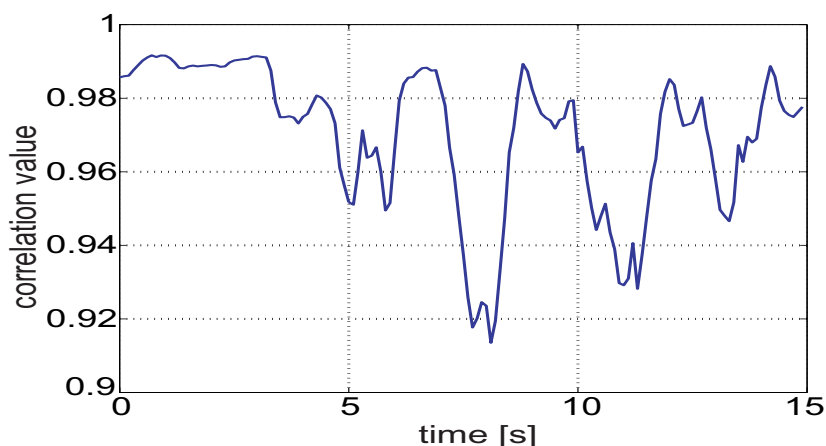
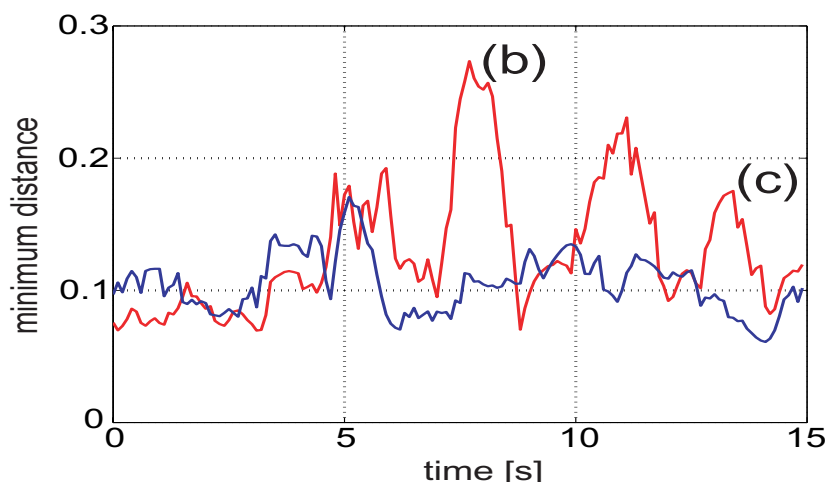


図 8.22: 最大相関値の計算結果

この非日常動作の画像系列を 26 次元固有空間上に投影し、その空間上で解析を行った際の最小距離 d_2 の計算結果を図 8.23 に示す。先ほどの最大相関値の計算結果と同様、 $t = 7.5[s]$, $11[s]$, $13[s]$ 付近で最小距離が大きくなり、非日常的動作が検出できる。

図 8.23: 26 次元固有空間上の最小距離 d_2

8.6.2 動きの速さと方向の検出

先程のような単なる投影点どうし、つまり静止画像どうしの比較では動きの速さや方向は検出できない。そこで、パラメトリック固有空間法 [84][89][90] を用いて軌跡どうし、つまり動画像どうしの比較を行う。動画像間の距離を式 (9.2) のように、固有空間上の軌跡間の距離で定義する。

$$d_3^2 = \min_{a,b} \sum_{t=0}^T \|z^{(j)}(t) - f^{(j)}(at + b)\|^2 \quad (8.20)$$

$$\tilde{a} = \arg \min_a \sum_{t=0}^T \|z^{(j)}(t) - f^{(j)}(at + b)\|^2 \quad (8.21)$$

a は時間伸縮、 b は時間シフトのパラメータである。この 2 つのパラメータを導入して、入力画像系列の投影軌跡 $z^{(j)}(t)$ に最も近くなるような学習画像系列の投影軌跡 $f^{(j)}(at + b)$ の部分集合を見つける。最小距離をもつ軌跡を求めたときの時間伸縮 \tilde{a} に注目すると、その絶対値は速さを、符号は方向を表すと考えられる。まとめると以下のようなことが言える。

- if $\tilde{a} < -1$, 反対方向で速い動き
- if $-1 \leq \tilde{a} < 0$, 反対方向で遅い動き
- if $0 \leq \tilde{a} < 1$, 同じ方向で遅い動き
- if $1 \leq \tilde{a}$, 同じ方向で速い動き

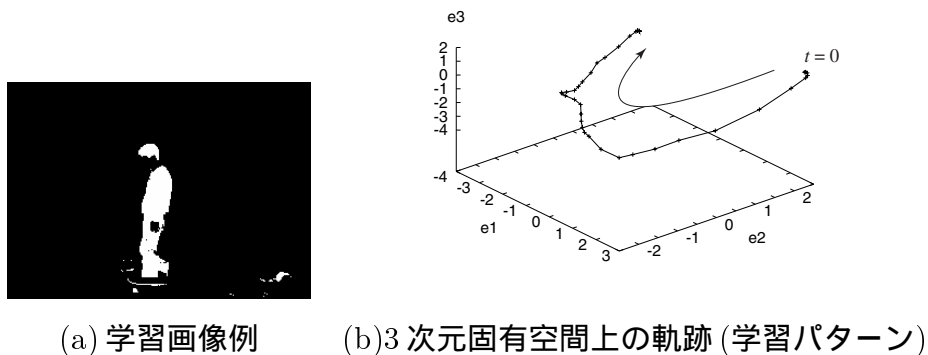


図 8.24: 歩く動作の学習

図 8.24(a) のように画像の右から左に歩く画像を学習すると、3次元固有空間上では図 8.24(b) のような軌跡を描く。

このとき、(I) 学習と同じ方向で速い動き、(II) 学習と反対方向で遅い動き、の画像系列を入力すると、固有空間上の軌跡はそれぞれ図 8.25 のようになる。

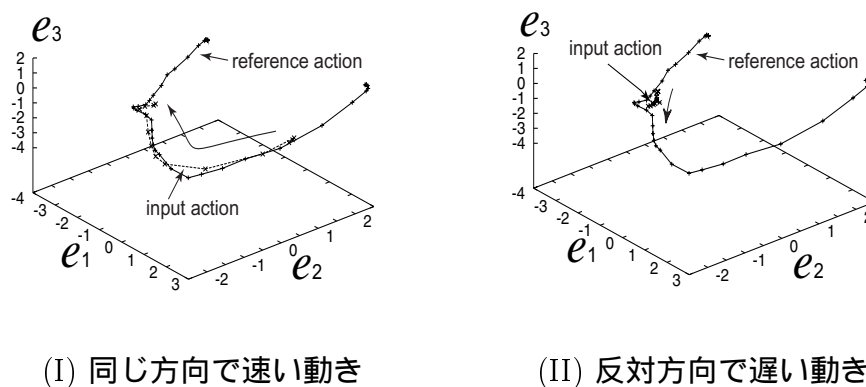


図 8.25: 3次元固有空間上の軌跡

表 8.2: 式 (9.2) の計算結果

k	(I)			(II)		
	\tilde{a}	\tilde{b}	d_3	\tilde{a}	\tilde{b}	d_3
3	1.39	6.57	3.20	-0.17	27.26	1.15
5	1.48	6.34	3.93	-0.30	27.12	2.62
7	1.50	6.18	4.55	-0.39	27.52	3.40
8	1.54	5.82	4.77	-0.40	27.54	3.63

固有値寄与率が $W_k = 0.86$ になる 8 次元固有空間までの \tilde{a} の値は表 8.2 のようになる。動きの速さと方向が \tilde{a} により推定されることがわかる。

8.6.3 非日常的行動パターンの検出

真夜中に外出する、一日中寝ている、というような非日常的な行動パターンを検出するために、式 (8.22) により新しい距離の定義をし、動作の分類の際に異常パターンを検出する。この距離は、学習したユニバーサル固有空間上の投影点に添付した時間情報 t_i と入力時刻 t との差 d_t を、式 (8.18) で求める固有空間上の距離 d_e に付加したものである。

$$d_4 = \min_i \sqrt{c_1 d_1^2 + c_2 d_t^2} \quad (8.22)$$

$$d_1^2 = \|z(t) - f_i\|^2, \quad d_t^2 = (t_i - t)^2 \quad (8.23)$$

c_1, c_2 はそれぞれ d_e^2, d_t^2 に対する重みである。

図 8.26(a) のような行動パターンを学習したとき、一日中 A にいるパターンを入力すると、最小距離 d_4 は図 8.26(b) のようになる。重みはそれぞれ $c_1 = 1, c_2 = 0.3$ とした。

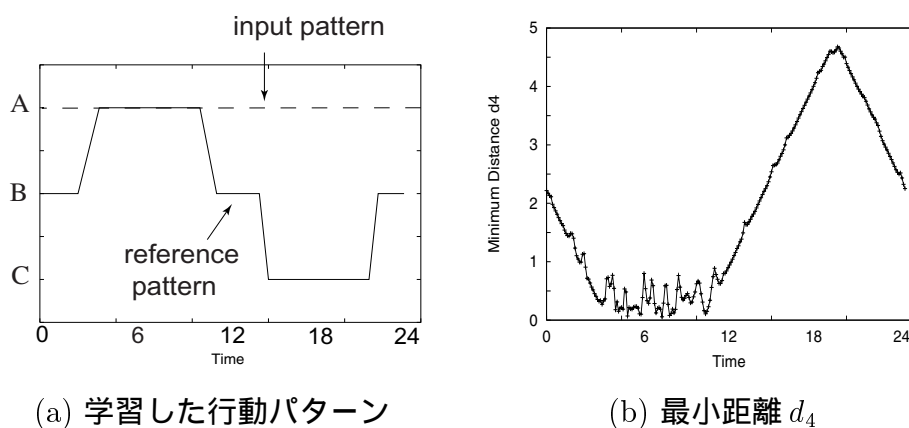


図 8.26: 異常な行動パターンの検出

A にいるはずの時間帯では d_4 は小さいが、B, C どちらかにいるはずの時間帯に A にいると、 d_4 は大きい値になり、異常な行動パターンとして検出できる。 c_2 の値を小さくすることで、多少の行動パターンのずれ(起きる時間がいつもより少し遅い、食事の時間が少し変わったなど)は許容することができる。

8.7 まとめと今後の課題

8.7.1 本章のまとめ

本章では、高齢者の部屋をカメラでモニタリングし、普段と異なる非日常的な動作や様子を検出するというシステムとその実現手法を提案した。

カメラによるモニタリングで高齢者の非日常的な動作を検出するという、これまであまり例のなかった試みに対して基礎的研究を行ったが、ここで示した手法をそのまま用いて実際に高齢者に起こり得る全ての非日常性を検出できるとは限らない。今後、学習段階、動作の分類、異常検出段階それぞれにおいて手法の改良やさまざまな環境・条件下での実験的考察と定量的評価が必要であることは言うまでもない。しかし、これまでになかった新しい異常検出システムとして、その意義や位置づけを含めて基本的なメドを立てることはできた。本研究で提案した固有空間法を用いた手法も、あくまで検出のための一手法ではあるが、これによりある程度の非日常性検出が実現できるという可能性を示すことができたと言える。

本研究では、画像情報における非日常性を画像間の相関値としてとらえ、その計算に優れた性質をもつ固有空間法を用いて、動作の分類、異なる動きの検出、さらに速さと方向の検出にも適用した。学習段階では、教師なし学習法の一つである自己組織化マップ(SOM)により、寝ている、食事しているなど頻繁に行われる動作を抽出し、SOMの重みベクトルから固有空間を構築することで行動パターンの学習とその分類を実現した。いくつかの実験で示したように、膨大な次元の共分散行列を扱うことなく、動作を十分に分類できる固有空間をつくることができた。異常検出段階では、動作を分類した後、それぞれの注目領域内のデータから構築した動作ごとの固有空間上で、投影点間の距離を用いて学習と異なる動きを、またパラメトリック固有空間法(PEM)を用いて、 a, b 2つのパラメータを導入し空間上の軌跡どうしを比較することで、動きの速さなどの検出を行った。さらに時間軸の距離を重みをつけて固有空間上の距離と組み合わせた新しい距離により、一日中寝ているなどの非日常的な行動パターンの検出も行った。

8.7.2 今後の課題と可能性

今後の課題

<前処理における課題>

本研究では人物のシルエットを切り出した2値画像を得るために、背景画像を差し引く方法を用いたが、背景や照明条件、洋服などの条件によってはうまく抽出できないことがある。実際には時空間フィルタや孤立点除去等の前処理を行う必要があると考えられる。また、オプティカルフローやエッジを用いた抽出手法 [97] の適用なども今後の課題である。さらに極端な場合、夏と冬で洋服などの影響で対象者のシルエットの形そのものが変わってしまうことがありうるが、学習期間を長くすることで解決されうるであろう。

<動作の分類手法について>

動作の分類においては、異常検出と同様に固有空間法を用いたが、判別のための有効な次元削減法である線形判別法 (判別分析) など、他の有効な手法を検討することも今後の課題である。

<パラメトリック固有空間上における動画像処理について>

パラメトリック固有空間上で動画像どうしを比較する式 (8.21) の計算において、特別な数値計算法を用いなかったため多くの計算時間を要したが、一刻も早く解析を行う必要がある際には、何らかの探索法を用いる必要がある。これについては、次章で述べる産業用ロボットモニタリングの中で、黄金分割法を用いた計算を検討している。

プライバシー等の問題と実用化への可能性

本章で提案したモニタリングシステムの実用化を考える場合、カメラを含めたシステム自体のあり方を検証する必要がある。プライバシーの問題、どの程度の非日常性に警報を鳴らすか、形態や価格、大きさ等を含めてどのようなシステムとするか、などがポイントとなるが、以下に示すような考え方でそれぞれの問題をクリアしていくことができるかもしれない。

例えばプライバシーの問題については、日常動作の学習や異常動作検出のアルゴリズムの中で工夫することができる。本手法の考え方では学習アルゴリズムの中で、いくつかに分類される各動作について、トイレに行った、風呂に入っている、などの動作の意味は理解せず、ただ A, B, C, ... をラベル付けするだけとしている。このことはプライバシーをいくらか守る考え方であると言える。また画像データが残ることはプライバシーの問題にも大きな影響を及ぼすはずであるが、本手法では、画像データについては一時的に読み込むだけで、保存して後でまた用いるようなことはしない。

モニタリングしていることを本人へ通知するかどうかという問題もある。家族の了承次第では、本人に通知しないでモニタリングするというケースも考えられるかもしれない。また、最近のテレビ番組では、家の隅にカメラを設置し、生活の様子をモニタリングするとい

う企画が頻繁に見られる。もちろんこれらのケースでは本人の了承のもとであろうが、撮影されているという強い意識はあまり感じていないようにも見え、気持ちの上での抵抗はそれほど高くないかもしれない。それよりも撮影した画像データをどのように扱うかということのほうに重要性がありうる。例えば通信傍受法が2000年に施行されたが、その傍受したデータの取扱いには非常に厳しい管理がなされている。これらの問題をクリアすれば、実用化への道はそれほど遠くないと考えられる。

実用に向けてはこのようにいくつかのハードルが存在するものの、各要素について様々な工夫、アイデアを導入して実現の道をさぐりたい。

他のモニタリングシステムへの適用について

本研究では、何らかの予期せぬ事故をできるだけ早く検出することを目的としていたが、モニタリングシステムの目的はそれだけにとどまらず、長いスパンで見た健康状態の把握と、徐々に悪化しているなどの不健康状態の検出、さらに単におおまかな行動パターンを把握し、家族に知らせるような目的もある。ここで提案したような簡単なカメラによるモニタリングシステムでもそれらを実現することは可能であると考えられ、今後検討したい。

この固有空間法を用いた異常検出システムは高齢者モニタリング以外にも多くのシステムに適用することができると考えられる。特に工場内の産業用ロボットや交通状況については、カメラが人の代わりにモニタリングすることが効率的であり、異常な速さや方向などの検出に本研究で提案した手法を適用できる。その他、病院の患者のモニタリング、防犯カメラ等への適用も考えられる。

この固有空間法を用いた異常検出手法は、高齢者モニタリング以外にも、次章で述べる工場内の産業用ロボット、また交通状況、病院の患者のモニタリング、防犯カメラ等への適用も考えられる。また、対象人物が複数いるモニタリング、例えば病室の患者や人が多く集まる場所のモニタリングへの適用も考えられる。

第9章 カメラ画像を用いた産業用ロボットの異常動作検出

9.1 カメラを用いた産業用ロボットモニタリングシステムの提案

産業用ロボットを含めた様々な機器において、その構成要素の故障や誤作動が生じた場合は、それを確実に検出し危険状態に陥らないようにすることが重要である。入力信号の誤り、制御対象の異常、環境の異常(外乱からの騒擾)、人為的な操作ミスなどによるシステムの不安定化が起こると、人間を含めた周辺へ危害を及ぼす可能性が考えられる。例えば産業用ロボットの場合、暴走によって把持していた物体を放り出すケースなど、何らかの事故につながる危険性がある。

世界中で稼働している産業用ロボットのうち半数以上は日本で動いているが、一方、産業用ロボットに絡んだ死亡事故についても日本での件数が圧倒的に多い[98]。例えば産業用ロボットの場合、暴走によって把持していた物体を放り出すケースなど、何らかの事故につながる危険性がある。安全確保のための信頼性の高いシステムが求められていることは言うまでもない。フェールセーフな安全装置によるインターロックが徹底されていく一方、現在では、高信頼化された自己故障診断機能が必須技術となっており、CPU、入出力インタフェース、電源装置、サーボ装置などにおいてリアルタイムの監視と異常(故障)通報を行っている[99]。例えば現在の工場ラインでは、サーボアンプやコントローラにおいて過電流やオーバーヒート等のアンプ関係の異常、偏差過大、位置決め時間等の異常を検出し、システムを安全側で停止させるという形がとられている。

また、解析的モデルから異常検出へのアプローチとして、アクチュエータやセンサなど制御系を構成する要素が故障した場合に外乱オブザーバを用いて故障を検出するという設計方法も考えられている[100]。

しかし、このようにロボット自身に依存した異常検出システムでは高い信頼性は得られない。例えば、大きな加速度のため機械が疲労し、軸のたわみや振動が発生し、サーボアンプやコントローラは正しいと判断していても実はロボットの先端は正しく動作していないというケースもあり、従来システムでは検出できない異常動作が存在する。さらに、センサやアクチュエータそのものが故障したときにはフェールセーフにより安全側に停止させる対策が施されることもあるが、ロボットの制御系とは全く独立した新しい異常検出シ

システムの必要性であると考えられ始めている。

そこで本章では、CCD等の簡単なカメラによるモニタリングにより産業用ロボットの様々な異常動作を検出するという、あまり例のなかった試みに対し、意義や位置づけを明確にするとともに、その検出手法について提案する。

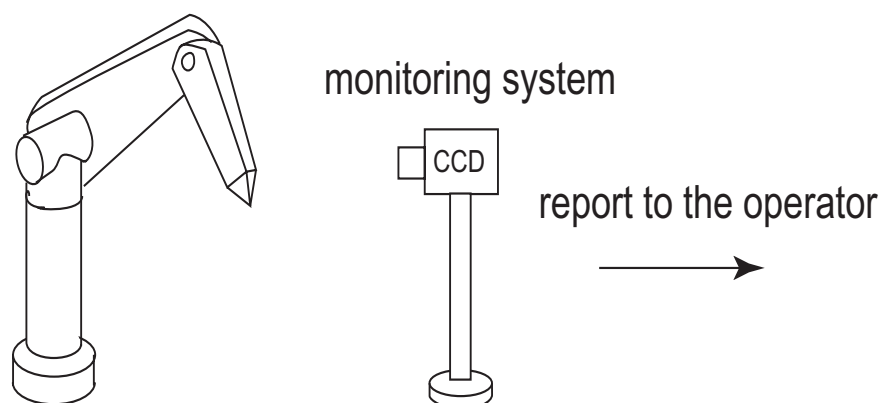


図 9.1: 産業用ロボットのモニタリングシステム

このモニタリングシステムは監視対象のロボットから何の信号も受ける必要がなく、ロボットの制御系とは全く独立したシステムであると言える。また、工場内で動いている産業用ロボットはその数も多く、すべてに対し異常動作検出をするにはより簡単なシステムの実現が求められる。道路や施設内監視のシステムと同様、設置や信号伝送、据え付け調整については当然考慮する必要があるが、既存のロボットに直接組み込むような場合と比較すると、CCDカメラ等を用いるだけのこのようなモニタリングシステムは利点が多い。

9.2 カメラを用いた産業用ロボットの異常動作検出

9.2.1 モニタリングシステムの実現イメージ

最初に、モニタリングによる産業用ロボットの異常検出システムの実現イメージを図 9.1 に示す。ロボットを画像にとらえられる位置にカメラを設置し、異常な動きを検出すればすぐにオペレータに警報を発する。本論文では特に、教示された動きを繰り返すような産業用ロボットを想定する。

このようなシステムには、次のような利点がある。

1. 人間がいちいち見回って監視する必要はない。人間は離れていていいから安全である。
2. 監視対象のロボットから何の信号も受ける必要がない、全く独立した異常検出システムである。

3. 異常時には画像によって正確かつ迅速に状況をとらえることができるため、適切な対応がとれる。
4. 簡単なカメラ1つのシステムなので、低コストである。
5. 対象の機器自体に取り付けるわけではないので、既存のあらゆる機器に対して設置が簡単である。

9.2.2 カメラで検出可能なロボットの異常動作の分類

産業用ロボットに起こりうる異常で、カメラ画像により検出できるものを以下のように分類する。

[異常動作 (I)] 教示した動きと異なる動き

位置指令値からずれる、つまりあらかじめ教示した軌道から外れるようなでたらめな動きは異常と判断する。例えば、角を描く教示軌跡を高速動作すると、角の教示点を通過せず角が丸みを帯びた軌跡になる。また、急激な速度変動、停止の際にアームが振動することもあり、これらの異常動作を検出する必要がある。

[異常動作 (II)] 異なる速さで動く

教示した動きの軌道をきちんとたどっても、その動きの速さが教示した速さより速かったり遅かったりすれば異常である。また、ロボットが止まってしまうという異常も、極端に遅い動きという意味でこれに含める。ただし、学習動作を基準として数%のわずかな速度異常までも検出する必要はなく、例えば50%程度以上の速度異常を検出して停止させることができれば十分であると考えられる。

暴走などの異常動作が起きた際、もしその検出に時間がかかり停止が遅れると、まわりに危害を及ぼすなどの危険性が増すと考えられる。そのため本研究では、これら二つの異常動作をその発生時点からより短時間で検出することを目的の一つとする。

9.2.3 実験装置の構成と撮影画像

本実験を行っている風景と実験装置の構成図を図9.2, 9.3に示す。ロボットの制御と画像のキャプチャを同時に行っている。



図 9.2: 実験の風景

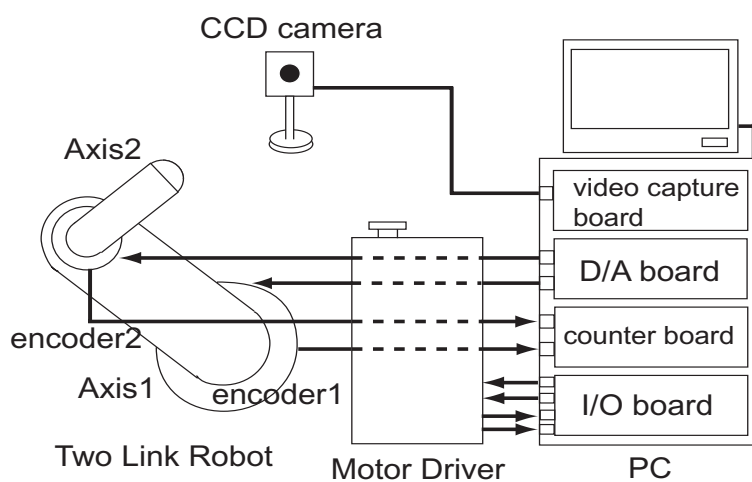


図 9.3: 実験装置の構成

産業用ロボットのある工場でモニタリングを行う場合、背景画像は複雑であり、単純な差分によってロボットの領域を切り出すことは難しいと考えられる。オプティカルフローやエッジを用いて動きを追跡する手法 [97] もあるが、計算時間をかけず簡単な手法で異常検出をして警報を鳴らしたい。本研究で適用する固有空間法は、図 9.4 は本実験で実際にロボットを撮影した濃淡画像の一例であるが、本研究で適用する固有空間法は、このようにして得られた画像の濃淡値をそのまま適用でき、さらにデータ圧縮も行うため、異常発生時から短時間での検出に適している。今回の実験では、 90×120 の画像サイズを用いている。

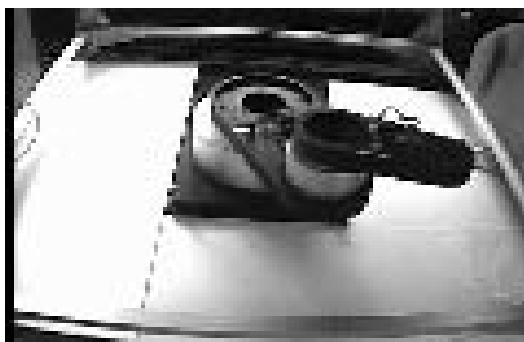


図 9.4: 撮影される画像の例

前章で高齢者モニタリングシステムを提案したが、本研究でもその方法に基づきロボットの異常検出を行う。

9.3 正常な動きの学習

学習段階では、ロボットの正しい動きを固有空間上の点集合(点列)として表現する。ロボットの正しい動きを撮影した画像集合から固有空間を構築し、各画像の投影点を蓄えておく。この時点で、固有値寄与率が約 90 %になる次元を調べ、その次元の固有空間とその上への投影点列を学習することになる。

ロボットの動きは1サイクルだけ学習して十分であると考えられるが、より信頼ある学習データを用意するために、同じ動きを数サイクル分学習することも可能である。ただしこの場合、異常動作検出において探索する際に、対象となる投影点が多くなり計算時間が増えるため注意する必要がある。

9.4 異常な動きの検出

9.4.1 固有空間法に基づくロボットの異常動作検出法

学習と異なる動き、つまり学習として得られた静止画像のいずれとも異なるような静止画像が入力されれば異常と判断しなければならない。そこで、それらの画像は学習画像との相関が低いものとして検出する。上述のように、固有空間上の距離は画像間の相関を表すので、学習にない異常な動きを固有空間上の距離の大きさをを用いて検出する。学習画像の投影点集合 f_i と時間 t における入力画像の投影点 $h(t)$ との最小距離 d_1 を計算し、これがある閾値 d_{th} より大きくなれば異常と判断する。

$$d_2 = \min_j \|z(t) - \mathbf{h}_j\| > d_{th} \rightarrow \text{abnormal} \quad (9.1)$$

2軸 DD ロボットを用いた実験的検証

静止画像比較による異常動作検出の実験例として、図 9.5 のような動きを用いる。ロボットの各関節の位置制御系には、2自由度ロボスト制御 [45] を用いている。

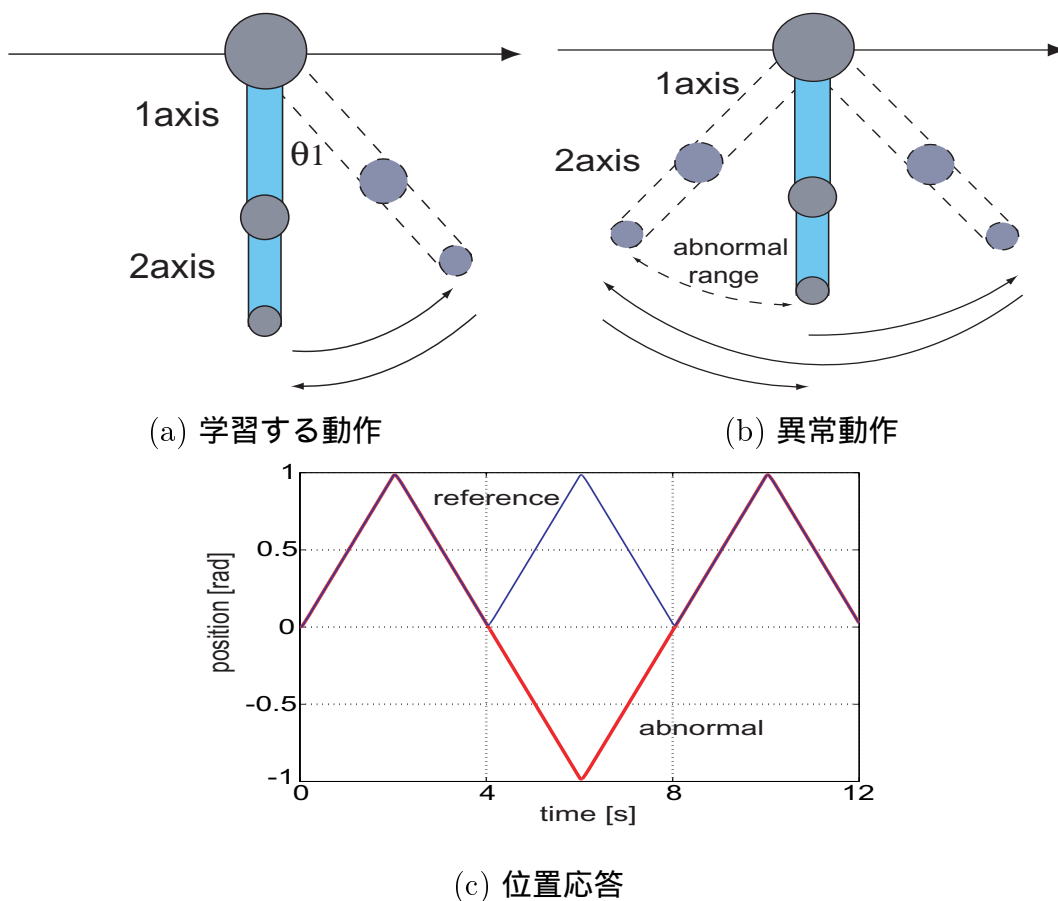


図 9.5: 実験におけるロボットの動作

図 9.5(a) の学習画像集合から構築した固有空間と、その投影点列が描く軌跡を図 9.6 に示す。また、固有値寄与率は図 9.7 のようになり、次元が 10 のとき固有値寄与率 $W_{10} = 0.906$ となるため、後の解析は 10 次元固有空間で行うこととする。

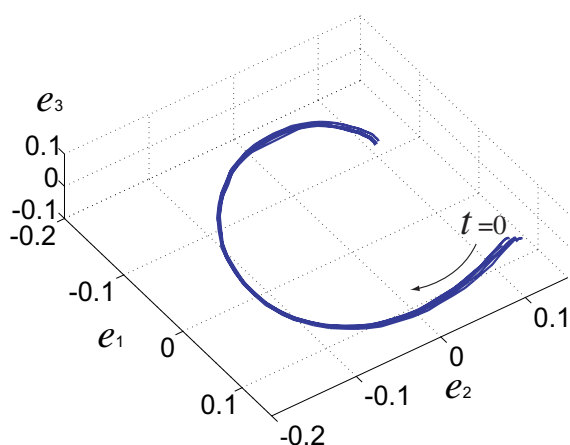


図 9.6: 3次元固有空間上への投影軌跡

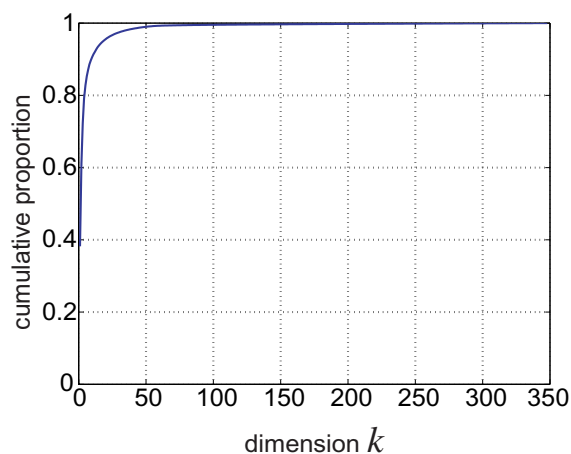


図 9.7: 固有値寄与率

この学習結果に対し、図 9.5 のように $t = 4 \sim 8$ [s] で関節角度が負のほうに動いてしまうような異常動作を用意する。図 9.8 は、これを撮影した各画像に対し、学習画像の中から最大相関値をもつものを探索した結果である。画像ベクトルは正規化しているため、学習画像の中に似た画像があれば最大相関値はほぼ 1 となる。一方、 $t = 4 \sim 8$ [s] においては学習画像の中に似たような画像が存在しないため、最大相関値は小さくなる。これに基づいて異常動作検出も行えるが、計算時間が膨大になるため短時間での検出は不可能である。また、画像サイズによってはその検出に要する時間がさらに増えてしまう。

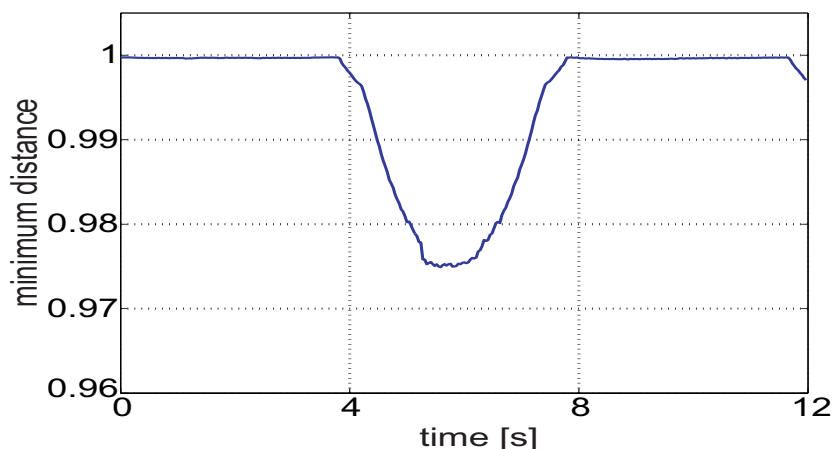


図 9.8: 最大相関値の計算結果

次に固有空間法を適用して異常動作検出を行った結果を示す。図 9.9 は、10 次元固有空間において式 (9.1) のように学習画像の投影点集合から最小距離をもつものを探索した結果

9.4 異常な動きの検出

である。異常動作をしている $t = 4 \sim 8[s]$ での最小距離 d_1 が大きくなり、ある閾値 d_{th} により検出が可能である。

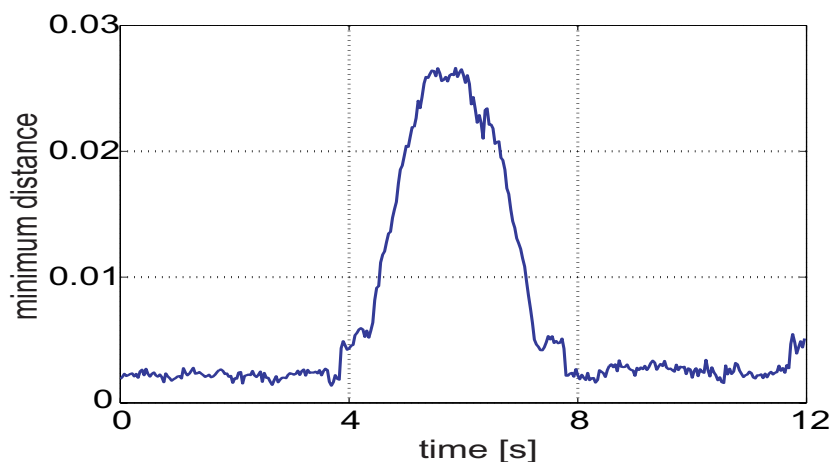


図 9.9: 10次元固有空間における最小距離 d_2

計算時間の検証

以下の表は最大相関値を探索する方法 (図 9.8) と固有空間法 (図 9.9) それぞれにおいて要した計算時間を比較したものである。ただし画像のキャプチャに費した時間は含めていない。固有空間法を用いた場合には、1枚の入力画像に対し約 37ms であり、最大相関値を求める手法のほぼ 30 分の 1 の時間ですむ。産業用ロボットの異常動作検出をその発生時点からより短い時間で行うという目的において、本手法は適している。

	入力画像数	全計算時間	画像 1 枚あたりの計算時間
最大相関値の計算	348	315.46[s]	906[ms]
固有空間法	348	12.87[s]	37[ms]

9.4.2 パラメトリック固有空間法に基づくロボットの速度異常検出

パラメトリック固有空間法によるロボットの速度解析

異常動作 (I) の検出のように、単なる静止画像どうし、つまり固有空間上の投影点どうしの比較ではロボットの動きの速さは検出不可能であり、動画像どうしの比較方法が必要になる。そこでパラメトリック固有空間法 [89][90] を用いて、固有空間上の軌跡どうしの比較を行う。動画像間の距離を式 (9.2) のように、固有空間上の軌跡間の距離で定義する。

$$d_3(u) = \min_{a,b} \sum_{t=1}^T \|z(t + uT) - \mathbf{h}(at + b)\| \quad (9.2)$$

$$\tilde{a}(u) = \{ a \mid \min_{a,b} \sum_{t=1}^T \|z(t + uT) - \mathbf{h}(at + b)\| \} \quad (9.3)$$

T は1つの画像系列における画像枚数、 a は時間伸縮、 b は時間シフトのパラメータである。この2つのパラメータ a, b を導入して、 u 番目の入力画像系列の投影軌跡 $z(t + uT)$ に最も距離の近い学習画像系列の投影軌跡 $\mathbf{h}(at + b)$ を求めたときの時間伸縮パラメータ \tilde{a} に注目すると、その絶対値は動きの速さ、符号は動きの方向を表すと考えられる。

if $\tilde{a} < -1$, 反対方向で速い動き

if $-1 < \tilde{a} < 0$, 反対方向で遅い動き

if $0 < \tilde{a} < 1$, 同じ方向で遅い動き

if $1 < \tilde{a}$, 同じ方向で速い動き

黄金分割法を用いた探索

ここで、式 (9.2) の計算に黄金分割法を適用する。右辺は2つのパラメータ a, b を変数とした関数になっている。

$$f(a, b, u) = \sum_{t=1}^T \|z(t + uT) - \mathbf{h}(at + b)\| \quad (9.4)$$

ある入力画像系列 (ある u) に対して、2つのパラメータ a, b を変化させたときの $f(a, b, u)$ の値をプロットすると図 9.10 のようになり、単峰性を示す。そこで、 $f(a, b, u)$ の最小値を求める手段として2次元の黄金分割法を用いる。

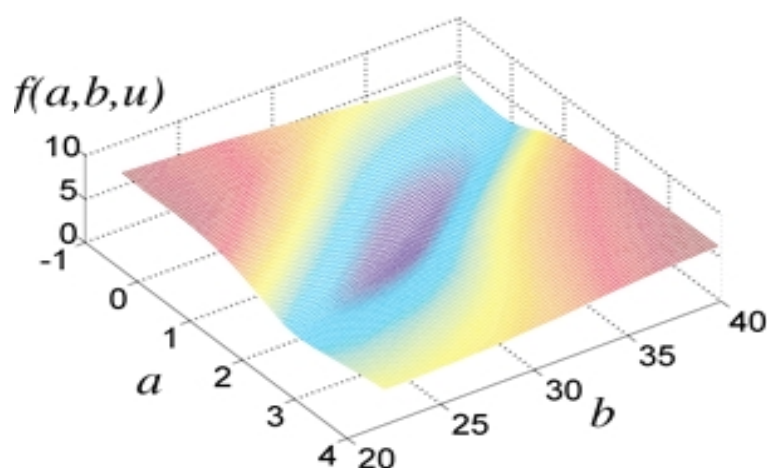


図 9.10: $f(a, b, u)$ のプロット例

9.4 異常な動きの検出

1変数関数の場合は、図9.11のように探索区間 $[x_1^k, x_2^k]$ を黄金分割比で分割した点 u^k, v^k を求め、 $f(u^k), f(v^k)$ の値の大小によって探索範囲を狭めていく。 $v^k = u^{k+1}$ となるから $f(u^{k+1})$ は計算する必要がない。2変数関数の場合は、図9.12のように、ある試行点 g_1 で勾配を求め、その方向における最小値を求めて新たな試行点 g_2 とし、これを繰り返していく。2変数関数に対する黄金分割法のアルゴリズムの詳細については付録に記す。

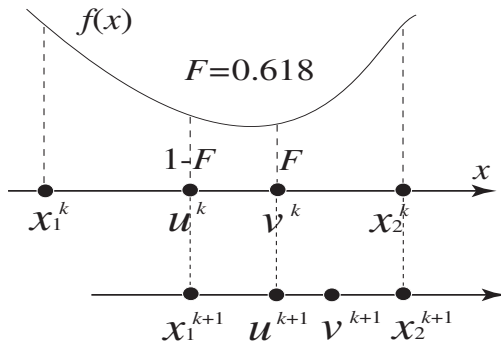


図 9.11: 黄金分割法

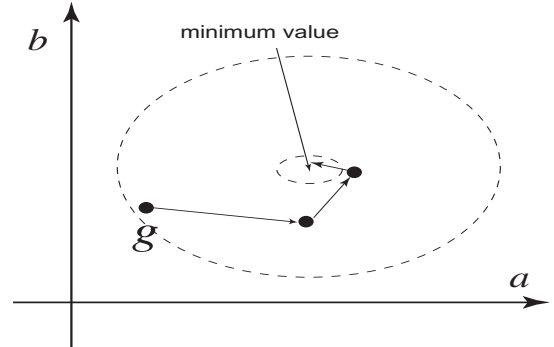


図 9.12: 探索例

本実験では式(9.2)において $T = 10$ 、つまり入力画像を10フレームずつって学習軌跡と比較することにする。また u 番目の画像系列において、初期試行点 $x_1^1 = (a_1^1, b_1^1)$ には $u - 1$ 番目の画像系列に対する計算結果 $(\tilde{a}(u - 1), \tilde{b}(u - 1))$ を用いる。

$$a_1^1 = \tilde{a}(u - 1) \quad (9.5)$$

$$b_1^1 = \tilde{b}(u - 1) + 10\tilde{a}(u - 1) \quad (9.6)$$

これは、前の10フレームの計算結果から次の10フレームの入力軌跡に近い学習軌跡を予測していることになる。

2軸DDロボットを用いた実験的検証

上述の動画像比較による速度異常検出法の有効性を確認するための実験として図9.13のような動作を用いる。

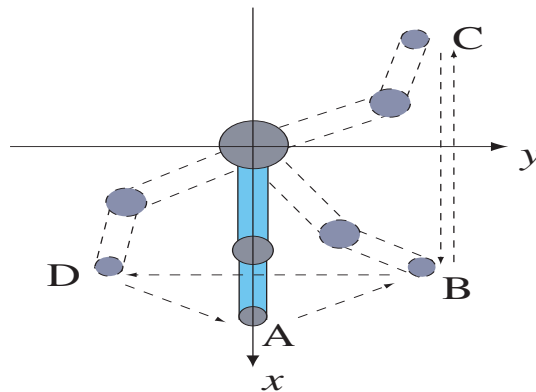


図 9.13: 実験に用いる動作

9.4 異常な動きの検出

ロボットの先端が A-B-C-B-D-A の位置を順にたどるように移動させる。A,B,C,D の作業空間座標をあらかじめ与え、作業空間指令値をニュートン法の反復計算により関節空間指令値に変換し、2自由度ロボット制御系 [45] で制御を行った。各座標は単位を [m] として、 $A(0.599, 0.0)$, $B(0.37, 0.43)$, $C(-0.28, 0.43)$, $D(0.37, -0.3)$ である。

[速度解析実験 1]

図 9.14 は、A-B-C-B-D-A の順にたどるような学習動作の画像系列から構築した 3 次元固有空間とその投影点列の描く軌跡を示したものである。A,B,C,D にロボットが位置するときの画像がそれぞれ固有空間上ではっきりと区別されて投影されるとともに、画像系列の投影点はその間をきれいにたどっていることがわかる。

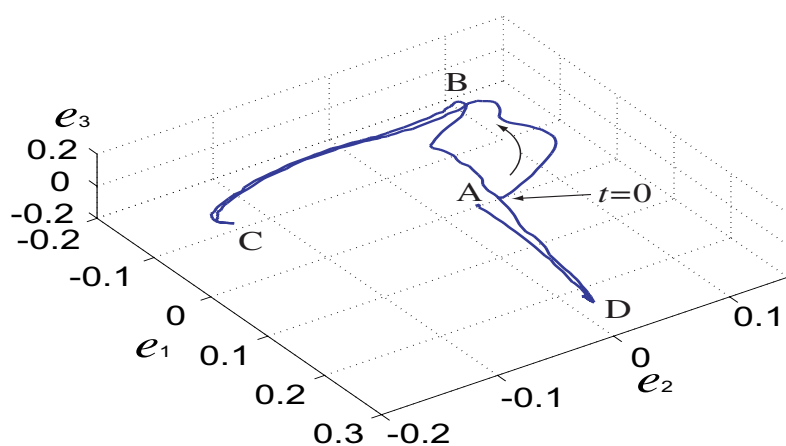


図 9.14: 3 次元固有空間と投影点列

図 9.15 は固有値寄与率を示す。15 次元空間で寄与率が $W_{15} = 0.901$ となる。後の解析ではこの 15 次元空間を用いる。

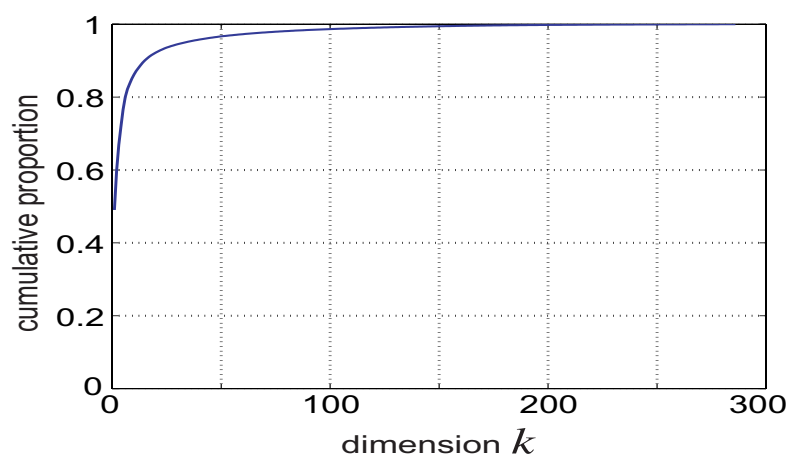


図 9.15: 固有値寄与率

学習動作と異なる速度パターンを入力画像系列として以下のような 5 つのパターンを用意する。

- (a) 学習の 2 倍の速度
- (b) 学習の 1.5 の速度
- (c) 学習と同じ速度
- (d) 学習の 0.75 倍の速度
- (e) 学習の 0.5 倍の速度

この速度は $x - y$ 座標の作業空間における速度である。図 9.16 は (a) から (e) それぞれのパターンの速度応答を示したものである。

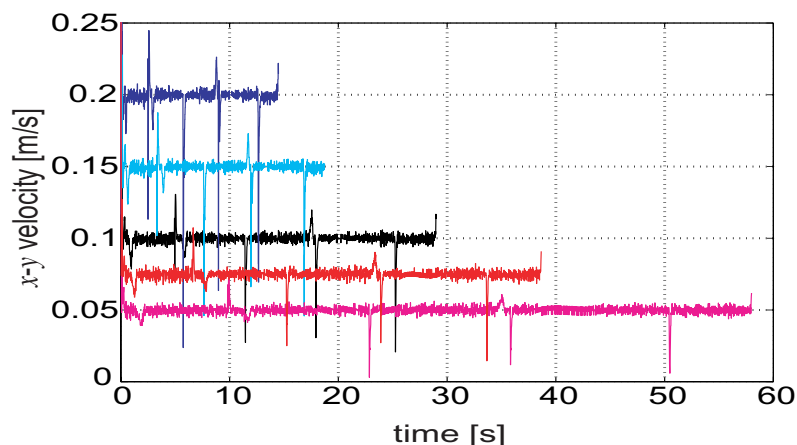


図 9.16: $x - y$ 平面における速度

それぞれの入力画像系列に対して、15次元固有空間での \tilde{a} の計算結果を図 9.17 に示す。 \tilde{a} の値に、ロボットの動作速度が学習パターンの何倍であるかという情報が反映していることがわかる。この \tilde{a} にある閾値を設定することで学習パターンと異なる速さの検出ができる。

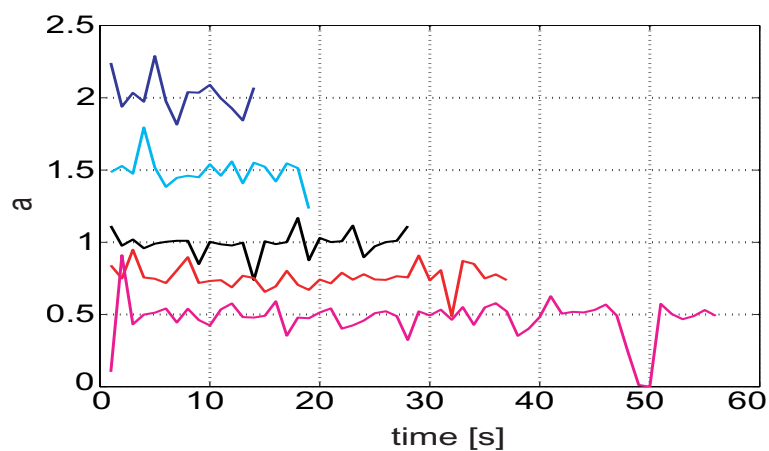


図 9.17: 5 つの画像系列に対する \tilde{a} の計算結果

[速度解析実験 2]

図 9.18 は[実験 1]と同様、A-B-C-B-D-A の順にたどるような学習動作の画像系列から構築した 3 次元固有空間と投影点列の描く軌跡を示したものである。また、図 9.19 は固有値寄与率を示す。15 次元で $W_{15} = 0.901$ となるため、後の解析では 15 次元固有空間を用いることとする。

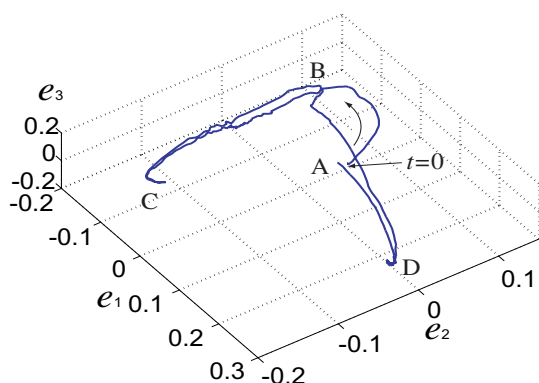


図 9.18: 3 次元固有空間上への投影軌跡

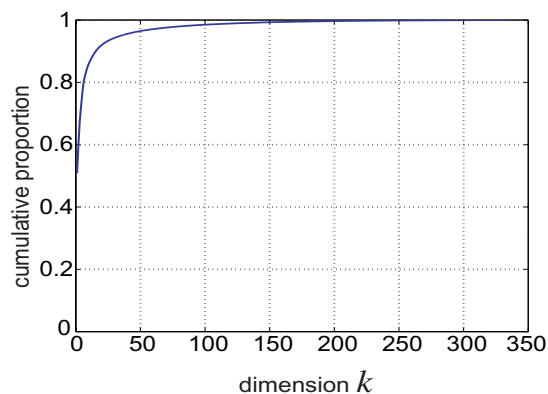
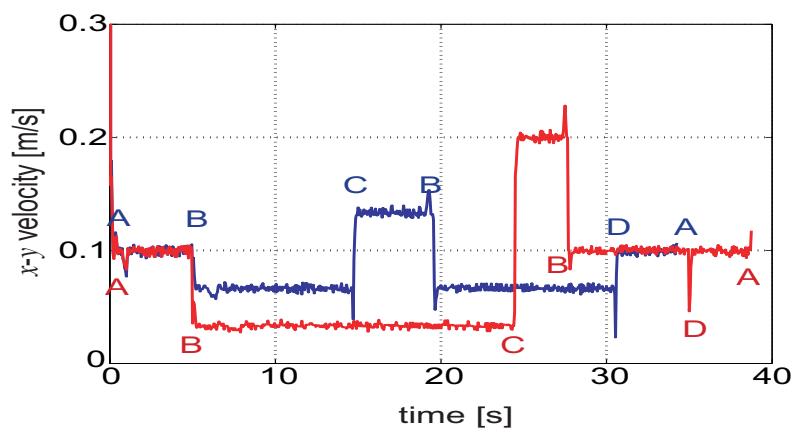


図 9.19: 固有値寄与率

この学習結果に基づき、A,B,C,D それぞれの区間で動作速度を変えながら異常な速度パターンの解析を行う。図 9.20 に学習動作と入力する異常動作の速度応答を示す。この速度はロボット先端の $x - y$ 座標の作業空間における速度である。学習動作と入力異常動作の比較は次のとおりである。

- A-B 間：学習と同じ速度
- B-C 間：学習の $\frac{1}{2}$ の速度
- C-B 間：学習の 1.5 倍の速度
- B-D 間：学習の 1.5 倍の速度
- D-A 間：学習と同じ速度

図 9.20: $x - y$ 平面における速度

この入力画像系列に対して、15次元固有空間で行った \tilde{a} の計算結果を図9.21に示す。 \tilde{a} の値に、ロボットの動作速度が学習パターンの何倍であるかという情報が反映しており、異常速度の解析が行えることがわかる。例えば上限0.8、下限1.2の閾値を設定することで、学習動作の1.5倍、あるいは0.5倍という速度異常を検出できる。つまり、学習動作を基準として少なくとも50%程度の速度異常の検出が可能である。

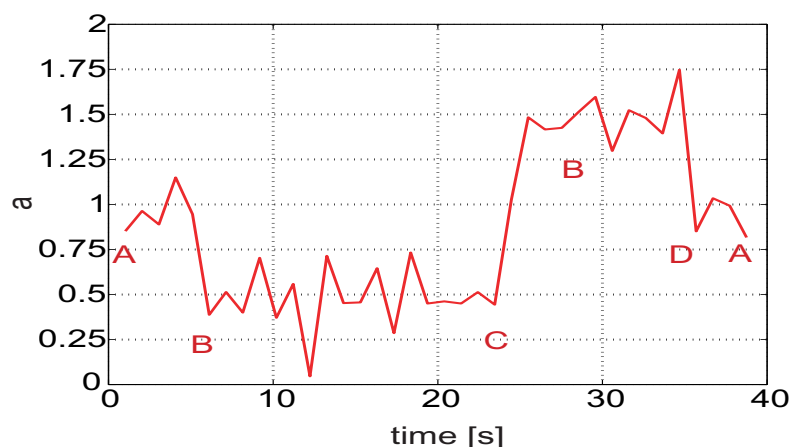


図 9.21: \tilde{a} の計算結果

本実験では、1画像系列の大きさを $T = 10$ とした。ロボットの速度解析はこの T の時間に1回だけ行われる。したがって、 T が小さいほど速度解析を行う回数も増え、異常動作発生からより短時間での検出が可能となる。しかし、 T を短くして比較を行う1画像系列中の画像数を減らすと、安定した \tilde{a} の計算ができなくなる。よって、 T の決め方には異常動作検出に要する時間と安定な速度解析との間でトレードオフのような現象が生じる。今回は実験的にそれらの影響を調べ、 $T = 10$ と決めた。

計算時間の検証

黄金分割法を用いた場合に、1画像系列(画像10枚)に対して \tilde{a} を計算するのに要した時間は約30msほどである。画像サイズなどによっても計算時間は当然変わるが、黄金分割法を用いることで大幅に短縮できる。画像1枚の撮像に33ms要するとすると、10枚撮像する時間330msにこの計算時間約30msを合わせて、約360msごとに速度情報が解析できることがわかる。

パラメトリック固有空間法と黄金分割法を用いたことで、このように極めて短い時間でロボットの速度解析が可能となり、異常発生から短時間で検出をして警報を鳴らしたいという本研究の目的に非常に適している。

9.5 具体的な異常動作検出例

固有空間法を利用した静止画像間、動画間での比較により、ロボットの異常動作が可能であることを示してきたが、ここで、産業用ロボットに実際に起きうる具体的な異常動作を模擬し、どのように検出されるかを検証する。

9.5.1 オーバーシュート・振動

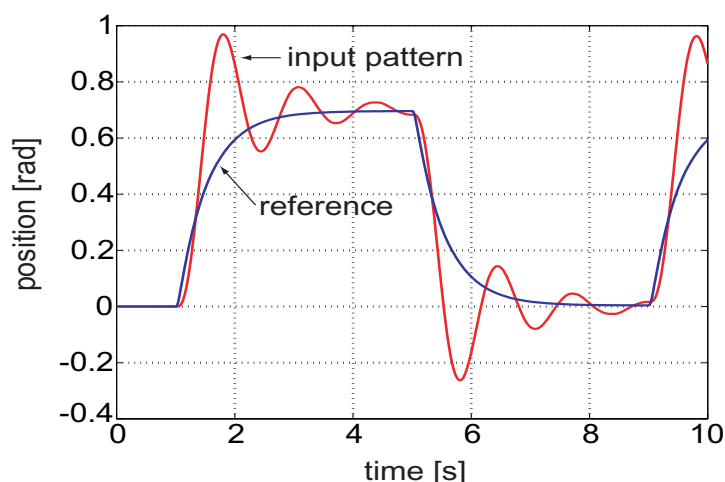
冒頭で述べたように産業用ロボットにおいて、大きな加速度のために機械的な劣化や軸のたわみが発生し、オーバーシュートや振動などの現象が起きうる。また、ロボットの制御手法によっては急激な速度変動や停止の場合に同様な現象が起きうる。

このような異常動作を模擬し、固有空間法によってその検出を試みる。2軸は目標値 $0.0[\text{rad}]$ とし、1軸に $0.7[\text{rad}]$ のステップ目標値を与え、2自由度位置制御における目標値応答特性を適切に設定することで、図 9.22(a) に示すような学習動作、異常動作を模擬した。異常動作におけるオーバーシュートは、1軸の目標値応答特性の減衰係数 ζ を 1 より小さくすることで実現している。

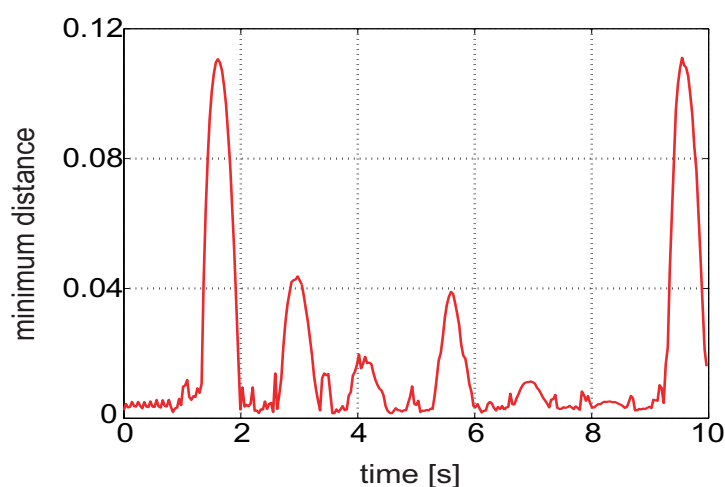
$$G_{ry}(s) = \frac{1}{(\tau_r s)^2 + 2\zeta\tau_r s + 1} \quad (9.7)$$

この実験では、目標値応答特性の時定数を $\tau_r = 200[\text{ms}]$ 、減衰係数を学習動作で $\zeta = 1.0$ 、異常動作で $\zeta = 0.2$ とする。

この異常動作は、異常動作 (I)、つまり静止画像間の比較により検出する。前節で示した式 (9.1) に基づき、固有空間上の最小距離 d_2 を求めた結果が図 9.22(b) である。例えば d_1 の閾値を 0.01 に設定すると、1.8 秒、3.0 秒、4.2 秒、5.7 秒、7.0 秒、9.5 秒における異常動作を検出でき、図 9.22(a) のオーバーシュートの様子と一致する。このように、教示点を行き過ぎてしまうような動作を検出できる。



(a) 学習動作と異常動作の位置応答

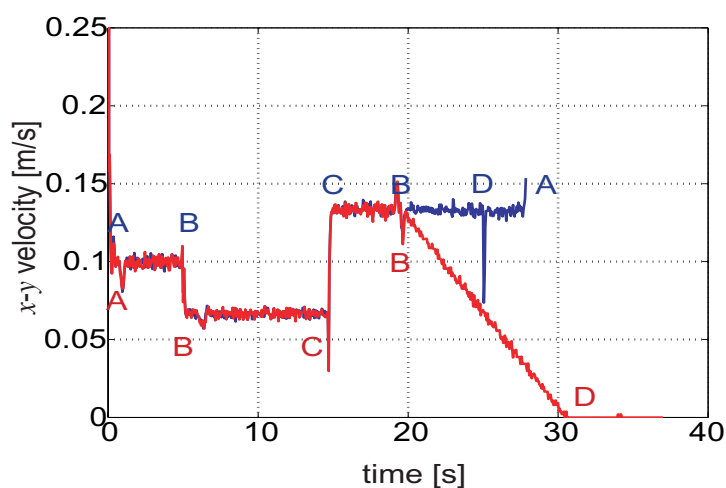
(b) 最小距離 d_2 の計算結果図 9.22: 位置応答と最小距離 d_2 の計算結果

9.5.2 速度異常・停止

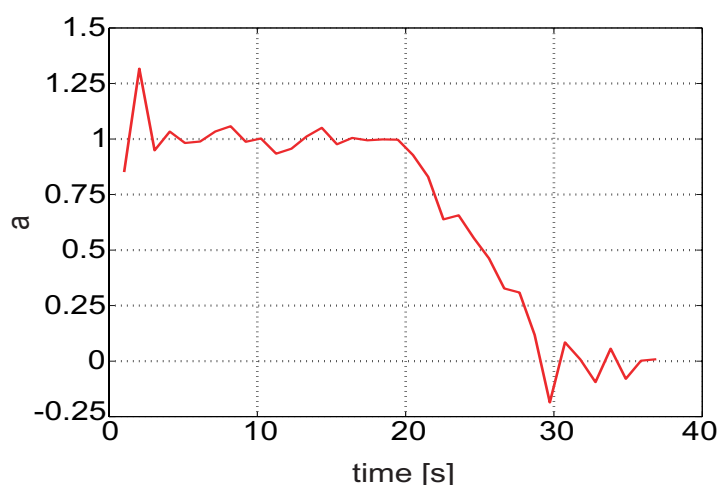
次に、何らかの構成要素の故障等によりロボットが停止してしまうような場合について検出を試みる。前節での速度解析に用いた動作と同様に、作業空間における教示点をたどる動作を用いる。図 9.23 に示すように、 $t = 20$ 以降、B から D へ移動する際に、速度が徐々に落ちていき停止する動作を用意した。

この異常動作は、異常動作 (II)、つまり動画像間の比較により検出する。式 (9.2) と黄金分割法に基づき速度の解析を行った結果が図 9.23(b) である。例えば \tilde{a} の閾値を 0.75 に設定すると、22 秒の時点で閾値を越え速度異常と判定するが、図 9.23(a) において、22 秒の時点での速度が学習動作の約 0.75 倍になっており一致する。このようにして、停止してしま

うような速度異常も検出できる。



(a) 学習動作と異常動作の速度応答



(b) パラメータ \tilde{a} の計算結果

図 9.23: 速度応答とパラメータ \tilde{a} の計算結果

このように、異常動作 (I)(II) の検出、つまり固有空間法を用いた静止画像間比較・動画画像間比較を併行して行うことで、暴走、オーバーシュート、速度異常、停止等の異常動作をその発生時点から数十ミリ秒ほどの短い時間で検出し、警報を鳴らすことができる。

実際の産業用ロボットは3次元的に運動する場合がほとんどであるが、本手法を適用した際、奥行き方向の動作が画像変化としてあまり現れないような場合は検出が困難となる。対策方法として、別の角度からもう一台のカメラで解析し、2台のカメラで総合的に判断するようなことは可能である。また、実際の工場で適用する場合、照明条件や背景画像の変化の影響を考慮する必要がある。固有空間法は、画像全体のグローバルな情報を用いて照合する手法であり [85]、多少の画像中の雑音などは平均化するが、光源の位置が大きく変化したり背景画像が全く変わったりすると、それらの画像を適応的に随時学習し直すなどの

対策が必要となる。このように実際の産業用ロボットに適用する上での本手法の定量的評価については今後の検討課題となる。

9.6 まとめと今後の課題

9.6.1 本章のまとめ

本章では、工場で使われる産業用ロボットをカメラでモニタリングし、故障などによる異常な動きを検出するシステムを実現するという新しい試みについて、その検出方法の提案と実験による検証を行った。

現在の工場ラインで用いられている、サーボアンプやコントローラ側における異常検出システムでは検出できない異常動作もあり、ロボットの制御系とは全く独立した検出システムの必要性が認識されている中で、まさに「見た目」で異常を検出するモニタリングシステムは非常に有効である。このようなモニタリングによる異常検出システムを併用することで、より信頼性の高いシステムが構築できると考えられる。

産業用ロボットの手先や関節にマーカをつけたり、複雑な背景画像からロボットを正確に抽出したりすることなく、濃淡画像をそのまま用いて異常動作検出が行えることを示した。その検出法として、画像データの圧縮と画像間の相関の計算に優れた性質をもつ固有空間法と、それを発展させたパラメトリック固有空間法を用い、異なる動き、速さなどの異常動作を検出する手法を提案した。さらに、固有空間上の軌跡どうしの比較における計算過程において黄金分割法を用いることにより、極めて短い計算時間での速度解析、異常動作検出を実現することもできた。これらのことから、前章の高齢者モニタリング、本章の産業用ロボットモニタリングを含め、様々な対象に広く利用できる異常検出手法の一つとして見通しを立てることができたと言える。

9.6.2 今後の課題と可能性

本研究における今後の課題と、将来への可能性について述べる。

今後の課題

< 異常判別の閾値 >

静止画像どうしの比較について、固有空間上の最小距離 d_2 に閾値を設け、異常判別する手法を示したが、この閾値をどのようにして決めるかという問題についての深い考察も今後の課題である。どこまでの軌道誤差を異常とするか、あるいは画像の解像度にもかかわってくる問題であり、ケースバイケースでよいとも考えられる。

< 背景画像と照明条件 >

高齢者モニタリングシステムにおける課題でも述べたが、実際の工場でのモニタリングにおいて、背景画像や照明条件はさまざまに変化する。背景画像としては作業員が歩いている様子が入りこんだりすることもある。また照明条件は一日の中で時間の経過とともに変化するものである。固有空間法は、画像全体のグローバルな情報を用いて照合する手法であり [85]、多少の画像中の雑音などは平均化するが、光源の位置が大きく変化したり背景画像が全く変わったりすると、それらの画像を適応的に随時学習し直すなどの対策が必要となる。このように実際の産業用ロボットに適用する上での本手法の定量的評価については今後の検討課題となる。

< 1 画像系列の画像数 >

パラメトリック固有空間法により速度解析を行う際に、学習との比較に用いる 1 画像系列の画像数が少ない場合 (例えば 5 枚)、パラメータ a の計算結果があまり安定したものにならないということがわかった。1 画像系列の画像数を多くする (例えば 10 枚、20 枚) と当然安定した計算結果が出るが、一刻も早く検出するという目的の上では望ましくない。一種のトレードオフの関係になると考えられるが、画像の解像度等との関連もあり、今後深く検討したい。

< 3 次元動作をするロボットによる検証 >

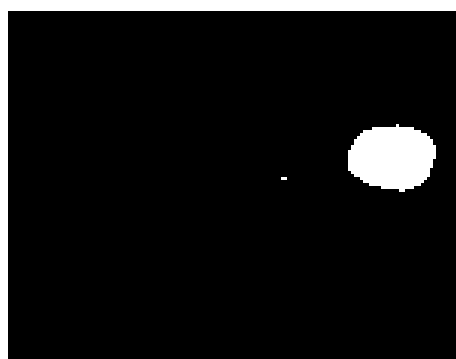
本実験は、2 次元的に動作する平面ロボットを用いて行ったが、実際の工場で動く産業用ロボットはほとんどが 3 次元的に動作するものである。異常動作の検出原理としては、本章で述べたような手法で可能であると考えているが、本手法を適用した際、奥行き方向の動作が画像変化としてあまり現れないような場合は検出が困難となる。対策方法として、別の角度からもう一台のカメラで解析し、2 台のカメラで総合的に判断するようなことは可能である。さらに複雑な動作や速度パターンとも合わせて、今後検討していくべき課題である。

< 他の実現手法 >

固有空間法を用いた検出アルゴリズムについては、ある程度確立することができた。この他の実現手法として最初に考えられるのが、図 9.24 のようにロボットの各関節付近にカラーマーカをつけて画像内で抽出し、その重心位置を追うという方法である。関節の数だけの重心位置軌道を学習しておき、それからはずれたり、軌道をたどる速度を解析することで異常動作を検出できそうである。この際の位置軌道は、2 次元の画像上で解析するものだけでなく、3 次元空間における位置座標を計算してから解析するものも考えられるが、いずれにしても計算時間の猶予が限られているため、シンプルな手法が望まれる。



(a) 原画像



(b) 2 値化された画像

図 9.24: マーカを用いたモニタリング例

ちなみにこのような 2 値化を行った場合、固有空間法はあまり有効ではない。その理由は以下のとおりである。

画像中の黒い画素は 0、白い画素は 1 である。このとき、学習画像ベクトルの中には、互いに独立なもの (直交するもの) が多数存在することになる。固有空間法は低次元空間でサンプル集合の特徴を表現するものであるが、もし 10 枚の独立な画像が存在すれば、少なくとも 10 次元の固有空間が用意されないといけないことになる。このような問題が起きるにもかかわらず、例えば 3 次元空間などでいくつか行った実験結果ではなぜかうまくいっている。

実用への可能性

本章で提案した異常検出法にもまだ課題はあるが、カメラのみで実現できるという手軽なモニタリングシステムであることから、もし異常検出アルゴリズムの部分がしっかりと確立されれば、実際に実用される可能性は多いにあると考えている。特に、現在すでに利用されている自己診断機能との併用により、非常に信頼性の高い診断機能が実現されうる。1 台のカメラで複数のロボットを監視し、緊急停止をしたりやオペレーション室につなげたりするような形態として、実現の道を進めたい。

広く用いられるモニタリングシステムとして

パラメトリック固有空間法や黄金分割法の適用により、ほぼリアルタイムでの速度解析、異常動作検出を実現することができた。これらのことから、高齢者モニタリング、産業用ロボットモニタリングを含め、様々な対象に広く利用できる異常検出手法の一つとして見通しを立てることができたと言える。

今、防犯カメラや監視カメラの導入が大いに進んでいる。平成 13 年には、新宿歌舞伎町に 24 時間監視するカメラが 50 台設置された。付近住民などの強い要望が運びとなったそう

である。また海外では、イギリスで最も防犯カメラの導入が進んでおり、犯罪の検挙率が大幅に上がったと言われている。これらの動きに伴い、監視するだけでなく、個人を特定する認識技術などの応用も進められている。「見ているだけ」のモニタリングから、「見て何かをする」という、より積極的なモニタリングを目指す動きはやはりある。

確かにプライバシーの問題も叫ばれているが、例えば高齢者のモニタリングの場合には、システムの存在によりいつも見守られているという安心感を生み出すとも考えられ、前述の防犯カメラの場合には、カメラの存在により犯罪が抑制されるという効果もある。このように、モニタリングシステムには、いくつかの負の要素を上回るほどのプラスの効果が期待できるはずである。カメラを含めたシステムそのものの形態、デザイン、価格なども含めて実現への道を進めていきたい。

第10章 結言

10.1 本論文のまとめ

本論文を以下のような観点からまとめる。

10.1.1 福祉制御工学の確立を目指して

本論文では、福祉制御工学という新しい学問体系を確立することを目指し、その第一歩を踏み出した。

これまでの福祉工学研究と異なり、実用場面を大いに意識する一方で、計測・制御工学、モーションコントロールの考え方をベースに、理論展開も含めて技術的により深い議論も同時に行う新しい学問分野としての「福祉制御工学」を提唱し、この中で本研究は「ことはじめ」的な意味をもっている。本論文で示した研究は「福祉制御工学」の体系化を目指した一歩であり、将来の福祉制御工学の研究につながる可能性も示すことができたことは確かである。

この中で、「福祉」という人間の主観や内面的要素、精神的要素が大いにかかわってくるものと、「計測・制御工学」という常に客観的であるものとをむすびつけるという、「福祉制御工学」の最も基幹となる要素に対しアプローチを行った。特に人間機械協調系の議論において、被験者を用いたアンケート評価実験を通して、人間の主観や内面的要素にまで入り込み議論を広げた結果、人間と協調する機械をどのように制御すべきかということに対するいくつかの指針を示すことができ、人間機械協調系モーションコントロールの一つの枠組を確立できたことが本研究の大きな成果である。

本論文で示した各研究項目は、

1. 目、つまり視覚情報を用いた支援
2. 腕、つまり力や動作補助に関する支援
3. 足、つまり移動に関する支援

と多岐にわたる。もちろんこの他の技術要素も考えられうる。今後も引き続き、本研究のような可能性を見出していくことが、「福祉制御工学」の体系化に近づく道であると考えている。

10.1.2 人間と計測制御システムのより良い関係性の構築

本論文で目指したものは、高齢者支援を目的としたさまざまな計測制御システムの検討と、その人間とのより良い関係性を見出すことであった。特に本論文の一つのキーワードである「パワーアシスト技術」において、人間と機械がインタラクションをもちながらどのように動作をすればよいか、人間と機械のどちらが歩み寄り主体的にはたらくかという観点や、その操作者の意向に対しどのように制御系を設計すべきかという指針について、実験的検討も含めてより明確なものにした。

第2,3,4章のパワーアシストロボットの制御に関する研究においては、位置でアシストするか力でアシストするかという本質的な議論からスタートし、位置制御をベースとするアシスト手法と力制御をベースとするアシスト手法を提案した後、パワーアシストロボットへの要求事項であるいくつかの点からアンケート評価実験を通して評価を行った。これを”人間と機械の距離”という観点から考察した結果、位置制御ベース型手法は、安定した位置軌道を自動的に作り出す意味から、ある程度機械が人間側に歩み寄り、機械が主体的に動作する手法であり、一方、力制御ベース型手法は、人間が大いにその調整能力を発揮して主体的に動作し、機械はあくまで力の補助を行うだけであるという一つの見解を導いた。また、操作者の感じる操作性向上に関し、可変インピーダンスを用いたアシスト制御法を提案したが、これについてもアンケート評価実験を通じて、操作者が機械にある程度まかせてしまいたいのか、逆に人間が主体的に調整したいかという議論に至った。これらの見解は絶対的な科学的根拠があるものではなく、妥当性についても今後さらなる検討が必要であり、今はまだ、あくまで単なる一つの考え方にすぎないが、パワーアシストロボットの設計指針の一つとしても重要な要素となりうるものであると考えている。

第7章で述べたパワーアシスト車椅子の後方転倒防止を目指したアシスト制御法の検討についても、アンケート評価実験を通し、前輪浮上が絶対に起こらない極めて安全なアシスト制御法を望むか、ある程度浮上が起こっても力のアシスト感を優先させたいかというさまざまな操作者の意向、そしてそれに合わせたいいくつかのアシスト制御法を見出し、パワーアシスト車椅子の一つの設計指針を明らかにした。

これら本論文の第1章から9章までの議論全体を通して、「福祉」という人間の主観や内面的要素、精神的要素が大いにかかわってくるものと、「制御工学」という常に客観的であるものとをむすびつける一つの糸を見出すことができ、このことは「福祉制御工学」の最も基幹となる要素の一つとして意義があると考えている。制御系を設計するだけにとどまらず、多くの被験者を用いたアンケート評価実験を通して、人間の主観や内面的要素にまで入り込み議論を広げた結果、人間と協調する機械をどのように制御すべきかということに対する指針を示すことができ、人間機械協調系モーションコントロールの一つの枠組を確立できたことが本論文の大きな成果である。

10.2 各研究項目における結論と今後の課題

本論文で示した各研究項目それぞれにおける結論と今後の課題について以下に示す。

10.2.1 高齢者支援を目指したパワーアシストロボットの制御

本研究においては、介護動作の補助や労働補助など、とくに高齢者支援を目的としたパワーアシストロボットの制御法の確立を目指した。パワーアシスト動作に登場する三者〈操作者・機器・環境〉とその望ましい関係性、重要となる要求項目、さらに用途と制御手法から見たパワーアシスト形態の分類について最初に明確にした。これまでパワーアシスト制御においてあまり検討されなかった要求事項として、操作者ができるだけ環境側の挙動や重さを感じることができる、さらに、福祉応用で重要となる多様性への対応、つまりさまざまな人間、環境、場面に対応するための自由度の多い設計ができる、などの要求項目を設定し、その後の制御系設計や実験的検討において考察を加えていった。また、多くの被験者を用いたアンケート評価実験を通して、“人間と機械の距離”という観点や操作者の様々な意向、「福祉」という人間の主観や内面的要素とのかかわりを考察した。

三者のインタラクションに注目した制御法では、位置でアシストするか力でアシストするかというパワーアシスト制御の本質的な部分の議論も行い、被験者によるアンケート評価を含めた実験的検討を通して各手法の特徴や優位性を見出した。また、操作者の感じる操作性の向上を目的として、可変インピーダンスを用いた制御と、ロボットと環境が一体となることによる慣性変動について安定性の面から深く議論し、実験的検討を行った。これらの研究により、高齢者支援へ応用する際のいくつかの指針を明らかにすることができたと言える。今後はここで示した可能性を実際の介護動作補助や労働補助に具体的にどのように生かせるかを検討していくことになる。

10.2.2 電動パワーアシスト車椅子のアシスト制御法と様々な走行場面に 対応する多機能制御法

本研究においては、人間と機械の協調によって走る電動パワーアシスト車椅子について、その基本的なアシスト手法と、さまざまな状況に対応するための多機能制御法について、製作した実機による実験や多くの被験者を用いたアンケート評価実験を通して考察を行った。現在市販されているパワーアシスト車椅子は数も種類も多くなく、また制御機能面においてもまだ多くの問題点が存在している。ここで提案し実験的検討を行いたいいくつかの制御手法が、今後のパワーアシスト車椅子の高機能化と普及に貢献するところは少なくないと考えている。

パワーアシスト車椅子の基本的なアシスト手法について、これまでにないさまざまな新しいアプローチを示した。パワーアシストロボットの制御と同様に、何の規範値を用意する

かという本質的な議論から出発し、トルクや位置、速度、慣性などの制御をベースとしたアシスト制御法を検討し、様々な走行環境へ対応する上での可能性をいくらか示した。また、後方転倒防止を目指したアシスト制御法や安全なウィリー動作の実現など、実際の走行場面で不可欠な機能の実現手法を提案し、男女を問わず多くの被験者を用いてアンケート評価実験を行った。これまでにないアプローチにより、操作者がどのような意向をもち何を望むか、そしてそれらがアシスト制御手法とどのようなかかわりをもつかを明確にしたと言える。

本研究で取り上げた課題以外にもさまざまなものがある。アシスト走行する上での左右輪のバランスや直進性、カーブする動作への対応などもまだ議論していない。また被験者評価においても実際の高齢者、障害者に使用してもらったり、さまざまな走行環境での実験的検討を行う必要がある。これらについては今後取り組んでいきたい。

10.2.3 非日常性検出を目指した高齢者モニタリングシステム

本研究においては、簡単なカメラを用いて一人暮らしの高齢者の非日常的な動きを検出する新しいモニタリングシステムを提案した。最初に、これまでの関連研究、企業の動きなども広く調査した上で、提案システムの意義や位置づけも明確にした。次に、自己組織化マップ (SOM) による学習手法、固有空間法とパラメトリック固有空間法 (PEM) に基づく非日常性検出アルゴリズムを提案し、いくつかの実験を通してその有効性を確認した。

実用に向けては、プライバシーの問題、背景画像や照明条件の変化などさまざま考えられるが、本手法のような考え方を基盤にして一つのモニタリングシステムとして確立できるものと考えている。カメラによる同様のシステムを用いて、長いスパンでの健康状態を把握し、徐々に変化・悪化していく様子を自動的に検出できるシステムも今後検討したい。

10.2.4 産業用ロボットの異常動作を検出するモニタリングシステム

本研究においては、高齢者モニタリングシステムの提案に基づき、さらにこの考え方が「福祉」という枠を越えて広くさまざまなモニタリングシステムに応用できるととらえ、その一例として、工場で動く産業用ロボットの異常動作を検出するモニタリングシステムに応用した。

ロボット制御システムと完全に独立なモニタリングシステムとして、その有効性と意義、位置づけを明確にした後、固有空間法、パラメトリック固有空間法に基づく異常動作検出実験を、2軸ロボットを用いて行った。実際に起こりうる異常動作をロボットに模擬させてその異常検出を行った実験からも、本手法の有効性が確認された。とくにこの中でも、速度解析を行う際に黄金分割法を適用することで大幅に計算時間を短縮できることを示し、高齢者や産業用ロボットに限らず広く用いられるモニタリングシステムとしての一つの形を

確立することができたと言える。

本実験では、2次元的に動く平面ロボットを用いて実験を行ったが、実際の産業用ロボットのように3次元的にさまざまな動作をするロボットを用いて実験的検討を行い、さらに背景画像や照明条件の変化などに対する検討を行うことが今後の課題となる。

10.3 将来にむけての福祉機器

本論文のまとめの一つとして、将来にむけての福祉機器のあり方について議論する [101][102]。

<これまでの反省事項>

工学側の立場から考える場合、なかなかユーザ側の都合や使っている場面を想定できないため、得てして非現実的なものをつくってしまいがちである。例えば、生体情報計測や徘徊追跡のために、高齢者の身体に装着させるセンサも開発されつつあるが、24時間肌身離さずセンサを装着することなど到底不可能であり、使いものにならない。また、自立を損ねたり身体拘束を強いたりするような機器も考えがちである。海外で市販されている自立支援ロボットも、数多くは販売されておらず、普及には至っていない。コスト面や安全性だけでなく、さらに大きな問題があるはずである。

全く同じタイプの機器であれば、手間も費用もかからず低コスト化が望めるから普及するはず、というのは大きな間違いである。例えば車椅子を例にとると、ユーザによっては体動、麻痺、身体の変形等も違い、結局使いにくいものとなる。場合によってはすり落ち、転倒等の事故につながることもある。個々の高齢者の状態、症状の進行状況、ニーズに合わせる必要がやはりある。今後は、「だれが、いつ、どこで」使うか、に合わせる個性・状況対応型を目指すハイテク技術だけでなく、再使用やりサイクルを考慮して既存技術を工夫することも必要かつ意義深いことである。

<個性・状況対応技術について>

高齢者の進行する症状、それぞれの個性、そしてそれを取り巻くさまざまな環境に対応できる福祉機器が求められる。少しの工夫で多くの人が使え汎用性のあるものができれば、ヒット商品になるはずである。個性対応技術とは、ロバスト性、あるいは学習・適応技術という言葉で表現されうるかもしれない。これまでのローテク応用に留まらず、より高度の技術に出番が回ってくるはずである。

また、使用者のニーズが製作者の側に十分伝わっていないという現状がある。ユーザの立場に立ち、両者の考え方の格差を埋めて研究を行う、というのが理想ではあるが、現実にはやはり難しい。ユーザのニーズを最も正確に把握し表現でき、両者の間に立って架け橋となる人(サービスマン)、あるいはシステムを作り上げることも大事である。

<インタフェースの重要性>

高齢者が高齢者を介護するという現状から考えると、機器を扱うのは当然高齢者となる。

すると当然その機器を使いやすくするインタフェースが重要な意味をもつことになる。例えば、路線バスにIT技術が取り込まれ始めていると最近聞いた。バスがなかなか来ない場合など、バスの位置や道路状況などを携帯電話を通して確認できるようになるかもしれない。しかし、バスを利用するのは高齢者がほとんどである。高齢者みんなが若者のように携帯電話を使いこなすとは考えられない。

IT技術が今後福祉機器に取り入れられていくのは当然のことであろうが、高齢者でも使えるインタフェース技術が大きな役割を担うと考えられる。

< 機器の評価 >

福祉機器が世に出ていけない理由として最も深く関係しているのは、作られた機器に対する評価法であろう。現在のところ、安全性など機器の評価に関する統一された枠組は存在しない。今後、そのような福祉技術に対する医療サイドからの評価とその整理・分析が進められる必要がある。

福祉ロボット・介助ロボットの安全性について、学術的なアプローチもいくらか行われている。生田ら [103] は、ロボットと人間の衝撃力などの危険性に関係する値を規範値とすることにより、危険性・安全性を定量的に評価し、設計と制御の上での安全性を考察している。安全性を議論する観点として、数値のような何らかの具体的かつ統一的な指標が不可欠であると主張している。斉藤ら [104] も、人間とロボットとの接触における安全条件を、そこに生じる干渉力に基づいて定め、その条件を確保するようなロボットの構造を議論している。斉藤 [105] は、人間機械協調系における安全と危険をグラフ理論による多値化表現により検討している。

このように、機器を評価したり、安全性や危険性を評価する場合には、何らかの統一的な定量的指標を基準とすることが重要である。しかしこれらの考え方を実際の医療福祉現場に起こりうる問題にどのようにつなげていくかはまだ議論されていない。この工学的発想を理学、医学サイドと結びつけ、機器評価の枠組を構築することが必ず福祉機器の普及と発展につながるはずである。

< 将来進むべき道とは >

高齢者・障害者の方々は常に、「こういうものがあつたらいいな」というメッセージを発している。今後インターネットを通してそのような意見が言い合える場所ができ、うまく整理されることが望まれる。それらを現実レベルに落として実現することが我々の一つの役割である。

そして、機能性はもちろんのこと、自分も使ってみたいと思うような見た目の格好よさも大事である。大きなごつい機械ではなくSF映画に出てくるようなものが好まれるはずである。高性能だけど見た目だけではわからない、“さりげない高性能化”を目指していくことも一つの道である。

10.4 福祉工学と福祉制御工学の将来

本論文の最後に、これまで行ってきた研究、調査に基づき、「福祉工学の将来」について考える。

工学的支援においてまず最初に求められることは、実際に使用する場面における要求事項をきちんと把握して整理することである。私自身がこれまで聞いたことでもあるが、工学者が勝手に作ってみたものの、実際にもっていくと使いものにならなかったという話が多い。人がやればすむんじゃない？と言われるようなこともある。医者や理学療法士ほどの知識と経験をもつことは難しいが、できるだけ本当の要求項目は何であるかを把握する努力をすることが、福祉工学を進める第一歩となるであろう。

次に求められることは、我々の考えたシステムに対し、評価をきちんと行うことである。本研究においても触れたが、人間が含まれる、あるいは対象となるシステムは評価のしかたが大変難しい。何をもってよしとするかが明確でない。結局、何らかの評価値をつくるか、アンケートのようなことをするかぐらいである。被験者による評価を行う際にはインフォームドコンセント、つまり被験に関する説明を受けた上での同意を文書で確認する制度があるが、やはり安全性などの壁もある。福祉機器が普及しない一つの原因でもあるこの「評価の基準」を構築することも今後重要となる。

「福祉」はまさに「生活」そのものであり、工学的支援も含めてそれにたずさわるのは、家族、医者、医療福祉施設、企業、そして大学と幅広い。これらの中における大学の役割は何か？と考えたとき、福祉工学の将来も少し見えてくる。大学での研究がなすべきこと、それは、将来につながる幅広い可能性を示すことであると考え。大学では、企業のように売れるもの、ヒット商品を開発するわけではない。福祉技術は総合技術であり、一分野にとらわれない柔軟な発想、さらに工学的に深い議論や考察、基礎的研究も大学で行う必要がある。とくに高齢者の進行する症状や予想できないさまざまな状況に対応する「個性・状況対応型」を目指すには、そのようなハイテク技術が欠かせない。ときには、「そんな難しいことしなくてもすむんじゃないの？」と言われることも確かにある。アカデミックさと福祉技術が相反するようなこともよくある。しかしそれらの中から将来につながる何かを見つけていくこと、幅広い可能性をより多くの人に知らせていくことが我々の使命ではないだろうか。

参考文献

- [1] 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の将来推計人口 (平成 14 年 1 月推計).
- [2] 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の将来推計人口 (平成 9 年 1 月推計).
- [3] K. Kawamura and M. Iskarous: “Trend in service robots for the disabled and the elderly”, *Proc. of IEEE International Conference of Intelligent Robots and Systems*, pp.1647-654 (1994).
- [4] 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.449 (1999)
- [5] <http://ourworld.compuserve.com/homepages/RehabRobotics/Hand1.htm>
(<http://www.zdnet.co.jp/news/0204/26/secom.html>)
- [6] <http://www.exactdynamics.nl/>
- [7] <http://www.secom.co.jp/>
- [8] 日本ロジックマシン, http://www.nsknet.or.jp/morix_am/index.html
- [9] 内山勝: “ソフトロボティクス”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 6, pp.756-757 (1999).
- [10] <http://www.toyota.co.jp/welcab/main.html>
- [11] <http://www.heartyrun.com/index.html>
- [12] <http://www.develo.co.jp/>
- [13] 木崎喜雄, 山口稔: “介護車両 - 高齢化・高度福祉社会に向けて”, 自動車技術, Vol. 52, No. 6, pp.51-55 (1998).
- [14] http://www2.crl.go.jp/kk/CRL_News/0101/298/3.html
- [15] 交洋貿易株式会社ホームページ
<http://www.kouyoh.co.jp/pages/kaigo/kaigo.html>
- [16] 平成 14 年 9 月 30 日付 朝日新聞一面

- [17] 鎌田実: “高齢者にやさしい移動具を考える - シルバービークル・プロト車の開発 - ”, 日本機械学会誌, Vol. 102, No. 970, pp.546-549 (1999).
- [18] 鎌田実, 藤井直人, 秋山哲男: “高齢者・障害者対応交通システムの研究”, 第14回リハビリ工学カンファレンス講演論文集, pp.561-566 (1999).
- [19] 鎌田実, 齋藤正則, 加藤洋之, 畝田真宏: “高齢者の使用に適した移動媒体の研究”, 日本機械学会第8回交通物流部門大会講演論文集, pp.137-140 (1999).
- [20] 南浩一: “Wheelchair power assist in Sydney Paralympics”, リハビリテーションエンジニアリング, Vol. 16, No. 1, pp.23-24 (2001).
- [21] 永井清, 中西功: “パワーアシスト機能を有する福祉ロボット・アシスト機器の機構と制御”, システム/制御/情報, Vol. 44, No. 12, pp.688-695 (2000).
- [22] 田島孝光, 斎藤之男, 田口慎一: “バイラテラルサーボアクチュエータを用いたオムツ交換支援ロボットの研究”, 第16回ライフサポート学会予稿集, pp.93 (2000).
- [23] <http://www.tyojyu.or.jp/tyojyu/mirai/p23.htm>
- [24] <http://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/jw2top/jw2top.html>
- [25] 則次俊郎, 安藤文典, 山中孝司: “ゴム人工筋を用いたリハビリテーション支援ロボット (第1報 インピーダンス制御による訓練運動モードの実現)”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 1, pp.141-148 (1995).
- [26] 山本圭治郎, 兵頭和人, 石井峰雄, 松尾崇: “介護用パワーアシストスーツの開発”, 日本機械学会論文集 C, Vol. 67, No. 657, pp.1499-1506 (2001).
- [27] 真田一志: “仮想ばね特性をもつパワーアシスト椅子”, 日本油空圧学会論文集, Vol. 31, No. 2, pp.38-43 (2000).
- [28] H. Kazerooni: “Human/robot interaction via the transfer of power and information signals - Part.I: Dynamics and control analysis”, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1632-1640 (1989).
- [29] H. Kazerooni: “Human/robot interaction via the transfer of power and information signals - Part.II: An experimental analysis”, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1641-1647 (1989).
- [30] H. Kazerooni and S. L. Mahoney: “Dynamics and control of robotic systems worn by humans”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp.379-387 (1991).

- [31] H. Kazerooni and J. Guo: "Human extenders", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp.281-290 (1993).
- [32] H. Kazerooni: "Extender: A case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals", *Proc. of IEEE International Workshop Robot and Human Communication*, pp.10-20 (1993).
- [33] 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", 日本機械学会論文集 C, Vol. 60, No. 572, pp.1337-1343 (1994).
- [34] 林原靖男, 谷江和雄, 荒井裕彦: "パワーアシスト装置の研究(第1報、重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する制御法の提案)", 機械学会論文集 C, Vol. 61, No. 591, pp.4318-4325 (1995).
- [35] 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におけるアシスト比の操作感に基づく評価", 電気学会論文集 C, Vol. 117-C, No. 5, pp.534-539 (1997).
- [36] 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(第2報、重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する制御法の他自由度システムへの適用)", 日本機械学会論文集 C, Vol. 65, No. 629, pp.198-205 (1999).
- [37] K. Nagai, I. Nakanishi, H. Hanafusa, S. Kawamura, M. Makikawa and 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).
- [38] K. Nagai and I. Nakanishi: "Power assist control of robotic orthoses with macro-micro structure in human care", *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.1049-1054 (1999).
- [39] 辻敏夫, 加藤荘志, 金子真: "人間 - ロボット系の追従制御特性", 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, pp.285-291 (2000).
- [40] 村上俊之, 大西公平: "外乱オブザーバに基づいた多自由度ロボットの動特性同定法", 日本ロボット学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp.131-139 (1993).
- [41] K. Ohishi, M. Miyazaki, M. Fujita and Y. Ogino: " H_{∞} observer based force control without force sensor", *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Electronics*, pp.1049-1054 (1991).
- [42] K. Ohishi, M. Miyazaki and M. Fujita : "Hybrid control of force and position without force sensor", *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Electronics*, pp.670-675 (1992).

- [43] M. S. Ben-Lamine, S. Shibata, K. Tanaka and A. Shimizu: “Impedance characteristics of robots considering human emotions”, *JSME International Journal*, Series C, Vol. 40, No. 2, pp.309-315 (1997).
- [44] 山田陽滋, 鴻巣仁司, 森園哲也, 梅谷陽二: “自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案”, 日本機械学会論文集 C, Vol. 68, No. 666, pp.509-516 (2002).
- [45] 梅野孝治, 堀洋一: “2自由度ロボastsサーボ系の構成とマニピュレータの運動制御への応用”, 電気学会論文誌 D, Vol. 110-D, No. 11, pp.1163-1170 (1990).
- [46] 金子智朗, 梅野孝治, 堀洋一: “2自由度ロボastsサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp.830-840 (1991).
- [47] 志村康治, 堀洋一: “ロボットマニピュレータにおける力制御のロボasts化と衝突過程の制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 2, pp.235-245 (1993).
- [48] R. Ikeura and H. Inooka: “Variable impedance control of a robot for cooperation with a human”, *Proc. of IEEE Internatinal Conference on Robotics and Automation*, pp.3097-3102 (1995).
- [49] 池浦良淳: “人間とロボットによる協調作業”, システム/制御/情報, Vol. 44, No. 12, pp.682-687 (2000).
- [50] 堀洋一, 亀井宏映: “低精度エンコーダを用いるサーボモータの高性能制御 - 瞬時速度オブザーバと慣性モーメントの同定 - ”, 電気学会論文誌 D, Vol. 114-D, No. 4, pp.424-431 (1994).
- [51] 垣本映: “高齢者の移動支援のための制御技術”, 計測と制御, Vol. 40, No. 5, pp.357-362 (2001).
- [52] E. Abel, T. Frank, G. Boath and N. Lunan: “An evaluation of different designs of providing powered propulsion for attendant propelled wheelchairs”, *Ann. International Conference of IEEE EMBS*, Vol. 13, No. 4, pp.1863-1864 (1991).
- [53] G. B. Cremers: “Hybrid-powered wheelchair: a combination of arm force and electrical power for propelling a wheelchair”, *Journal of Medical Engineering and Technology*, Vol. 13, No. 1/2, pp.142-148 (1989).
- [54] 内山敦, 福井巧: “パワーアシスト車椅子の制御システム”, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, pp.204-208 (1997).

- [55] R. A. Cooper, T. A. Corfman, S. G. Fitzgerald, M. L. Boninger, D. M. Spaeth, W. Ammer and J. Arva: "Performance assessment of a pushrim-activated power-assisted wheelchair control system", *Trans. on IEEE Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 1, pp.121-126 (2002).
- [56] 橋詰努, 川田徳紀, 谷川知嘉子, 杉山琢磨: "介助用補助動力付き車いすの使用評価", 第15回リハビリ工学カンファレンス講演論文集, pp.85-88 (2000).
- [57] R. A. Cooper: "A system approach to the modeling of racing wheelchair propulsion", *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 27, No. 2, pp.151-162 (1990).
- [58] 垣本映, 松田英夫, 関口行雄: "介助型パワーアシスト車いすの開発", 精密工学会誌, Vol. 65, No. 8, pp.1126-1130 (1999).
- [59] 堀洋一, J. Wrenn, 茅陽一: "他励直流機を用いた慣性シミュレータ", 昭和62年電気学会全国大会, pp.762-763 (1987).
- [60] 堀洋一: "負荷トルクオブザーバを用いた慣性シミュレータの設計", 昭和62年電気学会産業応用部門全国大会, pp.439-442 (1987).
- [61] Y. Takahashi, S. Ogawa and S. Machida: "Step climbing using power assist wheel chair robot with inverse pendulum control", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1360-1365 (2000).
- [62] Y. Takahashi, T. Takagaki, J. Kishi and Y. Ishii: "Back and forward moving scheme of front wheel raising for inverse pendulum control wheel chair robot", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3189-3194 (2001).
- [63] 厚生省: "平成9年人口動態統計 上巻".
- [64] 品川佳満, 岸本俊夫, 谷川智宏, 難波克司, 井筒岳, 太田茂: "赤外線センサによる独居高齢者の在宅行動モニタリングシステム", 第16回ライフサポート学会講演予稿集, pp.18 (2000).
- [65] 品川佳満, 岸本俊夫, 太田茂: "独居高齢者の居室滞在時間の分析と自動緊急通報システムへの応用", ライフサポート, Vol. 13, No. 3, pp.9-16 (2001).
- [66] 五味壮平, 坂田和実, 大竹佐久子, 井筒岳, 新貝りゅう蔵: "赤外線センサー群から得られた生活データの統計的解析 - 異常発見支援システムの開発へ向けて -", ライフサポート, Vol. 13, No. 4, pp.10-17 (2001).
- [67] 沢田史子, 大藪多可志, 南戸秀仁, 辻隆之: "マハラノビスの距離による居住者のふるまい同定", 第16回ライフサポート学会講演予稿集, pp.19 (2000).

- [68] 沢田史子, 大藪多可志, 南戸秀仁: “ニオイセンサのマハラノビスの距離による人間のふるまい判別”, ライフサポート, Vol. 13, No. 2, pp.2-7 (2001).
- [69] 大藪多可志, 広林茂樹, 木村春彦: “複数の酸化スズ系ガスセンサによる独居老人世帯モニタリング”, 電気学会論文誌 E, Vol. 117-E, No. 6, pp.314-320 (1997).
- [70] 林貴宏, 木村春彦, 大藪多可志: “遺伝的アルゴリズムを用いたガスセンサ観測信号からの人間の活動検知”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J83-A, No. 4, pp.412-422 (2000).
- [71] 大竹佐久子, 小川充洋, 鈴木亮二, 井筒岳, 岩谷力: “ウェルフェアテクノハウス水沢における独居高齢者のモニタリングシステムの開発”, ライフサポート, Vol. 13, No. 4, pp.2-9 (2001).
- [72] 鈴木亮二, 大竹佐久子, 井筒岳, 岩谷力: “独居高齢者宅における生活時間調査による行動解析”, ライフサポート, Vol. 13, No. 4, pp.18-25 (2001).
- [73] B.-H. Yang, S. Rhee and H. Asada: “A twenty-four hour tele-nursing system using a ring sensor”, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.387-392 (1998).
- [74] 保坂良資: “移動体通信網による簡便な徘徊老人屋外進出検知システムの評価”, 第16回ライフサポート学会講演予稿集, pp.59 (2000).
- [75] 青木広宙, 中島真人: “FG 視覚センサを用いたトイレ用監視システム”, 画像ラボ, pp.1-5 (2000. 1).
- [76] 吉村拓巳, 堀内郁孝, 東祐二, 中島一樹, 藤元登四郎, 千原國宏, 田村俊世: “老人転倒モニタの開発とその評価”, 電気学会論文誌 C, Vol. 120-C, No. 12, pp.1846-1853 (2000).
- [77] 中井宏章, 渡辺睦, 三宅啓夫, 高田敬輔, 山下馨, 新盛英世, 石原謙: “動画像処理による呼吸モニタリングシステム”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J83-D-II, No. 1, pp.280-288 (2000).
- [78] 青木茂樹, 大西正輝, 小島篤博, 岩橋由雄, 福永邦雄: “人物の行動パターンに注目した異常通知システム”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU2000-220, pp.139-146 (2001).
- [79] T. Darrell and A. Pentland: “Space-time gesture”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.355-340 (1993).
- [80] 高橋勝彦, 関進, 小島浩, 岡隆一: “ジェスチャー動画像のスポットティング認識”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77-D-II, No. 8, pp.1552-1561 (1994).

- [81] 大和淳司, 大谷淳, 石井健一郎: “隠れマルコフモデルを用いた動画像からの人物の行動認識”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 12, pp.2556-2563 (1993).
- [82] 武士展照, 春山智, 小林哲則: “HMM を用いた手振り認識”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU96-8 (1996).
- [83] J. W. Davis and A. F. Bobick: “The representation and recognition of human movement using temporal templates”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.928-934 (1997).
- [84] H. Murase and S. K. Nayar: “Visual learning and recognition of 3-D objects from appearance”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 14, pp.5-24 (1995).
- [85] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: “コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望”, 新技術コミュニケーションズ (1998).
- [86] 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正: “多変量解析法”, 日科技連 (1981).
- [87] M. A. Turk and A. P. Pentland: “Face recognition using eigenspaces”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.586-591 (1991).
- [88] 村瀬洋, S. K. Nayar: “多重解像度と固有空間表現による3次元物体のイメージスポッティング”, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 10, pp.2234-2243 (1995).
- [89] H. Murase and S. K. Nayar: “Illumination planning for object recognition using parametric eigenspace”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 12, pp.1219-1227 (1994).
- [90] H. Murase and R. Sakai: “Moving object recognition in eigenspace representation: Gait analysis and lip reading”, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 17, pp.155-162 (1996).
- [91] T. Watanabe and M. Yachida: “Real time recognition and gesture degree information using multi input image sequences”, *Proc. of International Conference on Pattern Recognition*, No. 2, pp.1855-1858 (1998).
- [92] 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋: “パターン認識”, オーム社 (1998).
- [93] T. Kohonen: “The self-organizing map”, *Proc. of IEEE*, Vol. 78, No. 9, pp.1464-1480 (1990).
- [94] T. コホネン著, 中谷和夫訳: “自己組織化と連想記憶”, シュプリングァーフェアラク東京 (1993).

- [95] 高村松三, 小平一穂: “Kohonen ネットワークによるごみ焼却炉の画像処理”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J80-D-II, No. 7, pp.1722-1729 (1997).
- [96] 田中雅博, 古河靖之, 谷野哲三: “自己組織化マップを利用したクラスタリング”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J79-D-II, No. 2, pp.301-304 (1996).
- [97] 前泰志, 白井良明, 三浦純, 久野義徳: “オプティカルフローとエッジを用いた複雑背景下での移動物体の追跡”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 1, pp.103-108 (1997).
- [98] 長町三生: “産業用ロボットとヒューマンエラー”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp.635-638 (1995).
- [99] 杉本旭, 池田博康: “産業用ロボットの安全性と高信頼性技術”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, pp.788-791 (1996).
- [100] T. Suzuki and M. Tomizuka: “Joint synthesis of fault detection and controller based on structure of two-degree-of-freedom control system”, *Proc. of the 38th Conference on Decision and Control*, pp.3599-3604 (1999).
- [101] 立花隆: “21 世紀のバイオエンジニアリング技術開発への提言”, 日本機械学会誌, Vol. 104, No. 996, pp.720-723 (2001).
- [102] 齋藤正男: “高齢社会と福祉技術開発戦略”, 日本機械学会誌, Vol. 104, No. 996, pp.742-745 (2001).
- [103] 生田幸士, 野方誠: “福祉ロボットの安全性に関する統一的評価法の提案 - 危険性の定量化による安全設計対策の評価”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 3, pp.363-370 (1999).
- [104] 斉藤剛, 杉本旭: “人間との共存条件とロボットの安全制御に関する研究”, 日本機械学会第 1 回 JSME ロボメカ・シンポジア講演論文集, pp.71-74 (1996).
- [105] 斉藤之男: “介助用ロボットの安全操作に関する研究 - 障害者の操作評価とハザード - ”, 日本機械学会第 1 回 JSME ロボメカ・シンポジア講演論文集, pp.67-70 (1996).
- [106] 浅野長一郎, 江島伸興: “基本多変量解析”, 日本規格協会 (1996).
- [107] 中川聖一: “パターン情報処理”, 丸善株式会社 (1999).
- [108] 鈴木誠道, 飯田善久, 石塚陽: “C による数値計算法”, オーム社 (1997).

研究業績

国内論文誌

- [1] 関弘和, 堀洋一: “高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出”, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 2, pp.182-188, 2002.
- [2] 関弘和, 堀洋一: “カメラ画像系列の固有空間表現に基づく産業用ロボットの異常動作検出”, 電気学会論文誌 D. (査読中)

国際会議

- [1] H. Seki and Y. Hori: “Detection of abnormal human action using image sequences”, *Proceedings of IPEC*, pp.1272-1277, Tokyo, Japan, 2000.
- [2] H. Seki and Y. Hori: “Detection of abnormal action for monitoring system of aged people and industrial robot”, *The Fifth Seoul National University - The University of Tokyo Joint Seminar on Electrical Engineering*, pp.37-42, 2001.
- [3] H. Seki and Y. Hori: “Detection of abnormal movement of industrial robot using image sequence”, *Proceedings of The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'01)*, pp.1698-1703, Denver, America, 2001. (Best Presentation Award 受賞)
- [4] H. Seki, M. Iso and Y. Hori: “How to design force sensorless power assist robot considering environmental characteristics - position control based or force control based -”, *Proceedings of The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'02)*, pp.2255-2260, Sevilla, Spain, 2002.

口頭発表

- [1] 関弘和, 堀洋一: “カメラ画像系列を用いた人間の異常動作検出”, 平成 11 年電気学会産業応用部門全国大会, Vol. 3, pp.559-562, 1999.
- [2] 関弘和, 堀洋一: “カメラ画像系列を用いた人間の異常動作検出”, 映像情報メディア学会冬季大会, ITE'99, pp.86, 1999.

- [3] 関弘和, 堀洋一: “高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出”, 電子情報通信学会総合大会, Vol. 1, pp.460-461, 2000.
- [4] 関弘和, 堀洋一: “カメラ画像系列を用いた産業用ロボットの異常動作検出”, 平成 12 年電気学会産業応用部門全国大会, Vol. 1, pp.507-510, 2000.
- [5] 関弘和, 堀洋一: “可変インピーダンスを用いたセンサレスパワーアシストロボットの制御”, 平成 13 年電気学会産業応用部門全国大会, Vol. 1, pp.601-604, 2001.
- [6] 関弘和, 堀洋一: “環境変動にロバストな力センサレスパワーアシストロボットの制御”, 平成 14 年電気学会産業応用部門全国大会, Vol. 1, pp.213-216, 2002.
- [7] 関弘和, 堀洋一: “位置と力に基づくパワーアシストロボットの制御とその被験者評価による解析”, 平成 15 年電気学会全国大会, 2003. (発表予定)

共著論文

- [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-02-41, pp.149-154, 2002.
- [2] 佐藤仁彦, 関弘和, 畠直輝, 堀洋一: “パワーアシスト車椅子におけるウィリー機能の実現”, 電気学会産業計測制御研究会 IIC-02-40, pp.143-148, 2002.
- [3] 小安雄一, 畠直輝, 関弘和, 堀洋一: “パワーアシスト車椅子における後方転倒現象の解析とその制御”, 電気学会産業計測制御研究会 IIC-03, 2003. (発表予定)

その他

- [1] 関弘和, 堀洋一: “カメラ画像系列を用いた人間の異常動作検出”, 東京大学工学部附属総合試験所年報, Vol. 58, pp.259-264, 1999.
- [2] 小堀敏之, 関弘和: “高齢社会に向けての新技术”, 電気学会誌 (学生のページ), Vol. 118, No. 12, pp.775-778, 1998.
- [3] 山中絵里, 伊藤大樹, 関弘和: “実用化に向けた研究を行うために～現場における福祉機器開発とユーザの声”, 電気学会誌 (学生のページ), Vol. 122, No. 9, pp.631-634, 2002.

謝 辞

本研究を進めるにあたり、指導教官の堀洋一教授には、御多忙の中さまざまな御指導・御助言を頂きました。研究以外の面においても、人間としての多くの大切なことを学び、身につけることができ、堀教授の下での5年間の学生生活、研究生活を大変幸せに感じております。ここに深く感謝致します。

内田利之技官には、研究室全体のこと、計算機環境、実験装置などさまざまな点で御尽力下さいました。本当に有難うございました。

ポスドクのチャンダンさん、博士課程の及部さんには、さまざまな角度からの数多くの貴重な御意見を頂きました。お兄さんの存在でとても頼もしい先輩でした。

後輩の坂東君、畠君、小安君、谷君、佐藤君、磯君には、本研究を進める上で一緒に汗を流し苦勞を共にして頂き、また研究以外の息抜きや雑談、遊びに関しても大変親しくして下さいました。堀研究室でのこの5年間は一生の宝になります。本当に有難うございました。

また、後輩の馬君、岡野君、戴君、張君、呉君、井上さん、古川君、福井君、青木君にもさまざまなことを教えて頂き、楽しく、かつ充実した学生生活、研究生活を送ることができました。毎日議論や作業をともにし、一緒に汗を流した一日一日が今となってはとても楽しかったなあと感じると同時に、研究室を卒業することを大変寂しく思います。秘書の木村さんには研究室の生活環境などさまざまな面でお世話になりました。心より感謝致します。また皆様には、本論文で行った被験者評価実験で何回も協力して頂きました。有難うございました。

また、南浩一さんにはパワーアシスト車椅子のユーザとしての御意見だけでなく、福祉機器全体についての考え方や我々の研究に対するアドバイスを数多く頂きました。今後の我々の研究においても貴重な財産となります。本当に有難うございました。(株)ヤマハ発動機の戸倉様には、パワーアシスト車椅子の研究を始めるにあたり、実機の詳細について度々御説明を頂き、購入の際にも大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

最後に私を多くの面で支えて下さる両親、またこの他名前を挙げることのできなかつた多くの方々にも心より感謝申し上げます。

付録 A 主成分分析法

A.1 主成分分析とKL展開

主成分分析は、統計学の一分野である多変量解析において、多数の多次元のデータから主要な成分を抽出する方法としてよく知られている。KL展開は、線形空間における特徴ベクトルの分布を最もよく近似する部分空間を求める方法であり、次元削減法の一つとしてパターン認識に限らず信号処理などでもよく使われる。KL展開と主成分分析は、数学的にはほとんど等価である。

ここでは、主成分分析の考え方を示すことにより、固有空間法の詳しい原理を説明する。

A.2 主成分分析のデータと目的

主成分分析に用いられるデータは、 n 個のサンプルについて測られた p 種類の特性値である。これを $x_{\alpha i}$ という記号で表すと、表 A.1 の左半分のようなになる。

また、共分散行列 Q は次のように表される。

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1p} \\ Q_{12} & Q_{22} & \ddots & Q_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{1p} & Q_{2p} & \cdots & Q_{pp} \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$Q_{ii'} = \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^n (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)(x_{\alpha i'} - \bar{x}_{i'}) \quad (\text{A.2})$$

主成分分析法 (Principal Component Analysis) とは、 p 個の特性値 (p 変量) x_1, x_2, \dots, x_p のもつ情報を次の 2 つの条件を満足する m 個 ($m < p$) の総合特性値 z_1, z_2, \dots, z_m に要約する手法である。この m 個の総合特性値を第 1、第 2、 \dots 、第 m 主成分 (principal component) とよぶ。

同じ対象について測られた特性値には、何らかの相関があるのが普通である。もし完全に無相関であれば、その 1 つ 1 つについて n 個サンプルについて評価すればいいが、相関がある場合は、1 つ 1 つ解析すると、その相関をもたらしした共通要素については重複して解析することになりムダが生じる。そこで主成分分析法では、この p 個の特性値の重みつき平均と考えられる式 (A.3) の m 個の総合特性値を、その係数 (重み) が以下の条件を満たす

表 A.1: p 個の特性値とそれから導かれる m 個の主成分

サンプル	もとの特性値						抽出された主成分					
No.	x_1	x_2	\cdots	x_i	\cdots	x_p	z_1	z_2	\cdots	z_k	\cdots	z_m
1	x_{11}	x_{12}	\cdots	x_{1i}	\cdots	x_{1p}	z_{11}	z_{12}	\cdots	z_{1k}	\cdots	z_{1m}
2	x_{21}	x_{22}	\cdots	x_{2i}	\cdots	x_{2p}	z_{21}	z_{22}	\cdots	z_{2k}	\cdots	z_{2m}
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
α	$x_{\alpha 1}$	$x_{\alpha 2}$	\cdots	$x_{\alpha i}$	\cdots	$x_{\alpha p}$	$z_{\alpha 1}$	$z_{\alpha 2}$	\cdots	$z_{\alpha k}$	\cdots	$z_{\alpha m}$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
n	x_{n1}	x_{n2}	\cdots	x_{ni}	\cdots	x_{np}	z_{n1}	z_{n2}	\cdots	z_{nk}	\cdots	z_{nm}
平均	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\cdots	\bar{x}_i	\cdots	\bar{x}_p	\bar{z}_1	\bar{z}_2	\cdots	\bar{z}_k	\cdots	\bar{z}_m

ように定める。

$$\left\{ \begin{array}{l} z_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \cdots + l_{1p}x_p \\ z_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \cdots + l_{2p}x_p \\ \cdots \\ z_k = l_{k1}x_1 + l_{k2}x_2 + \cdots + l_{kp}x_p \\ \cdots \\ z_m = l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \cdots + l_{mp}x_p \end{array} \right. \quad (\text{A.3})$$

ただし、

$$l_{k1}^2 + l_{k2}^2 + \cdots + l_{kp}^2 = \sum_{i=1}^p l_{ki}^2 = 1 \quad (k = 1, 2, \cdots, m) \quad (\text{A.4})$$

[条件]

1. z_1 の分散は、 (x_1, x_2, \cdots, x_p) のあらゆる 1 次式のもつ分散のうち最大である。 z_2 の分散は、 z_1 と無相関なあらゆる 1 次式のなかで最大である。以下同様にして、 z_m の分散は、 $z_1, z_2, \cdots, z_{m-1}$ のすべてと無相関な 1 次式の中で最大である。
2. x_1, x_2, \cdots, x_p に直交変換をほどこして得られる変数 z_1, z_2, \cdots, z_p は互いに無相関になるように定められ、このうちその分散が大きいものから順に z_1, z_2, \cdots, z_m とする。

A.3 主成分の導出

ここで、前節で述べた条件 1. に基づいて主成分を求める。いま、係数 $\{l_{1i}\} (i = 1, 2, \cdots, p)$ が定まって、第 1 主成分 z_1 の値が n 個のサンプルの各々について計算され、表 A.1 の右半

分のうち $\{z_{\alpha 1}\}(\alpha = 1, 2, \dots, n)$ が求められたとする。このとき、 z_1 の分散 $V[z_1]$ は、

$$\begin{aligned} V[z_1] &= \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^n (z_{\alpha 1} - \bar{z}_1)^2 \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^p l_{1i} (x_{\alpha i} - \bar{x}_i) \right\}^2 \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^p \sum_{i'=1}^p l_{1i} l_{1i'} \sum_{\alpha=1}^n (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)(x_{\alpha i'} - \bar{x}_{i'}) \\ &= \sum_i \sum_{i'} l_{1i} l_{1i'} Q_{ii'} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

と書かれる。条件 1. より、この値が式 (A.4) のもとで最大にならなければならないから、Lagrange の未定係数法を用いると、

$$W = \sum_{i=1}^p \sum_{i'=1}^p l_{1i} l_{1i'} Q_{ii'} - \lambda \left(\sum_{i=1}^p l_{1i}^2 - 1 \right) \quad (\text{A.6})$$

を最大にするように l_{1i} を定めればよいことになる。この W を l_{1i} で偏微分してゼロとおくと、

$$\frac{\partial W}{\partial l_{1i}} = \sum_{i'} l_{1i'} Q_{ii'} - \lambda l_{1i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (\text{A.7})$$

となる。これを $i = 1, 2, \dots, p$ について並べて書くと、

$$\left\{ \begin{array}{l} (Q_{11} - \lambda)l_{11} + Q_{12}l_{12} + \dots + Q_{1i}l_{1i} + \dots + Q_{1p}l_{1p} = 0 \\ Q_{12}l_{11} + (Q_{22} - \lambda)l_{12} + \dots + Q_{2i}l_{1i} + \dots + Q_{2p}l_{1p} = 0 \\ \dots \\ Q_{1i}l_{11} + Q_{2i}l_{12} + \dots + (Q_{ii} - \lambda)l_{1i} + \dots + Q_{ip}l_{1p} = 0 \\ \dots \\ Q_{1p}l_{11} + Q_{2p}l_{12} + \dots + Q_{ip}l_{1i} + \dots + (Q_{pp} - \lambda)l_{1p} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A.8})$$

となる。この連立方程式が自明な解以外の解を持つための必要十分条件は、単位行列を I として、

$$|Q - \lambda I| = \begin{vmatrix} Q_{11} - \lambda & Q_{12} & \dots & Q_{1p} \\ Q_{12} & Q_{22} - \lambda & \dots & Q_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{1p} & Q_{2p} & \dots & Q_{pp} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{A.9})$$

である。これを λ の多項式に展開した式

$$a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + \dots + a_p \lambda^p = 0 \quad (\text{A.10})$$

は Q の固有多項式になり、この $\{\lambda_k\}, \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ は行列 Q の固有値 (eigenvalue) である。また、 λ_k に対する式 (A.8) の自明でない解 $\{l_{ki}\} (i = 1, 2, \dots, p)$ は行列 Q の固有ベクトル (eigenvector) である。

得られた p 個の解の中に W を最大にするものがあるはずである。これらの解はいずれも式 (A.7) を満たすから、

$$\sum_{i'} l_{ki'} Q_{ii'} = \lambda_k l_{ki} \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (\text{A.11})$$

となり、これを式 (A.5) に代入すると、

$$V[z_1] = \sum_i \sum_{i'} l_{ki} l_{ki'} Q_{ii'} = \sum_i l_{ki} (\lambda_k l_{ki}) = \lambda_k \sum_i l_{ki}^2 \quad (\text{A.12})$$

すなわち、最大にすべき z_1 の分散は、 $\lambda_k (k = 1, 2, \dots, p)$ のいずれかに等しいということになる。よって、 λ_k のうちの最大である λ_1 をとり、 λ_1 に対応する固有ベクトルを $\{l_{1i}\} (i = 1, 2, \dots, p)$ とすればよい。

第 2 主成分以下の係数もほとんど同様の手順で求められ、次のような結論に至る。

「 m 個の主成分を求める係数 $\{l_{ki}\} (k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, p)$ は、もとの変数 x_1, x_2, \dots, x_p の共分散行列 V の固有値の大きいほうから順に m 個 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ とり、対応する固有ベクトル $\{l_{1i}\}, \{l_{2i}\}, \dots, \{l_{mi}\} (i = 1, 2, \dots, p)$ をあてればよい。」

固有空間法ではこの考えを用い、大きい固有値に対応する固有ベクトル e_1, e_2, \dots を求め、これらを基底とすることで、学習する画像ベクトルの特徴を最もよく近似する部分空間を構築する。

付録B 固有値と固有ベクトルの計算法

本研究では固有空間法を用いたが、その際に固有値と固有ベクトルを効率的に計算する必要がある。固有空間法では、固有値を大きい順にいくつか用いるので、それに適したべき乗法を用いた。また、その固有値に対する固有ベクトルは特異値分解により計算した。

B.1 べき乗法による固有値の計算

A を $n \times n$ 行列、 A の固有ベクトル $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots$ は \mathbf{x}_n は線形独立であるとし、それらに対応する固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ は、

$$|\lambda_1| > |\lambda_2| \geq |\lambda_3| \geq \dots \geq |\lambda_n| \quad (\text{B.1})$$

を満たすとする。以下で、任意の n 次元ベクトル $\mathbf{v}^{(0)}$ が式 B.2 により、しだいに λ_1 に対する A の固有ベクトル \mathbf{x}_1 に近付いていくことを示す。

$$\mathbf{v}^{(k)} = A\mathbf{v}^{(k-1)} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (\text{B.2})$$

固有ベクトル $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ が線形独立なので、任意の n 次元ベクトル $\mathbf{v}^{(0)}$ はこれらの線形結合で表すことができる。すなわち、係数 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ を用いて、

$$\mathbf{v}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \beta_i \mathbf{x}_i \quad (\text{B.3})$$

と表せる。したがって、 $A\mathbf{x}_i = \lambda_i \mathbf{x}_i$ を考慮すれば、

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^{(k)} &= A^k \mathbf{v}^{(0)} = A^k \sum_{i=1}^n \beta_i \mathbf{x}_i = \sum_{i=1}^n \beta_i \lambda_i^k \mathbf{x}_i \\ &= \lambda_1^k \left(\beta_1 \mathbf{x}_1 + \sum_{i=2}^n \beta_i \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_1} \right)^k \mathbf{x}_i \right) \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

と書ける。式 (B.1) より $|\frac{\lambda_i}{\lambda_1}| < 1$ であるから、十分大きい k に対して、

$$\mathbf{v}^{(k)} \cong \lambda_1^k \beta_1 \mathbf{x}_1 \quad (\text{B.5})$$

となり、 $\mathbf{v}^{(k)}$ はしだいに \mathbf{x}_1 の方向を向くようになる。また、

$$\mathbf{v}^{(k+1)} \cong \lambda_1^{k+1} \beta_1 \mathbf{x}_1 \quad (\text{B.6})$$

であるから、

$$\lambda_1 \cong \frac{\mathbf{v}^{(k)T} \mathbf{v}^{(k+1)}}{\mathbf{v}^{(k)T} \mathbf{v}^{(k)}} \quad (\text{B.7})$$

のように λ_1 の近似値も求められる。

実際には、式 B.2 の手続きでは $\{\mathbf{v}^{(k)}\}$ は発散したり、あるいはゼロに収束したりしてしまうので、常に大きさ (ノルム) が一定値 (例えば 1) になるようにスケーリングを施す必要がある。以下にべき乗法のアルゴリズムを示す。

[アルゴリズム]

[Step1] $\|\mathbf{v}^{(0)}\| = 1$ なる適当な初期ベクトル $\mathbf{v}^{(0)}$ を選び、 $k = 0$ とする。

[Step2] 以下のように、最大固有値の近似値 $\mu^{(k+1)}$ と、対応する固有ベクトルの近似値 $\mathbf{u}^{(k+1)}$ を更新する。

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = A\mathbf{v}^{(k)} \quad (\text{B.8})$$

$$\mu^{(k+1)} = \mathbf{v}^{(k)T} \mathbf{u}^{(k+1)} \quad (\text{B.9})$$

$$\mathbf{v}^{(k+1)} = \frac{\mathbf{u}^{(k+1)}}{\|\mathbf{u}^{(k+1)}\|} \quad (\text{B.10})$$

[Step3] $\|\mathbf{v}^{(k+1)} - \mathbf{v}^{(k)}\| < \varepsilon$ であれば、 $\mu^{(k+1)}$ を A の絶対値最大の固有値の近似、 $\mathbf{v}^{(k+1)}$ をそれに対応する固有ベクトルの近似として終了。そうでなければ $k := k + 1$ として Step1 へ。ただし、 ε はあらかじめ決められた微小な正数である。

B.2 特異値分解を用いた固有ベクトルの計算

本研究で、画像ベクトル集合の共分散行列 Q は、

$$Y \equiv [\mathbf{y}_1 - \mathbf{c}, \mathbf{y}_2 - \mathbf{c}, \dots, \mathbf{y}_n - \mathbf{c}] \quad (\text{B.11})$$

$$Q \equiv YY^T \quad (\text{B.12})$$

と表した。ここで Q の次元は画像ベクトル \mathbf{y}_i の次元に等しく、固有値の計算コストが大きくなる。

(N : 画素数、 I : 画像の数、 $Y : N \times I$ 、 $Q = YY^T : N \times N$ 、 $Q' = Y^T Y : I \times I$) Q の固有値を λ 、固有ベクトルを \mathbf{v} とすると、

$$YY^T \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v} \quad (\text{B.13})$$

が成り立つ。ここで両辺に左から Y^T をかけると、

$$Y^T YY^T \mathbf{v} = \lambda Y^T \mathbf{v} \quad (\text{B.14})$$

付録C 黄金分割法

固有空間上の投影点列間の距離を求める式 (9.2) の計算において、2変数関数に対する黄金分割法を用いた。そのアルゴリズムの詳細を以下に示す。

Step1 初期試行点 $\mathbf{x}_1^1 = (a_1, b_1)^T$ を与え、勾配 \mathbf{g} を計算する。

$$\begin{aligned}\mathbf{g} &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_1^1} = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial f}{\partial a} \right|_{a=a_1} \\ \left. \frac{\partial f}{\partial b} \right|_{b=b_1} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{f(a_1+\Delta_a, b_1) - f(a_1-\Delta_a, b_1)}{2\Delta_a} \\ \frac{f(a_1, b_1+\Delta_b) - f(a_1, b_1-\Delta_b)}{\Delta_b} \end{pmatrix} \\ \mathbf{x}_2^1 &= (a_2, b_2)^T = \mathbf{x}_1^1 + \alpha_k \mathbf{g} \\ \mathbf{u}^1 &= \mathbf{x}_1^1 + (1 - \gamma)\alpha_k \mathbf{g} \\ \mathbf{v}^1 &= \mathbf{x}_1^1 + \gamma\alpha_k \mathbf{g}\end{aligned}$$

とおき、 $f(\mathbf{u}^1), f(\mathbf{v}^1)$ を計算し、 $k = 1$ とする。ただし、 $\gamma = 0.618\dots$ である。

Step2 もし、 $\|\mathbf{x}_2^k - \mathbf{x}_1^k\| < l_1$ ならば、 $\mathbf{x}_{min} = \frac{\mathbf{x}_1^k + \mathbf{x}_2^k}{2}$ として Step5 へ。そうでなければ Step3 へ。

Step3 $f(\mathbf{u}^k) \geq f(\mathbf{v}^k)$ ならば、

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_1^{k+1} &= \mathbf{u}^k, \quad \mathbf{x}_2^{k+1} = \mathbf{x}_2^k, \quad \mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{v}^k \\ \mathbf{v}^{k+1} &= \mathbf{x}_1^{k+1} + \gamma(\mathbf{x}_2^{k+1} - \mathbf{x}_1^{k+1}) \\ f(\mathbf{u}^{k+1}) &= f(\mathbf{v}^k)\end{aligned}$$

と $f(\mathbf{v}^{k+1})$ を計算する。もし、 $f(\mathbf{u}^k) < f(\mathbf{v}^k)$ ならば

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_1^{k+1} &= \mathbf{x}_1^k, \quad \mathbf{x}_2^{k+1} = \mathbf{v}^k, \quad \mathbf{v}^{k+1} = \mathbf{u}^k \\ \mathbf{u}^{k+1} &= \mathbf{x}_1^{k+1} + (1 - \gamma)(\mathbf{x}_2^{k+1} - \mathbf{x}_1^{k+1}) \\ f(\mathbf{v}^{k+1}) &= f(\mathbf{u}^k)\end{aligned}$$

と $f(\mathbf{u}^{k+1})$ を計算する。

Step4 $k := k + 1$ として、Step2 へ。

Step5 $\|\mathbf{x}_{min} - \mathbf{x}_{min}^{old}\| > l_2$ ならば、 $\mathbf{x}_{min}^{old} = \mathbf{x}_{min}$ として、Step1 へ。そうでなければ、 \mathbf{x}_{min} を最小解として終了。

付 録 D 各実験装置の詳細

D.1 2軸DDロボットとその周辺装置について

パワーアシストロボットの制御実験と産業用ロボットモニタリング実験において使用した2軸DDロボット装置の全体風景と構成を図D.1,D.2に示す。



図 D.1: 2軸DDロボット装置の全体風景

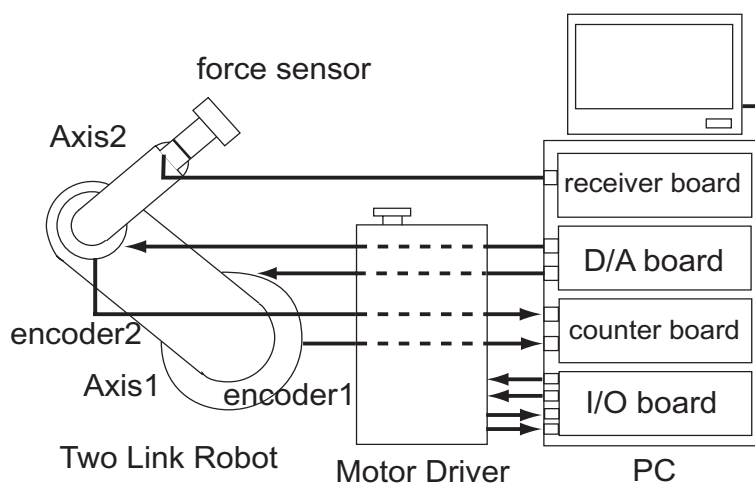


図 D.2: 2軸DDロボット装置の構成図

D.1 2軸 DD ロボットとその周辺装置について

2軸 DD ロボット装置におけるインタフェースボードや周辺装置には以下の表のものを使用した。

	メーカー名	品名・型式
パラレル入出力ボード	(株) インタフェース	32 点デジタル入出力共用ボード PCI-2703
DA 変換ボード	(株) インタフェース	16 ビット 4 点 DA 変換ボード IBX-3304
カウンタボード	(株) インタフェース	エンコーダカウンタボード PCI-6201E
カウンタボードケーブル	(株) インタフェース	DIO 用一括シールド融着ケーブル CAB-6401
力センサ	(株) ニッタ	6 軸力覚センサ IFS-67M2SA25-I40
力センサレシーバボード	(株) ニッタ	レシーバボード ISA-2105

次に、パワーアシストロボットの制御に関する実験に用いた力センサとおもりを図 D.3, D.4 に示す。DD ロボット先端に取り付ける力センサは、(株) ニッタの 6 軸力覚センサを用い、専用のレシーバボードを介して PC に取り込んだ。また、同様に先端に取り付ける慣性変動用のおもりには、1.25[kg], 2.5[kg] のバーベルを数枚利用し、約 1[kg] の鉄心で固定した。

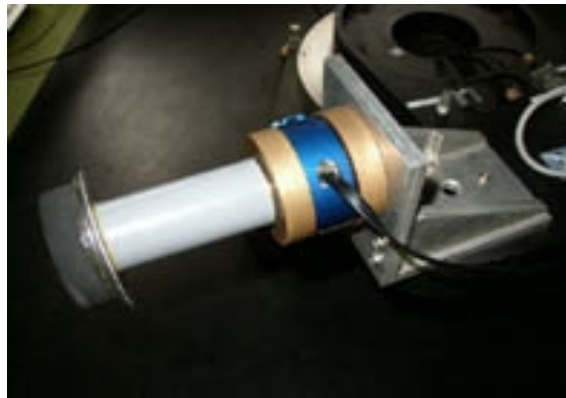


図 D.3: 力センサ



図 D.4: 慣性変動に用いたおもり

D.2 画像キャプチャシステムについて

高齢者モニタリングと産業用ロボットモニタリングに関する実験においては、図 D.5 と以下の表に示すような二種類の CCD カメラと画像キャプチャボードを使用した。計算機の OS は Linux であり、Video4Linux という Linux でビデオキャプチャーデバイスを使うための API 仕様を利用した。使用したキャプチャボードには、Bt848 という、メインメモリやビデオカードの VRAM に CPU を介せず直接データを転送することができる PCI ビデオキャプチャーチップが搭載されている。



(a) CCD カメラ 1



(b) CCD カメラ 2

図 D.5: モニタリング実験に用いた CCD カメラ

	メーカー名	品名・型式
CCD カメラ 1	(株)I-O DATA	コンパクト CCD カメラ CCD-CAP
CCD カメラ 2	(株)ツクモ電子工業	小型モニターカメラ (カラー) TC-203
画像キャプチャボード	(株)I-O DATA	ビデオキャプチャボード GV-VCP/PCI

D.3 電動パワーアシスト車椅子について

パワーアシスト車椅子の実験装置は、ヤマハ製 JWII を改造する形で製作した。トルクセンサやモータ、制御基板の一部を利用し、周辺にその他のセンサ取り付けや PC とのインタフェースを実現した。使用したヤマハ製 JWII の全体図と内部の基板の様子を図 D.6, D.7 に示す。

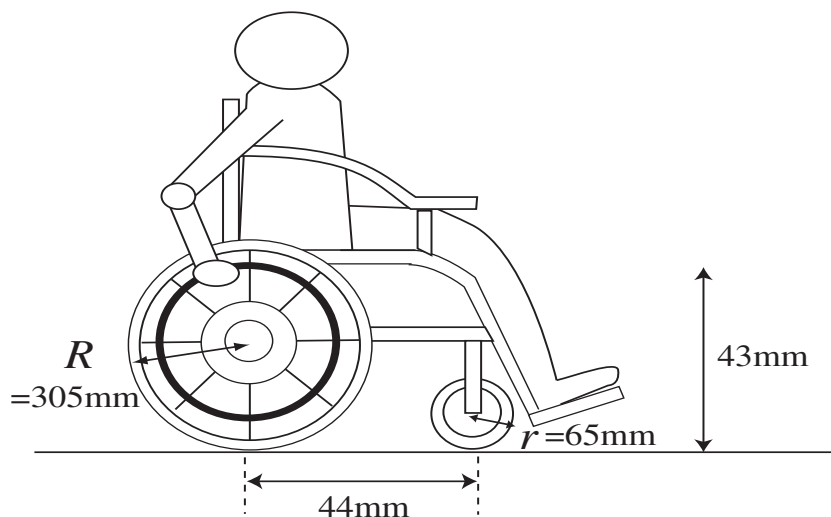


図 D.6: JWII の全体図



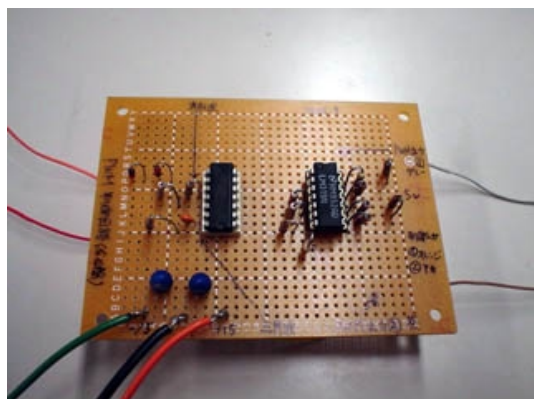
図 D.7: JWII の基板

計算機からの制御信号から PWM 信号を作り出す PWM 制御回路を作成した。電源は、車椅子の 24V を $\pm 15V$ に変化する電圧変換回路から供給している。回路の様子を図 D.8 に示す。図 D.8 の一番右側の回路は、後に述べるロータリエンコーダの周辺回路である。

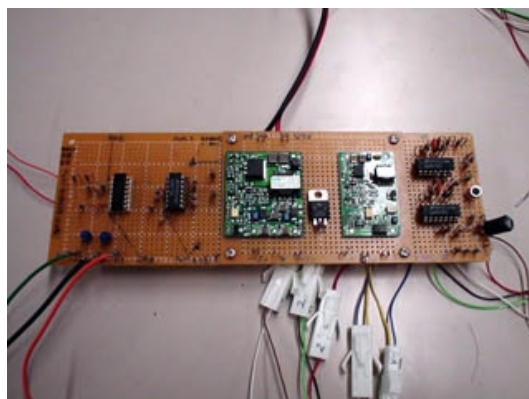
PWM 制御回路では、まずヒステリシス・コンパレータ (シュミット回路) で方形波を発振させて、次に反転型積分回路で三角波に変換した。また、生成した三角波と PC からの

D.3 電動パワーアシスト車椅子について

制御信号の比較回路として、コンパレータ LM319 とその正帰還回路を用いたヒステリシス回路により、車椅子基板に入力する PWM 信号を生成した。



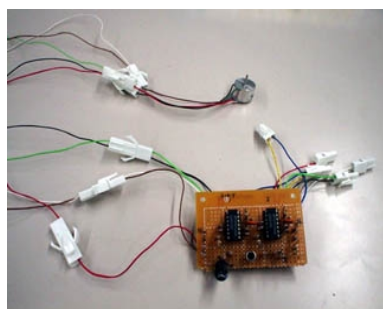
(a) PWM 制御回路



(b) 電圧変換回路と合わせた全体の様子

図 D.8: PWM 制御回路とその周辺回路

パワーアシスト車椅子の両車輪の角度を測るため、それぞれにロータリエンコーダを取り付けた。ロータリエンコーダとその周辺回路、車椅子へ取り付けた様子を図 D.9 に示す。ロータリエンコーダの電源は、図 D.8(c) のように、車椅子の 24V 電源を変換回路により $\pm 5V$ に変換し供給している。エンコーダには波形整形回路がなく、近似正弦波が出力されるため、周辺回路においてコンパレータ LM319 とその正帰還回路を用いたヒステリシス回路により、カウンタボードに入力するパルス波を生成した。



(a) ロータリエンコーダと
その周辺回路



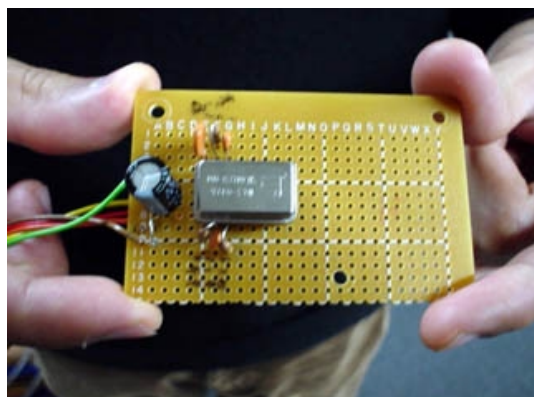
(b) ロータリエンコーダ



(c) 車椅子への取り付け

図 D.9: ロータリエンコーダ

パワーアシスト車椅子の前後方向の速度を測るため、加速度センサを取り付けた。その周辺回路と取り付けについて図 D.10 に示す。実際に車椅子を走らせたときの加速度センサの信号を解析したが、車椅子の走行では特別大きな加速度をもつわけではなく、また、雑音の影響もあるため、精度の良い速度情報はあまり得られなかった。前後方向の位置・速度の情報はロータリエンコーダから得ることとした。



(a) 加速度センサとその周辺回路



(b) 車椅子への取り付け

図 D.10: 加速度センサ

また、車椅子の基板上にトルクセンサやリレーのための電圧信号を送るためにマイコンを用いた。制御信号から PWM 信号を作り出すために前述のアナログ回路を用意したが、マイコンでも同じことができるようにもした。パワーアシスト車椅子に取り付ける加速度センサ、ジャイロセンサ、ロータリエンコーダ、マイコンは以下のものを使用した。

	メーカー名	品名・型式
加速度センサ	(株) マイクロストーン	圧電型 3 軸加速度センサ MA3-04Ab
ジャイロセンサ	STL Japan	HS-EG3 司 21
ロータリエンコーダ	日本電産コパル電子株式会社	光学式エンコーダ RE20F-100-200
マイコン	(株) 秋月電子通商	H8/3052F 使用 AKI-H8 マイコンボード

パワーアシスト車椅子の制御演算を行う計算機として、ART-Linux を搭載したものを用いた。これは、2 軸 DD ロボットの制御に用いた RT-Linux と同様、実時間処理を実現するものであるが、RT-Linux を含めた従来の実時間 OS と異なりメモリ保護機能が有効な非特権レベルで実時間処理を行うため、万が一プログラムに不具合があっても、それ以外の処理やシステム全体は安全であるという特徴をもつ。この計算機のインタフェースには以下のものを用いた。

	メーカー名	品名・型式
AD/DA 変換ボード	(株) インタフェース	12 ビット入力 8 点出力 4 点 $\pm 10V$ 単一レンジ AD/DA 変換ボード CTP-3523
カウンタボード	(株) インタフェース	エンコーダカウンタボード PCI-6201E