



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	作業者の動作予測と予測の信頼度を考慮したパワーアシスト制御方法に関する研究
Author(s)	小林, 憲弘
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第12198号
Issue Date	2016-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k12198
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61842
Type	doctoral thesis
File Information	Norihiro_Kobayashi.pdf



博士論文

作業者の動作予測と予測の信頼度を考慮した
パワーアシスト制御方法に関する研究

小林 憲弘

2016 年 1 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科に
博士 (情報科学) 授与の要件として提出した博士論文である。

小林 憲弘

審査委員： 主査 田中 孝之准教授
副査 金子 俊一教授
山下 裕教授

作業者の動作予測と予測の信頼度を考慮した パワーアシスト制御方法に関する研究*

小林 憲弘

概要

本研究ではパワーアシスト台車の消費電力を抑え、低出力化することを目的とする。この目的を実現するためにパワーアシスト台車の機構の改善策と、その機構における制御方法を提案する。提案する機構においては限られたモーターの出力によってトルク飽和が問題となるため、トルク飽和が起きても目標の負担軽減を達成できるように負担軽減を力積で評価する指標を導入する。提案手法では、初期の入力から目標速度に達するまでの歩数を予測して適切な予測モデルに切り替えることでトルク飽和によって不足する力積の大きさを求める。その不足する力積に基づいてアシスト比を変化させることで目標の負担軽減率を達成するパワーアシスト制御方法を提案した。この提案手法の有効性を、シミュレーションと、パワーアシスト台車を用いた実験によって示す。

キーワード: パワーアシスト台車, 操作予測, 躍度最小モデル, トルク飽和, 負担軽減率

*北海道大学 大学院情報科学研究科 システム情報科学専攻 博士論文, SSI-DT79093177, 2016 年 1 月 22 日.

Power assist control method with operation prediction and its reliability[†]

Norihiro Kobayashi

Abstract

The purpose of this study is to develop a method to control power-assist systems with an energy regeneration system that achieves the desired load-reduction ratio even if torque saturation occurs. In this article, we use the ratio of the assist force impulse to the operator-force impulse as an indicator to evaluate the control method. The proposed method predicts the needs of the operator and delivers the desired load-reduction ratio by predicting the number of steps while acceleration from the initial input and switching to the appropriate prediction model. We evaluated the effectiveness of the proposed method through both simulation and experiments with a power assisted cart.

Keywords: Power assisted cart, Operation prediction, Minimum jerk model, Energy regeneration, Torque saturation, Load reduction ratio

[†]Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT79093177, January 22, 2016.

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の位置付け	2
1.3	本研究の目的	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	躍度最小モデルによる予測と 信頼度を考慮した制御	5
2.1	コンセプト	5
2.1.1	パワーアシストシステムの低出力化による改善	5
2.1.2	改良に伴って発生する課題	5
2.1.3	負担軽減率の導入	6
2.1.4	負担軽減率補償制御	7
2.1.5	予測の信頼度	8
2.1.6	本手法を適用する前提条件	8
2.2	アルゴリズム	9
2.2.1	躍度最小モデルを用いた予測	9
2.2.2	測定値に近い速度曲線の探索	12
2.2.3	不足する力積の計算	12
2.2.4	力積の分配	13
2.2.5	信頼性を考慮した力積の分配	14
2.2.6	アシスト比の制御則	15
2.3	シミュレーションによる効果の確認	16
2.3.1	従来手法との比較	17
2.3.2	予測誤差を加えた加速	17
2.3.3	信頼度を考慮したことによるアシスト比の変化	21
2.3.4	信頼度を考慮した制御の効果	22
2.4	実験環境	28
2.4.1	システム構成	28
2.4.2	実験条件	29
2.5	実験結果	31
2.5.1	加速時における各パラメータの推移	31
2.5.2	従来手法と提案手法の比較	32
2.5.3	信頼度を考慮した場合の影響	33
2.6	考察	33

第 3 章	歩行モデルによる 予測を用いた制御	35
3.1	信頼度を考慮した LRRC の課題	35
3.2	歩行モデルによる予測を用いた LRRC の適用条件	36
3.2.1	物理条件	36
3.2.2	操作者の意図	36
3.2.3	予測の誤差に対するリスク	37
3.3	歩行の影響を考慮した LRRC のアルゴリズム	38
3.3.1	キャリブレーション	38
3.3.2	初期入力からの予測	38
3.3.3	予測モデル	42
3.3.4	アシスト力の計算	44
3.4	実験結果	46
3.4.1	各ステップのモデル予測の誤差	46
3.4.2	歩行を考慮した LRRC と考慮しない LRRC の比較	46
3.5	考察	49
第 4 章	結論	51
4.1	負担軽減率補償制御について	51
4.2	信頼性を考慮した制御方法の影響について	52
4.3	歩行モデルによる予測を用いた制御方法について	52
4.4	まとめと今後の課題	52
	謝辞	53
	参考文献	55

目 次

2.1	従来より小さいモータとバッテリーを使用することで発生するトルク飽和 . . .	6
2.2	提案手法の概要	7
2.3	信頼度の変化の概要	8
2.4	負担軽減率補償制御のフローチャート	10
2.5	不足する力積の分配イメージ	13
2.6	信頼度を考慮した力積の分配	14
2.7	アシスト比の計算に必要な変数の定義	15
2.8	従来手法と提案手法における負担軽減率の比較	17
2.9	アシスト比固定のシミュレーション結果（従来手法）	18
2.10	アシスト比可変のシミュレーション結果（提案手法）	19
2.11	入力に誤差を加えたシミュレーション結果	20
2.12	誤差を含む5つの入力に対する負担軽減率の最大値と最小値	21
2.13	信頼度を考慮していないシミュレーション結果（予測値が正しいと仮定）	22
2.14	信頼度を考慮したシミュレーション結果（予測値が正しいと仮定）	23
2.15	加えられた速度と台車の速度（作業者の入力予測よりも大きかった場合）	24
2.16	信頼度を考慮した効果（作業者の入力予測よりも大きかった場合）	25
2.17	加えられた誤差と台車の速度（作業者の入力予測よりも小さかった場合）	26
2.18	信頼度を考慮した効果（作業者の入力予測よりも小さかった場合）	27
2.19	信頼度を考慮し、誤差を加えたシミュレーション結果	28
2.20	実験システムの概要	29
2.21	パワーアシスト台車の外観	30
2.22	実験に用いた錘と制御器	31
2.23	作業者の入力とアシスト比の推移	32
2.24	負担軽減率の推移	32
2.25	信頼度を考慮したシミュレーション結果における負担軽減率の最大値と最小値	33
2.26	実験結果における負担軽減率の最大値と最小値	34
3.1	定常速度の分布	37
3.2	加速にかかる歩数の分布	37
3.3	歩行を考慮した LRRC のキャリブレーションのフローチャート	39
3.4	歩行を考慮した LRRC のフローチャート	40
3.5	歩行を考慮した LRRC のブロック線図	40
3.6	各歩数における速度の比較	41
3.7	各歩数における入力の比較	41

3.8	各歩数に対する v_{stop} の実験結果	42
3.9	作業者の実際の入力と予測モデル	43
3.10	トルク飽和を考慮した予測アシスト力	44
3.11	計算された不足する力積	45
3.12	目標の負担軽減率を達成するためのアシスト力	45
3.13	予測モデルと実際の入力の比較	46
3.14	予測モデルに対する実際の力積の誤差	47
3.15	作業者の入力に対するアシスト力と台車の速度	48
3.16	歩行予測モデルを考慮した LRRC における負担軽減率の比較	48
3.17	実験結果における負担軽減率の範囲	49

表 目 次

2.1	従来手法と提案手法の比較	9
2.2	シミュレーション時に用いたパラメータ	16
2.3	パワーアシスト台車の仕様	30
3.1	歩数予測の実験結果	41
3.2	実験で使用された変数の値	43
3.3	歩行予測に対する負担軽減率	47

第1章 序論

本章では、まず本研究の背景と目的を述べ、従来の課題とその解決方法について述べる。また、本論文の全体構成について概説する。

1.1 本研究の背景

近年、先進国では建設現場や工場の作業者の平均年齢が上昇傾向にあり、労働力不足や作業者の負担軽減が課題となっている [1]。その解決策の1つとして、パワーアシスト機器の研究開発が進んでいる。パワーアシスト機器を導入することで、作業者が運搬できる荷物の量が増えたり、作業者にかかる負担が軽減されるため、作業者一人当たりの生産性向上や作業者の負担軽減といった効果が期待される。特にほぼ全ての現場に存在する台車のパワーアシスト化は潜在的な需要が大きく、既にいくつかの製品が市場投入され現場で運用されている。パワーアシスト台車は1998年から平野らによって研究され始め [2]、2002年には松下電工株式会社が病院での使用を念頭においた全方向移動型パワーアシストカートを製品化している [3]。大きなものでは、原子力発電所の定期点検工事における運搬作業の安全化および省力化を目的として、株式会社日立プラントテクノロジーによって開発されたパワーアシスト運搬台車がある [4]。また、近年は比較的安価な小型のパワーアシスト台車や [5]、農業での使用を想定して屋外でも使用できるパワーアシスト台車も販売されている。このようにパワーアシスト台車はこれまで原子力発電所から農業まで幅広い分野で使われるようになってきたが、これらの製品は価格と重量と可動時間という、全てのパワーアシスト装置に共通する課題を抱えており、本格的な普及には至っていない。例えば、前述の原子力発電所用の運搬台車は最大1,000kgの荷物を積載できるが、その一方で走行可能時間は約2時間とされている。市販されている一般的なパワーアシスト台車についても、走行可能時間は数時間程度のものが多く、価格も安いもので数十万円程度である。

一般的に、パワーアシスト台車を設計する場合にはトルク飽和を考慮する必要がある。従来のパワーアシスト技術では作業者の入力を数倍に増幅して出力するので、常に目標のアシスト比を保証するには、大きな入力に対してもトルク飽和が起らないように大きな出力が出せるように設計しなくてはならない。例えばアシスト比を2として作業者が100Nの力を出す場合、システムは200Nの力を出すまでトルク飽和しないように設計されなくてはならない。従来のパワーアシスト制御法では、これがパワーアシスト台車を設計する際の限界となる。アシスト比という従来の評価指標を用いる限り、この限界を超えたパワーアシスト装置を設計することはできない。しかし、アシスト比は瞬時の力に対する指標である。我々は、瞬時の力に対する指標であるアシスト比の代わりに、作業者の入力の総和である力積に対する評価指標を用いることで設計における課題を別のアプローチから解決ができるのではないかと考えた。この力積に対する評価指標を導入することによって

アシスト比を可変にして、目標の負担軽減率を補償するように制御できれば、パワーアシストシステムを設計する際により小さな出力のモーターを使用することが可能になる。

本研究では、この新しい評価指標を用い、制御方法を変えることによって、パワーアシストシステムのハードウェアはそのままに同じ程度の負担を軽減することで、パワーアシストシステムを低出力化する制御方法について検討する。

1.2 本研究の位置付け

パワーアシストシステムの低出力化を狙った研究開発は、大きく分けて（１）要素技術の改善、（２）パワーアシストユニットの改善、（３）製品全体の改善、の３種類に分類される。要素技術の改善の例としては、ギヤ、ベヤリング、タイヤ等各要素の低出力化を狙って様々な研究開発が行われており、特にモータやバッテリーについては各社が競い合って性能が年々向上されている。パワーアシストユニットの改善の例としては、本研究において実験装置として使用したパワーアシスト台車を販売していただいた株式会社山一精工が、一般的な台車に取り付けるだけで使用できるパワーアシストユニットを販売している [6]。また、ヤマハはパワーアシスト車椅子用のアシストユニットを開発している [7]。このように、通常の製品に取り付けるだけでパワーアシストシステム化できるパワーアシストユニットがその汎用性の高さから注目されており、パワーアシストユニット自体の低出力化も年々進んでいる。一方で、パワーアシストシステム全体の構成を見直すことによって大幅な低出力化を実現している例もある。佐藤らは弾性体を利用することによって低出力化と低価格化を実現したセミアクティブパワーアシストシステムについて報告している [8]。このように低出力化を目的としてハードウェアとしてのパワーアシストシステムが進化を続ける一方で、パワーアシストシステムの低出力化を目的とした制御方法についてはあまり研究されていない。本研究では、そのような制御方法を改良することによってパワーアシストシステム全体の低出力化を実現する方法について検討する。

これまでパワーアシストの制御手法としては、一般的に人力比例制御が用いられてきた。人力比例制御とは、作業者の入力に比例して増幅させた力をシステムがアシスト力として出力する方式であり、操作感覚が一定であるというメリットがある。また、ハンドルにかかる力に比例して台車の速度を制御する方式も存在する [2]。この方式はモーターのトルク制御を行う必要が無く、実装が比較的容易であるというメリットがあるが、速度が早くなるほど大きな力が必要となるという課題がある。また、パワーアシスト台車を想定したものではないが、藪下らは走行抵抗オブザーバを利用して、走行抵抗が変化しても一定の感覚で走行することができるパワーアシスト制御方法を提案し、その有効性を示している。[9]。この方式では走行抵抗を観測することによって、坂道や荒地などでも一定の操作感覚でパワーアシストを行うことができるというメリットがある。しかし、パワーアシストシステムの低出力化を目的とした制御方法についてはあまり研究されていない。本研究では、パワーアシストシステム全体の低出力化を実現することを狙い、制御方法を改善することでパワーアシストシステムのハードウェアはそのままに、より多くの負担軽減を得る方法を検討する。

このような制御方法を実現するには、作業者の初期入力からどれだけの力積が不足するかを適切に予測する必要がある。作業者の意図を認識する方法には大きく分類して２つの

方法がある。1つはカメラやモーションキャプチャのような外界センサを使う方法 [10, 11] で、もう1つは加速度センサやジャイロセンサのような内界センサを使う方法 [12, 13] で、ステレオカメラを使って作業者の意図推定を行うパワーアシストシステム等も報告されている [14]。しかし、これらの方法を一般的なパワーアシスト台車に適用するにはセンサーを追加で取り付ける必要があり、そうするとパワーアシスト台車が高価になってしまい我々の目的を達成することができなくなる。よって、我々は一般的なパワーアシスト台車に取り付けられている歪みゲージと速度センサと荷重計を使って作業者の意図予測をして適切なアシスト力を出力する制御方法を提案する。

1.3 本研究の目的

本研究では、パワーアシスト台車を低出力化するために、従来より小さいモーターを用いたパワーアシスト台車の制御方法を構築する。通常使用されているアシスト比の代わりに負担軽減率を評価の指標として導入し、トルク飽和が起きてもトルク飽和が起きていない時により大きなアシストを行う事で不足する力積を分配することによって、動作全体として目標の負担軽減率を達成する制御方法が実現できれば、より小さい出力のモーターを用いてパワーアシスト台車を設計できるようになる。より小さな出力のモーターでパワーアシスト台車を設計できれば、パワーアシスト台車の導入コストと運用コストを低く抑えることが可能になり、より多くの現場でパワーアシスト台車が導入されることが期待される。

この制御方法を実現するには、不足する力積を予測するために作業者の入力を予測し、予測結果と実際の状況に基いて、トルク飽和時に不足する力積を補うように、トルク飽和が起らない時にアシスト力を増加させるようにアシスト力を制御する必要がある。制御工学やロボット工学ではモデルに基いて予測し制御する方法や状況に応じて制御方法を切替える制御方法について研究されている。本研究ではそのような制御をパワーアシストシステムに適用することでどのような効果が得られるかを明らかにし、その結果として小型軽量のアクチュエータで目標の負担軽減を得る制御方法を実現することを目的とする。

この目的を達成するために、本論文では、人間が無意識に腕を動かした時の数値モデルとして良く知られている躍度最小モデルを予測モデルとして用い、加速が躍度最小モデルにマッチしなかった場合には実験で得られた値に基づいて歩行の影響を考慮した予測モデルに切り替えることによって適切に不足する力積を予測した上で所望の負担軽減率を得る制御方法を考える。更に、予測が外れた場合に対応するために、予測の信頼度を制御方法に織り込む。本研究では、この制御方法の効果を確認するために数値シミュレーションと実際のパワーアシスト台車を用いた実験によって検証を行い、本制御方法の有効性について結論付ける。

1.4 本論文の構成

本論文は、本章を含めて4章から構成される。第2章では、新しい指標である負担軽減率と提案する躍度最小モデルを用いた負担軽減率補償制御について述べる。また、負担軽減率補償制御において予測値の信頼性を考慮することで負担軽減率を改善する方法につい

て述べ、シミュレーションと実験によってその有効性を示し、提案手法を導入することによるメリットについて説明する。第3章では、躍度最小モデルから大きく外れた場合に、予測された加速終了までの歩数に基づいた予測モデルに切り替えて制御を行うことで所望の負担権限率の達成率を改善する方法について述べる。また、実験によって構築した手法の有効性について述べる。第4章では、本論文で述べている研究の内容とその成果を総括する。また、残された今後の研究課題についても述べる。

第2章 躍度最小モデルによる予測と信頼度を考慮した制御

本章では、我々が提案するパワーアシスト台車の制御方法について述べる．また、この提案手法を採用することによるメリットと提案手法が有効となる条件について示し、シミュレーションと実験によって提案手法の有効性を示す．

2.1 コンセプト

2.1.1 パワーアシストシステムの低出力化による改善

本研究では、パワーアシスト台車を低出力化するために、従来より小さいモーターを用いたパワーアシスト台車の制御方法を構築する．通常使用されているアシスト比の代わりに負担軽減率を評価の指標として導入し、トルク飽和が起きてもトルク飽和が起きていない時により大きなアシストを行う事で不足する力積を分配することによって、動作全体として目標の負担軽減率を達成する制御方法が実現できれば、より小さい出力のモーターを用いてパワーアシスト台車を設計できるようになる．より小さな出力のモーターでパワーアシスト台車を設計できれば、パワーアシスト台車の導入コストと運用コストを低く抑えることが可能になり、より多くの現場でパワーアシスト台車が導入されることが期待される．

2.1.2 改良に伴って発生する課題

一方で、パワーアシスト台車を低出力化すると、トルク飽和が発生するという課題が発生する．図 2.1 に我々が提案する手法によって発生する問題を示す．

一般的なパワーアシスト台車では、作業者が大きな力を入力した場合に、設定したアシスト比で作業者の力を増幅してもトルク飽和が起こらないようにシステムが設計されている．これに対し、提案手法ではモーターの出力が小さいので、図 2.1 に示されるように大きな入力が入るとトルク飽和が発生し、所望のアシスト比を維持できない可能性が出てくる．トルク飽和を含むシステムの制御に関しては、古くから数多くの研究成果がこれまでに報告されている [15, 16, 17]．また、入力飽和系に対するコントローラの設計方法に関しては最近の研究成果が和田らによって紹介されている [18]．パワーアシストにおけるトルク飽和に関しては、荒井らが静的負荷と動的負荷を分離して、それぞれに異なるアシスト比を設定することでトルク飽和を回避するパワーアシスト手法を提案している [19]．これらはトルク飽和に対して良好な結果を示しているが、我々の提案する機構に適用できるような、市販のパワーアシスト製品に組み込まれているセンサのみを使った場合に、トルク

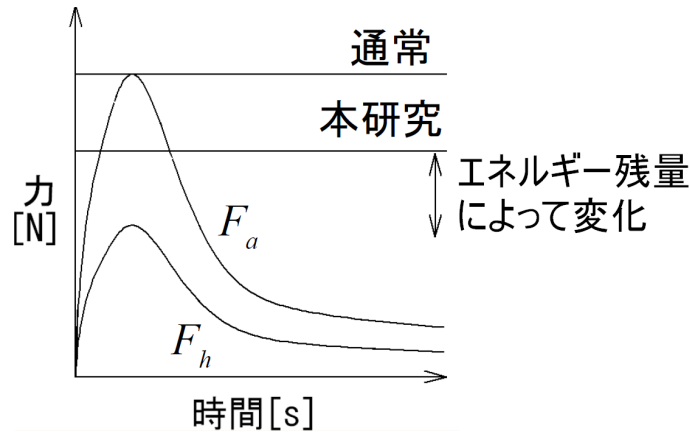


図 2.1: 従来より小さいモータとバッテリーを使用することで発生するトルク飽和

飽和が起きても目標の負担軽減を達成させる制御方法についてはあまり研究されていない。

2.1.3 負担軽減率の導入

一般的に、パワーアシスト台車を設計する際にはトルク飽和を考慮する必要がある。従来のパワーアシスト技術では作業者の入力を数倍に増幅して出力するので、常に目標のアシスト比を保証するには、大きな入力に対してもトルク飽和が起こらないように大きな出力が出せるように設計しなくてはならない。例えばアシスト比を2として作業者が100Nの力を出す場合、モーターは200Nの力を出すまでトルク飽和しないように設計されなくてはならない。従来のパワーアシストではこれが設計する際の限界となる。アシスト比という従来の評価指標を用いる限り、この限界を超えたパワーアシスト装置を設計することはできない。しかし、アシスト比は瞬時の”力”に対する指標である。我々は、瞬時の”力”に対する指標であるアシスト比の代わりに作業者の入力の総和である”力積”に対する評価指標を用いることで、従来のアプローチと異なる方法で問題を解決できるのではないかと考えた。この”力積”に対する評価指標を導入することによってアシスト比を可変にすれば、ある瞬間においては目的の負担軽減が行えなくても、加速を開始してから終了するまでの期間で見ても余裕のあるときに大きなアシストを行うことで評価を改善することができ、パワーアシストシステムを設計する際により小さな出力のモーターを使用することが可能になる。一般的なパワーアシストシステムではアシスト比が一定のことが多いが、アシスト比を可変にしているものもある。市販されているパワーアシスト自転車は、道路交通法によって高い速度ではアシスト比が下がるように設計されている[20]。パワーアシスト台車においても、押力に応じてアシスト比を変化させる製品があり[21]、アシスト比を可変にする制御方法は珍しいものではない。そこで我々の手法ではアシスト比を可変にし、”力積”に対する評価指標として、”負担軽減率”という指標を導入する。提案手法では、時間 t における負担軽減率 β を次式で評価する。

$$\beta(t) = \int_0^t \frac{F_a(t)}{F_h(t)} dt \quad (2.1)$$

ここで、 F_a はアシスト力、 F_h は作業者の力である。

2.1.4 負担軽減率補償制御

図 2.2 は、提案する制御手法のコンセプトを示している。図 2.2 に示すように、台車押し作業において台車の速度から今後の作業者の操作入力を予測する。作業者の意図によって入力のパターンは異なるが、ここでは作業者はダイナミクスの変化を感じとりながら、目標速度まで滑らかに台車を加速させるという仮定に基づいて予測を行う。予測した結果、トルク飽和が起るとわかった場合には不足する力積の大きさをトルク飽和が起こる前後に分配する。しかし、予測した結果には当然誤差が含まれるため、予測した値の信頼度を考慮して分配を行うことを考える。提案手法では予測誤差は正規分布に従うと仮定し、時間の推移によって変化する標準偏差の値から予測した値の信頼度を決定する。この信頼度に基づいて不足する力積を分配することで、加速終了時において所望の負担軽減率が得られるようにアシストを行う。

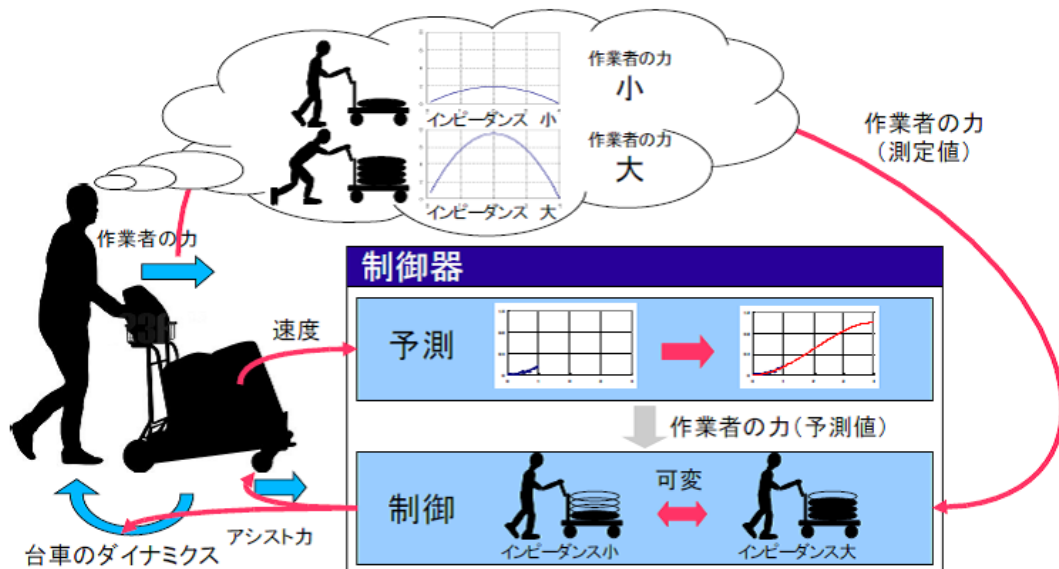


図 2.2: 提案手法の概要

2.1.5 予測の信頼度

図 2.3 は、時間経過に伴う予測誤差のイメージを示している。予測した結果には当然誤

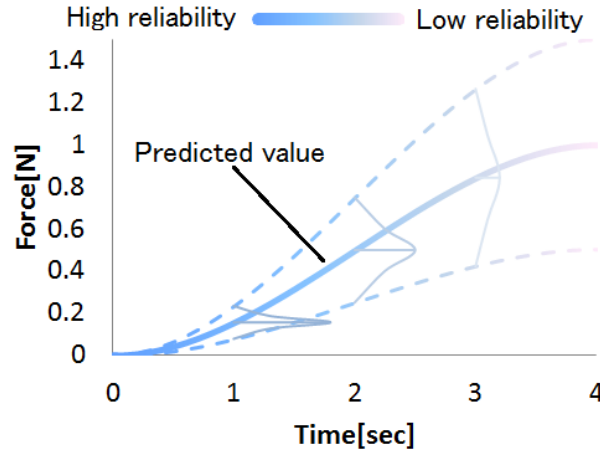


図 2.3: 信頼度の変化の概要

差が含まれるため、予測した値の信頼性を考慮して不足する力積の分配を行う。Fig2.3 で示されるように、近い将来における予測値は信頼度が高いが時間経過に伴って信頼度は低くなる。言い換えると、予測誤差の標準偏差 σ は時間経過に伴って大きくなると言える。先に示した方法で躍度最小軌道をフィッティングした場合、予測誤差の標準偏差 σ は時間経過に伴い次式のように推移する。

$$\sigma(t) = \int_{t_p}^{t_f} |A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3| dt \quad (2.2)$$

予測誤差が正規分布に従うと仮定すると、予測した値の信頼度 C は以下の式で表される。

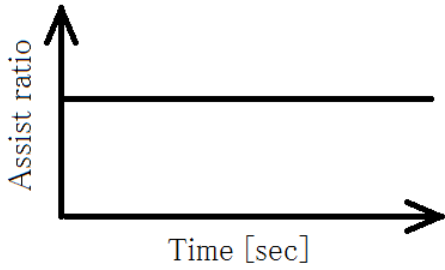
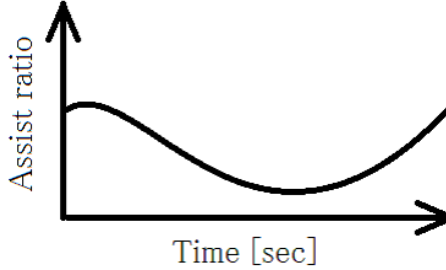
$$C(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)} \quad (2.3)$$

式 (2.3) はある時間における予測した値の信頼度を表している。

2.1.6 本手法を適用する前提条件

本手法では、台車押し作業を行う環境として、直進することが多く、平坦な屋内での運搬作業をする、という状況を想定している。例えば、本手法は工場内や建設現場において重量物を搬送する際に有効である。旋回動作においてもパワーアシストを行う台車も存在し、本手法を旋回動作においても適用できる可能性はあるが、処理が複雑になるため本研究ではそこまで考慮しない。従来使われていたパワーアシスト台車に本手法を適用することで、パワーアシスト台車のハードウェアはそのままに、より多くの作業者の負担を軽減することができる。

表 2.1: 従来手法と提案手法の比較

	従来手法	提案手法
アシスト比	一定 	可変 
欠点	大きなモーターが必要	感覚は不自然 適用が難しい
利点	自然な感覚 適用が比較的容易	より小さいモーターを使える 作業全体で目標の負担軽減を達成できる
使用環境	どこでも	水平, 屋内, 直進 (工場など)

2.2 アルゴリズム

ここでは、提案する負担軽減率補償制御のアルゴリズムについて説明する。図 2.4 に負担軽減率補償制御のフローチャートを示す。この手法では作業者の力を予測するために台車の速度を利用しており、最初に台車の速度を計測する。次に、最小誤差二乗法を使って計測した速度の曲線と最も近い躍度最小速度曲線を求める。台車押し作業の運動方程式は既知であるので、この速度と加速度を使って作業者の入力を計算し、不足する力積の大きさを求める。これによってトルク飽和の前後で余分にアシストする力積がわかるのでそれをもとにアシスト比を決定する。最後に、現在の負担軽減率を計算して評価する。この一連の流れを繰り返し、予測した終了時間と終了速度に達した時点でループを抜けるようになっている。

2.2.1 躍度最小モデルを用いた予測

本手法では、不足する力積を予測するために作業者の入力を予測する必要がある。しかし、作業者の入力状況や作業意図によって大きく異なり、100%正確に予測することは不可能に近い。そこで、予測する作業の範囲を定めるため、おおまかに状況を想定し、以下の2つの仮定を立てることにした。

1. 作業者は台車を滑らかに加速させる
2. 作業者は台車のダイナミクス変化を感じ取る

つまり、作業者はアシスト比の変化を感じ取りながらも、状況の変化に応じて目標の速度まで滑らかに台車を加速させる、という H-metaphor 的な考え方 [22] を導入することにし

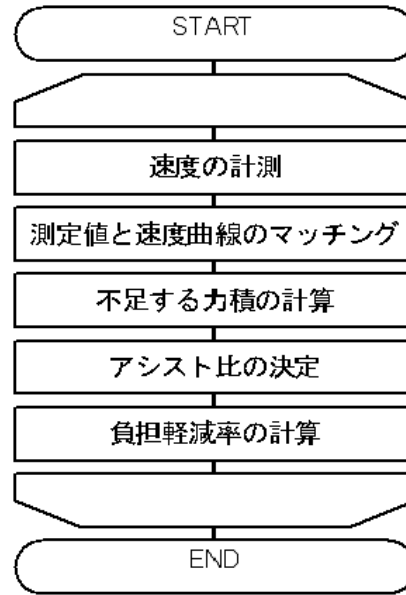


図 2.4: 負担軽減率補償制御のフローチャート

た. では, 滑らかに台車を加速させるとどのような動きになるのか. 滑らかさの指標のひとつとして, 加速度を一階微分した躍度がある. Hogan らによって躍度最小で人間の腕が動くという報告がされて以来 [25], 人間機械協調作業における制御技術に躍度最小軌道が適用できないかと様々な研究が行われてきた. 趙らは, 自動車の制御系に躍度を最小とする速度パターンを導入することによって, 乗り心地および安全性を向上する制御方法を報告している [26]. 前田らは, 人間の動作予測に躍度最小モデルを用いることで人間とロボットが協調して作業を行うための制御方法を報告している [27]. 前田らの研究では, 位置データの計測値に最も近い躍度最小軌道を探し出すことで人間の負担を軽減するシステムが構築され, 良好な結果を得ることが報告されている. また, 関らは, 躍度最小モデルをパワーアシスト車椅子の走行制御に適用することによって乗り心地や安全性を向上させた制御方法を報告している [28]. そこで, 我々は躍度最小による加速を使って作業者の動作予測をできないかと考えた. もちろん作業者が常に躍度最小で加速するというわけではないが, 作業者が台車を滑らかに加速させた結果として躍度最小に近い形で加速する場合を考える. 本研究では, 作業者は台車のダイナミクスを感じとりながら台車を滑らかに加速させると仮定して作業者の操作を予測する. 台車を滑らかに加速させた結果として躍度最小軌道で台車が加速すれば, 過去に計測された速度曲線と最も近い躍度最小軌道を探すことによって今後の入力が予測できる.

ここで, 台車の位置を x , 速度を v とし, 台車が開始時間 t_0 から終了時間 t_f にかけて, 開始速度 0 から終了速度 v_f まで躍度最小で滑らかに加速するときの速度曲線を求める. こ

のとき境界条件は以下ようになる．

$$\begin{cases} v(t_0) = 0 & v(t_f) = v_f \\ \dot{v}(t_0) = 0 & \dot{v}(t_f) = 0 \\ \ddot{v}(t_0) = 0 & \ddot{v}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

時間 t_0 から始まり時間 t_f に終了する軌道では，滑らかさは躍度コスト

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \ddot{v}(t)^2 dt \quad (2.5)$$

を計算することによって測定できる．この躍度コストが最小化すると躍度最小軌道が得られる．ここでは変分法を使って最小値を求める．最小化のための評価関数 H を次式のように置く．

$$H(v(t)) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \ddot{v}(t)^2 dt \quad (2.6)$$

ここで任意の関数 $\eta(t)$ ，微小な量 e を導入する． $H(v)$ を最小化するには， $v(t)$ を $v(t) \mapsto v(t) + e\eta(t)$ と置き換える．更に式 (2.6) の両辺を e で微分すると，

$$\frac{dH(v + e\eta)}{de} = \int_{t_0}^{t_f} (\ddot{v} + e\ddot{\eta})\ddot{\eta} dt \quad (2.7)$$

$e \rightarrow 0$ とすると

$$\left. \frac{dH(v + e\eta)}{de} \right|_{e=0} = \int_{t_0}^{t_f} \ddot{v}\ddot{\eta} dt = \int_{t_0}^{t_f} \eta v^{(4)} dt = 0 \quad (2.8)$$

よって

$$v^{(4)} = 0 \quad (2.9)$$

これは関数 $v(t)$ が4番目の微分でゼロになり， $\ddot{v}$ を最小化するということである．この微分方程式の解は：

$$\begin{cases} v(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ \dot{v}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \\ \ddot{v}(t) = 2a_2 + 6a_3 t \\ \dddot{v}(t) = 6a_3 \end{cases} \quad (2.10)$$

となる．ここで定数 a_0, a_1, a_2, a_3 を求める．境界条件を代入すると $a_0 = 0, a_1 = 0$ であり，以下の連立方程式ができる．

$$\begin{cases} v(t_f) = a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = v_f \\ \dot{v}(t_f) = 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 = v_0 \end{cases} \quad (2.11)$$

連立方程式を解くと， $a_2 = 3t_f^{-2}(v_f - v_0)$ ， $a_3 = -2t_f^{-3}(v_f - v_0)$ となる．よって，躍度最小軌道となる速度 v は式 (2.12) のような3次関数の形で書くことができる．

$$\begin{aligned} v(t) &= g(t; t_f, v_f) \\ &= \left\{ 3 \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 - 2 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 \right\} (v_f - v_0) + v_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

また、加速度 a は以下のような 2 次の関数となる.

$$a(t) = \left\{ 6 \left(\frac{t}{t_f} \right) - 6 \left(\frac{t^2}{t_f^2} \right) \right\} (v_f - v_0) \quad (2.13)$$

2.2.2 測定値に近い速度曲線の探索

式 (2.12) の未知パラメータは t_f と v_f であるので、これらを推定する. ここでは、下記の評価関数を最小にするように非線形最小二乗法の一つである Levenberg-Marquardt 法を用いて決定する.

$$\sum_{i=0}^n (\|v_i - g(i\Delta t; t_f, v_f)\|) \quad (2.14)$$

これによって推定されたパラメータ t_f^* と v_f^* を式 (2.12), 式 (2.13) に代入すると、速度と加速度の予測値 v^* と a^* が求まる.

2.2.3 不足する力積の計算

次に、予測値と台車押し作業のダイナミクスを用いて操作者の将来の入力を求めることを考える. 操作者の力を F_h , アシスト力を F_a , アシスト比を α , 台車の質量を M , 粘性摩擦係数を c , 走行抵抗を μ とすると台車押し作業の運動方程式は式 (2.15) で表される.

$$F_h(t) + F_a(t) = M\dot{v}(t) + cv(t) + \mu \quad (2.15)$$

ここで、アシスト力 F_a は以下のように定義される.

$$F_a(t) = \alpha(t)F_h(t) \quad (2.16)$$

式 (2.12), (2.13) で得られた速度と加速度の予測値を台車押し作業のダイナミクスに代入すると、操作者の入力 of 予測値 F_h^* は次式で表される.

$$F_h^*(t) = \frac{1}{1 + \alpha(t)} \{M\dot{v}^*(t) + cv^*(t) + \mu\} \quad (2.17)$$

不足する力積の大きさを計算するために、まず予測値の曲線 F_a^* とアシスト力の上限 F_{aMAX} との交点 t_1, t_2 を以下の式によって求める.

$$F_{aMAX} = F_a^*(t) \quad (2.18)$$

F_a^* は時間に関する 3 次の関数であるので 3 個の解が得られる. その中から小さい順に 0 より大きい値を t_1, t_2 として選択する. この t_1, t_2 を用いて次式のように不足する力積 S_{MIS} を計算する.

$$S_{MIS} = \int_{t_1}^{t_2} F_a^*(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} F_{aMAX}dt \quad (2.19)$$

負担軽減率を目標値にするため、不足する力積のうちすでに余計にアシストした力積を式 (2.20) で求める.

$$S_{PAST}(t) = \int_0^{t_p} \{F_h^*(t) - F_h(t)\} dt \quad (2.20)$$

ここで, t_p は現在の時間, F_h^* は予測した作業者の入力である. 式 (2.20) を用いると, 今後分配しなくてはならない力積 S_{NEED} は

$$S_{NEED}(t) = S_{MIS}(t) - S_{PAST}(t) \quad (2.21)$$

のように表される. また, 前後で操作者の代わりに力を出せる力積の大きさ S_{ALT1}, S_{ALT2} はそれぞれ

$$S_{ALT1}(t) = \int_{t_p}^{t_1} F_h^*(t) dt \quad (2.22)$$

$$S_{ALT2}(t) = \int_{t_2}^{t_f} F_h^*(t) dt \quad (2.23)$$

となる.

2.2.4 力積の分配

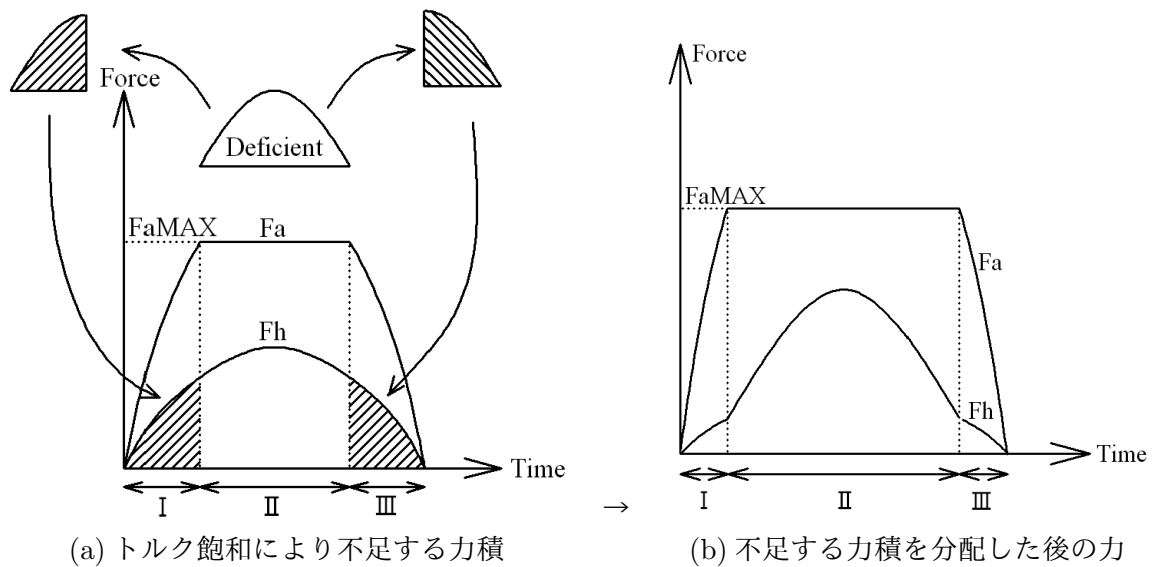


図 2.5: 不足する力積の分配イメージ

図 2.5 は, 不足する力積の分配イメージを示している. ここで, F_h , F_a , F_{aMAX} はそれぞれ作業者の入力, アシスト力の大きさ, アシスト力の上限である. 図 2.5(a) で示されているように, アシスト力の上限が既知であれば不足する力積の大きさを計算することができる, それを均等に 2 つに分割し, 全体として目的の負担軽減率を達成するように区間 I と区間 III におけるアシスト比を計算する. これによって作業者の力とアシスト力は図 2.5(b) のように変化し, 所望の負担軽減率が得られる.

2.2.5 信頼性を考慮した力積の分配

最小誤差二乗法を用いて予測した速度には、当然であるが誤差が含まれる．この誤差によって負担軽減率が所望の値よりも高まる場合は問題にならないが，負担軽減率が所望の値より低くなることはできるだけ避ける必要がある．いま，不足する力積がわかっているとして，それを補うことができる時間はトルク飽和の前の時間とトルク飽和の後の時間に限られている．これまで示した手法では不足する力積をトルク飽和の前と後に均等に分配するという方法をとってきた．しかし，それでは後半に予測よりも入力が大きくなった場合，目標の負担軽減を達成できない可能性が高まる．そこで予測の信頼度を考慮して力積を分配することを考える．

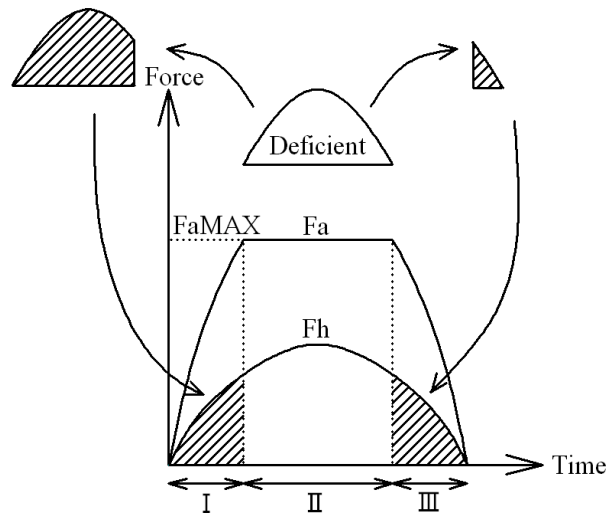


図 2.6: 信頼度を考慮した力積の分配

信頼性をもとに S_{NEED} を S_{ALT1} , S_{ALT2} に分配することを考える．ここではトルク飽和が起こる前の時刻 t_p から t_1 までの信頼度の平均値とトルク飽和が起こった後の時刻 t_2 から t_f まで信頼度の平均値の比をもとに力積を分配する．トルク飽和が起こる前の分配比率を χ_1 ，トルク飽和が起こった後の分配比率を χ_2 とすると，分配比率は式 (2.24) のように表される．

$$\chi_1 : \chi_2 = \frac{\int_{t_p}^{t_1} C(t)dt}{t_1 - t_p} : \frac{\int_{t_2}^{t_f} C(t)dt}{t_f - t_2} \quad (2.24)$$

この分配比率 χ_1 , χ_2 を使って式 (2.27) のようにアシスト比を決定する．式 (2.27) の分母と分子はそれぞれ，アシスト比を目標の値とするために必要な操作者の入力の力積，ア

シスト力の力積を表している.

$$\alpha(t) = \begin{cases} \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_a^*(t)dt + \chi_1 S_{NEED} - \int_{t_0}^{t_p} F_a(t)dt}{\int_{t_0}^{t_1} F_h^*(t)dt - \chi_1 S_{NEED} - \int_{t_0}^{t_p} F_h(t)dt} & t_p \geq t_1 \\ \frac{\int_{t_0}^{t_f} F_a^*(t)dt - \int_{t_0}^{t_f} F_a(t)dt}{\int_{t_0}^{t_f} F_h^*(t)dt - \int_{t_0}^{t_f} F_h(t)dt} & t_p \geq t_1 \end{cases} \quad (2.25)$$

ただし, アシスト比に制限を設けなければ必要な力を装置が全て出してしまうため, 以下のようにアシスト比の制限を設ける.

$$\alpha(t) \leq \alpha_{MAX} \quad (2.26)$$

2.2.6 アシスト比の制御則

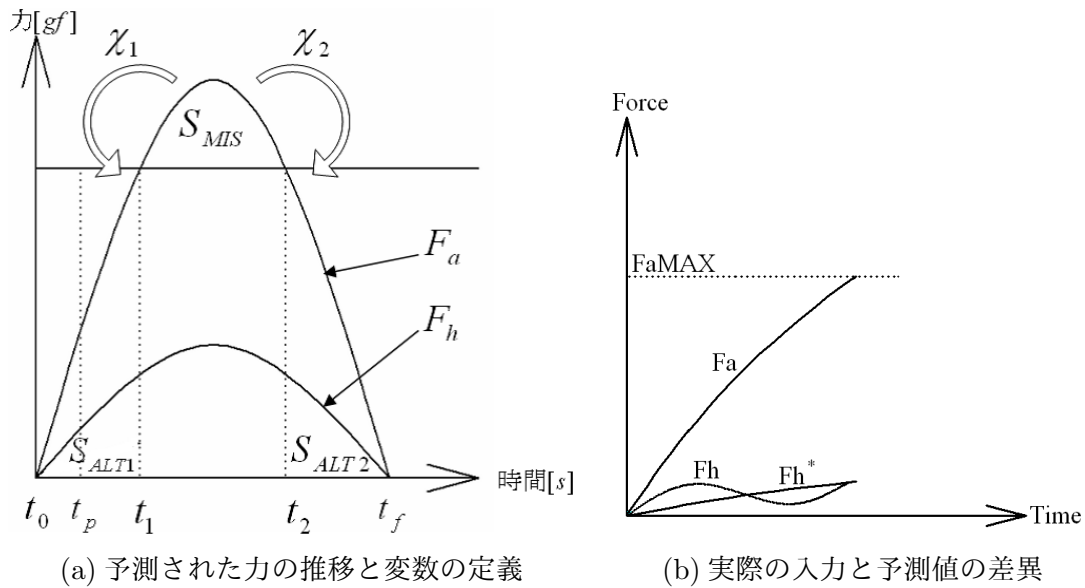


図 2.7: アシスト比の計算に必要な変数の定義

図 2.7 に, アシスト比を計算するために必要な変数を定義する. また, χ_1 , χ_2 は不足する力積の分配比率を表す. この分配比率 χ_1 , χ_2 を使って式 (2.27) のようにアシスト比を決定する. 式 (2.27) の分母と分子はそれぞれ, アシスト比を目標の値とするために必要

な操作者の入力之力積，アシスト力之力積を表している．

$$\alpha(t) = \begin{cases} \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_a^*(t)dt + \chi_1 S_{NEED} - \int_{t_0}^{t_p} F_a(t)dt}{\int_{t_0}^{t_1} F_h^*(t)dt - \chi_1 S_{NEED} - \int_{t_0}^{t_p} F_h(t)dt} & t_p \geq t_1 \\ \frac{\int_{t_0}^{t_f} F_a^*(t)dt - \int_{t_0}^{t_f} F_a(t)dt}{\int_{t_0}^{t_f} F_h^*(t)dt - \int_{t_0}^{t_f} F_h(t)dt} & t_p \geq t_1 \end{cases} \quad (2.27)$$

ただし，アシスト比に制限を設けなければ必要な力を装置が全て出してしまうため，以下のようにアシスト比の制限を設ける．

$$\alpha(t) \leq \alpha_{MAX} \quad (2.28)$$

2.3 シミュレーションによる効果の確認

従来手法と提案手法における負担軽減率の違いを示すために，作業者が台車を時間 $t_f = 4.0$ s にかけて速度 $v = 0.0$ m/s から $v_f = 1.0$ m/s まで加速させる状況においてシミュレーションを行った．ソフトウェアには，MATLAB R2007a を用い，ルンゲ・クッタ法を使用して台車押し作業の運動方程式を解いた．表 2.8 に，シミュレーション時に用いたパラメータを示す．アシスト比の上限はアラキ製作所の製品を参考にして決定した．アラキ製作所では押力に応じてアシスト比を変更できるパワーアシスト台車を販売している [21]．この製品では 500kg の搬送質量でアシスト比が最大で 9 になる．これを参考にすると第 1 章で紹介したような搬送質量が 1000kg を超えるものではアシスト比がおおよそ 20 となる．シミュレーションではそのような台車を使用しているという状況の下で行うことを考えているためアシスト比の上限を 20 とした．図 2.8 は従来手法と提案手法を適用した場合における負担軽減率の推移を示している．従来手法の結果では，不足する力積が考慮されていないため，負担軽減率は所望の値よりも低くなっている．

表 2.2: シミュレーション時に用いたパラメータ

台車の質量	200.0×10^3 [g]
粘性係数	0
目標負担軽減率	2.00
目標終了速度	1.00[m/s]
目標終了時間	4.00[s]
LM 法の繰り返し回数	30[回]
初期ダンピング係数	0.001
アシスト力の上限	441[N]
アシスト比の上限	20

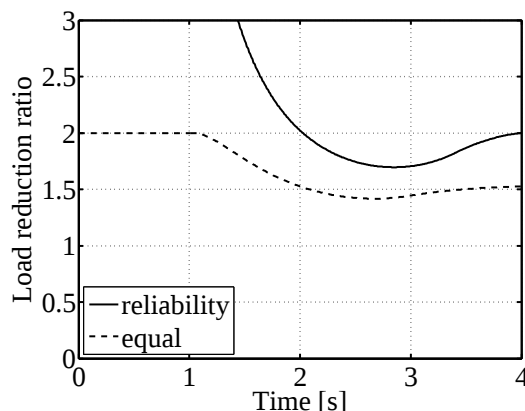


図 2.8: 従来手法と提案手法における負担軽減率の比較

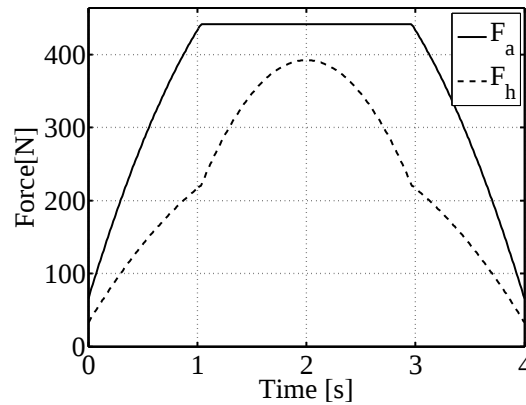
2.3.1 従来手法との比較

一方で、提案手法では、トルク飽和が起こった前後で不足する力積が分配されているため、負担軽減率は目標値に近づいている。図 2.9 は従来手法におけるシミュレーション結果を示しており、図 2.9(a) は作業者の入力とアシスト力を示している。この図においてはおよそ 1s の後でアシスト力がその上限である 441N に達して、負担軽減率が減少している。図 2.10 は 2 章で議論された仮定が成立するという条件の下での提案手法のシミュレーション結果を示している。図 2.10(a) からわかるように、提案手法では不足する力積を予測することによって、トルク飽和が起こる前にアシスト比が増加されている。図 2.10(b) より、従来手法の場合と同じようにアシスト力はその上限に達しているが、負担軽減率は不足する力積を考慮した効果によって所望の値に近づいている。ここで負担軽減率は所望の値より少し小さくなっているが、これはアシスト比に上限を設けたためである。この結果ではトルク飽和の後にアシスト比が常に上限の 20 になっている。図 2.10(c) はシミュレーション時における台車の速度を示している。実線は台車の位置、点線は台車の速度であり、速度曲線から滑らかに加速していることがわかる。図 2.10(d) は最終速度と最終時間の予測値の推移を表している。測定されたデータの総量が少ないため、予測の初期では予測値が振動している。その後は徐々に値が収束し、1s を超えたあたりから t_f は 4s に、 v_f は $1m/s$ に向けて収束している。このシミュレーションにおいて、従来の手法では所望の負担軽減率を得るために 490N のアシスト力が必要であった。一方で、提案手法では 441N のアシスト力で所望の負担軽減率が得られている。これらの結果により、シミュレーションに使用した状況では、およそ 90% の力で所望の負担軽減率が得られることが示された。

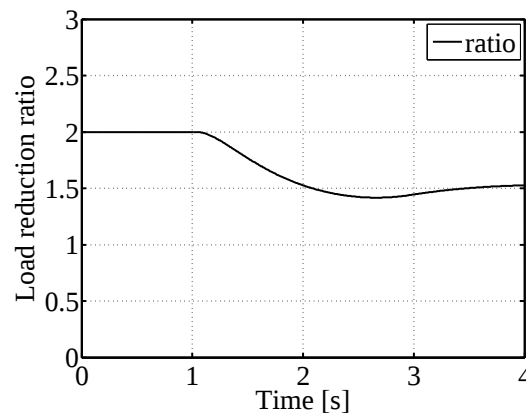
2.3.2 予測誤差を加えた加速

次に、予測が外れた場合において負担軽減率がどのように推移するのかを確認するために、作業者が予測どおりに動かなかった状況についてもシミュレーションを行った。

ここでは作業者の入力に図 2.15(a) で示されるような、式 (2.2) で表される誤差を導入した。これは、最小誤差二乗法を用いてマッチングした場合に加わる誤差の形に近いため



(a) 作業者の入力とアシスト力



(b) 負担軽減率

図 2.9: アシスト比固定のシミュレーション結果 (従来手法)

上の図は作業者によって加えられた入力 F_h とアシスト力 F_a 。下の図は対応する負担軽減率を示している。

ある。また、予測が外れるようにするために、予測結果が常に $t_f = 4.0 \text{ s}$, $v_f = 1.0 \text{ m/s}$ となるようにし、予測誤差が時間経過に伴って大きくなるようにした。

図 2.11(a) はシミュレーションにおける台車の速度を示している。ここでは最終速度が 1 m/s となる基準動作 (実線で表示) が、50%から 150%となるように作業者の力に誤差を加えた。図 2.11(b) はこれらの5つの異なる状況における負担軽減率の推移を表している。このケースでは、予測値は最終速度が 1 m/s 、最終時間が 4 s となるように固定されている。図 2.11(b) で示されているように、全ての状況においてトルク飽和が起こる前に負担軽減率が増加しており、それが最終負担軽減率の値の改善に寄与していることがわかる。しかし、誤差によって作業者の力が予測値よりも大きくなった状況において、最終負担軽減率は目標値に達していない。これは、トルク飽和が起こった後で、負担軽減率の改善に使える力積が不足しているためである。また、誤差によって作業者の力が予測値よりも小さくなった状況において、最終負担軽減率は目標値よりも大きくなっている。これは、より多くの負担が軽減されていると考えることができるのであまり大きな問題にはならない。予

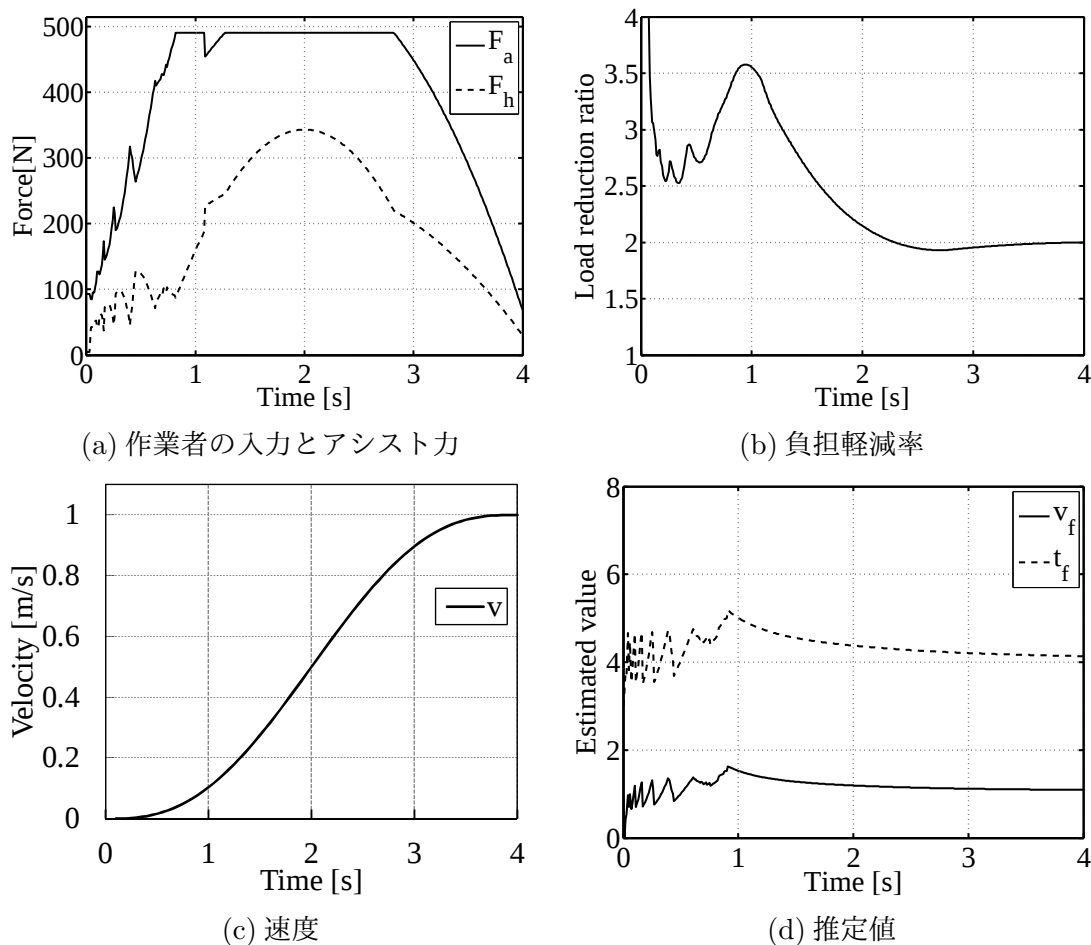


図 2.10: アシスト比可変のシミュレーション結果（提案手法）

(a) は作業者の入力 F_h アシスト力 F_a . (b) は対応する負担軽減率を示している. (c) は対応する台車の速度, そして (d) は対応する予測値を示す.

測した通りに作業者の入力が推移した場合には, 目標値通りの負担軽減率が得られている. これらの結果から, 目標値に達しない場合も存在するが, 提案手法は台車押し作業において負担軽減率を改善するのに有効であることが示された.

図 2.11 の結果を, アシスト比 $\alpha = 2$ で固定した場合, 予測値を更新せずに提案手法を適用した場合, 予測値を更新して提案手法を適用した場合, アシスト比の上限 $\alpha = 20$ で固定した場合の場合についても行い, そのときの最小値と最大値の幅を示したものを図 2.12 に示す.

図 2.12 の棒グラフは, 図 2.11(a) において実線で示されていた, 基準動作通りに作業者が動いた場合における負担軽減率を表している. また, 5つの結果における負担軽減率の最大値と最小値の幅を実線で示している. 図 2.12(a), 図 2.12(d) は, それぞれアシスト比を下限の値 $\alpha = 2$ で固定した場合の結果, アシスト比を上限の値 $\alpha = 20$ で固定した場合の結果を示している. つまり, このシミュレーション結果において負担軽減率は必ず図 2.12(a) の結果を上回り, 必ず図 2.12(d) の結果を下回ることになる. 図 2.12(b) は, 予測

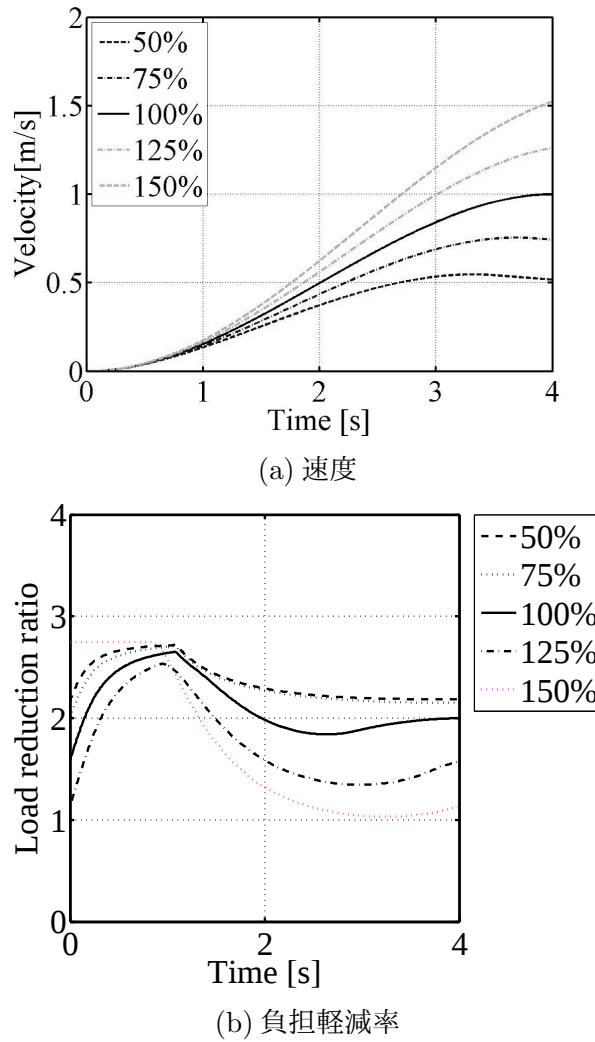


図 2.11: 入力に誤差を加えたシミュレーション結果
(a) は作業者の入力 F_h アシスト力 F_a . (b) は対応する負担軽減率を示している.

値を固定して行った場合のシミュレーション結果を示している．従来手法の結果である図 2.12(a) に比べて，提案手法を適用することによって負担軽減率の最小値が改善されている．また，予測が当たって基準動作通りの入力になった場合，負担軽減率は目標値と一致した．最大値は予測よりも入力小さかった場合の結果であり，負担軽減率は目標値よりも高くなった．予測値を更新しながら提案手法を適用した場合，負担軽減率の最小値は図 2.12(b) に比べてわずかながら改善された．予測が当たって基準動作通りの入力になった場合には，予測値を固定した結果と同様に負担軽減率は目標値と一致した．一方で，最大値は図 2.12(b) と比べて小さくなっている．これは，基準動作よりも小さい入力を使って予測が更新されることで，予測の結果が小さめに見積もられるためである．これは，設定した範囲内のエネルギーに近い値で目標の負担軽減率に近づけることができるという点から更新した結果のほうが望ましいといえることができる．

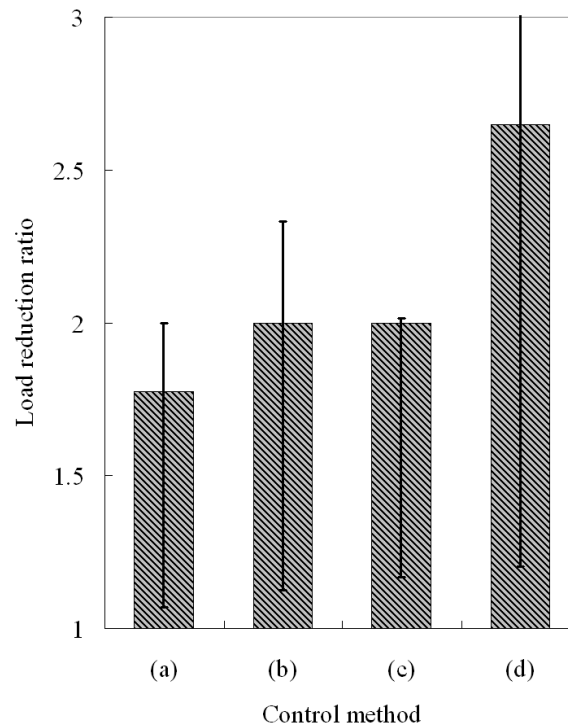
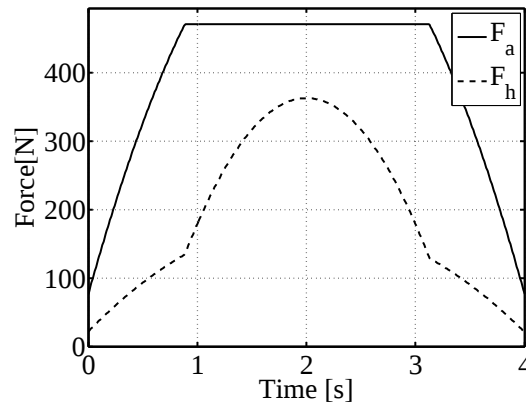


図 2.12: 誤差を含む5つの入力に対する負担軽減率の最大値と最小値
(a): $\alpha = 2$, (b):予測値を固定して提案手法を適用した結果, (c):予測値を更新して提案手法を適用した結果, (d): $\alpha = 20$

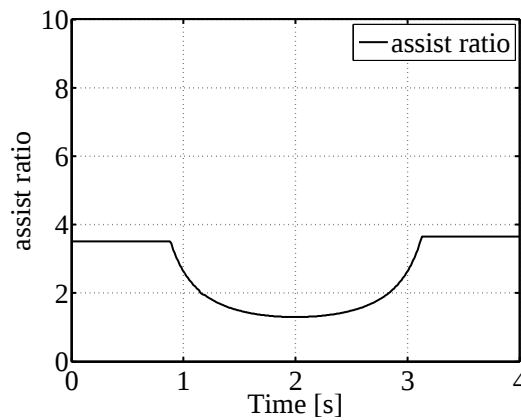
2.3.3 信頼度を考慮したことによるアシスト比の変化

まず、信頼性を考慮した影響を確認するために、我々は作業者が常に予測通りに動いたという仮定のもとでシミュレーションを行った。図 2.13 は信頼性を考慮していない場合の結果を示しており、図 2.14 は信頼性が考慮されている場合の結果を示している。

図 2.14(b) が示しているように、信頼性を考慮したことにより、トルク飽和が起こる前のアシスト比が図 2.13(b) の場合と比べて大きくなっている。これによって図 2.13(a) と比べて図 2.14(a) ではトルク飽和の前に作業者の出す力が小さくなっている。しかし、後半では最終時間に所望の負担軽減率が得られるような制御則を用いているため、信頼度を考慮した結果では作業者の力が大きくなり、最終的な負担軽減率は等しくなる。また、アシスト力が大きくなることによってトルク飽和が起こる時間が長くなっている。作業者が予測どおりに動いたという仮定のもとでは、どちらの結果でも所望の負担軽減率が得られている。



(a) 作業者の入力とアシスト力



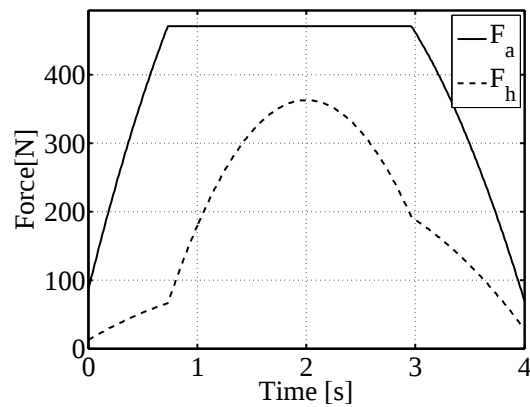
(b) アシスト比

図 2.13: 信頼度を考慮していないシミュレーション結果（予測値が正しいと仮定）
(a) は作業者の入力 F_h と アシスト力 F_a , そして (b) は対応するアシスト比を示している。

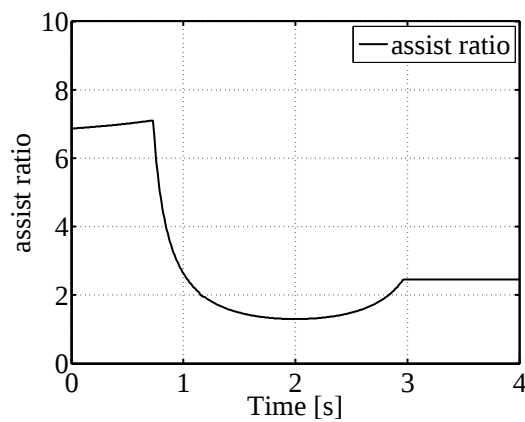
2.3.4 信頼度を考慮した制御の効果

次に、予測が外れた場合における信頼性を考慮した影響を確認するために、作業者が予測どおりに動かなかった状況についてもシミュレーションを行った。まず、作業者の入力が入力が予測した値よりも大きかった場合についてシミュレーションを行った。ここでは作業者の入力に図 2.15(a) で示されるような、式 (2.2) で表される誤差を導入した。

これは、最小誤差二乗法を用いてマッチングした場合に加わる誤差の形に近いためである。ここで、定数の値は $A_1 = 11150$, $A_2 = -5510$, $A_3 = 680$ とした。また、予測が外れるようにするために、予測結果が常に $t_f = 4.0$ s, $v_f = 1.0$ m/s, となるようにし、予測誤差が時間経過に伴って大きくなるようにした。このシミュレーションにおける台車の速度を図 2.15(b) に示す。



(a) 作業者の入力とアシスト比

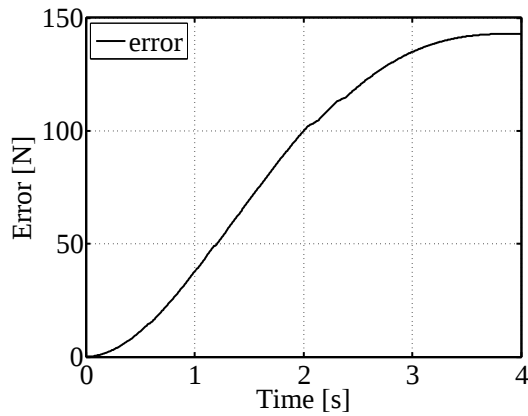


(b) アシスト比

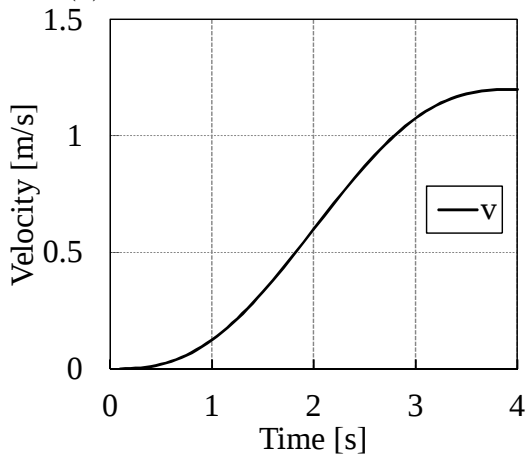
図 2.14: 信頼度を考慮したシミュレーション結果（予測値が正しいと仮定）
(a) は作業者の入力 F_h と アシスト力 F_a , そして (b) は対応するアシスト比を示している.

図 2.16 は信頼性を考慮した場合とそうでない場合におけるアシスト比と負担軽減率の推移を表し、信頼性を考慮した場合の影響を比較するためのものである。

図 2.16(a) からわかるように、信頼性を考慮せずに不足する力積をトルク飽和の前後に均等に分配した場合の最終的な負担軽減率は 1.67 となっている。一方で、不足する力積を信頼性に基づいて前後に分配した場合においては、最終的な負担軽減率が 1.74 となっている。このとき負担軽減率は目標の値に達してはいないが、トルク飽和後のアシスト比が常に上限の値である 20 に達していることからこれ以上負担軽減率の値を改善できないことがわかる。これらの結果により、予測値の信頼性を考慮して力積を分配することで、より良い負担軽減率が得られることが示された。



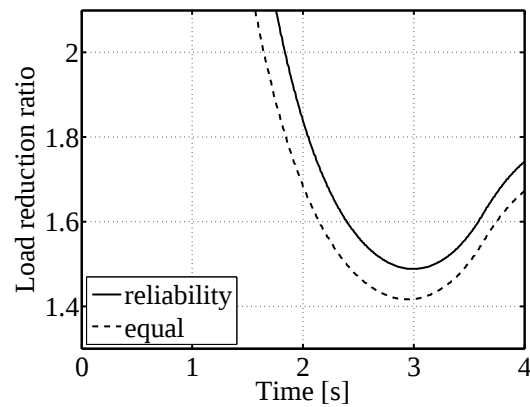
(a) 作業者の入力に加えられた誤差



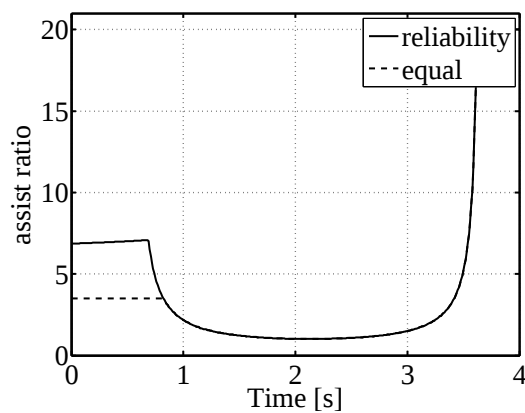
(b) 速度

図 2.15: 加えられた速度と台車の速度（作業者の入力が入力よりも大きかった場合）。

次に、作業者の入力が入力よりも小さかった場合についてシミュレーションを行った。ここでは作業者の入力に図 2.15(a) で示されるような、式 (2.2) で表される誤差を導入した。これは、最小誤差二乗法を用いてマッチングした場合に加わる誤差の形に近いのである。ここで、定数の値は $A_1 = 11150$, $A_2 = -5510$, $A_3 = 680$ とした。また、予測が外れるようにするために、予測結果が常に $t_f = 4.0 \text{ s}$, $v_f = 1.0 \text{ m/s}$, となるようにし、予測誤差が時間経過に伴って大きくなるようにした。このシミュレーションにおける台車の速度を図 2.17 に示す。



(a) 負担軽減率

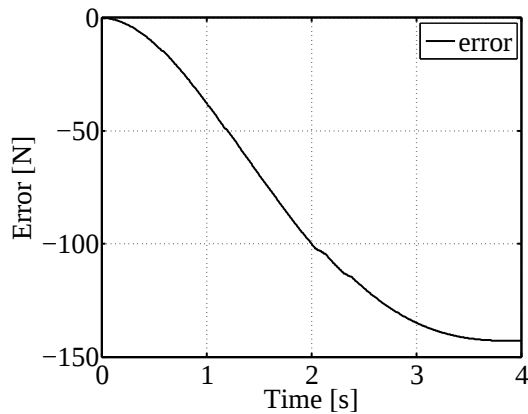


(b) アシスト比

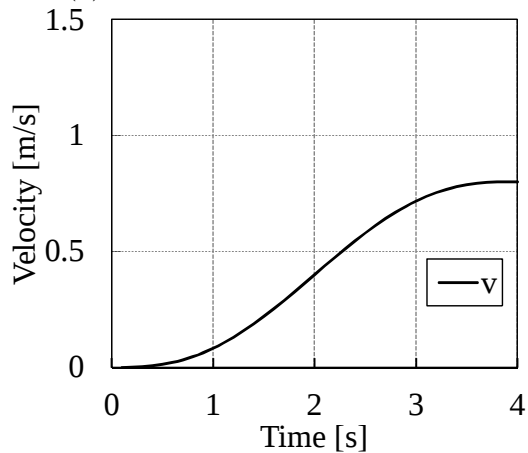
図 2.16: 信頼度を考慮した効果（作業者の入力が予測よりも大きかった場合）.

図 2.18 は信頼性を考慮した場合とそうでない場合におけるアシスト比と負担軽減率の推移を表し、信頼性を考慮した場合の影響を比較するためのものである。

図 2.18(a) からわかるように、従来手法と提案手法どちらを適用した場合についても負担軽減率は目標値である 2 を超えた。これらの結果から、作業者の入力が増大した場合においても小さかった場合においても関係なく、予測値の信頼性を考慮してアシスト比を決定することによってより良い負担軽減率が得られることが示された。



(a) 作業者の入力に加えられた誤差

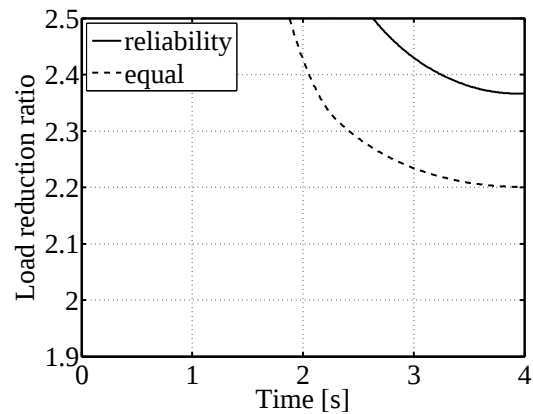


(b) 速度

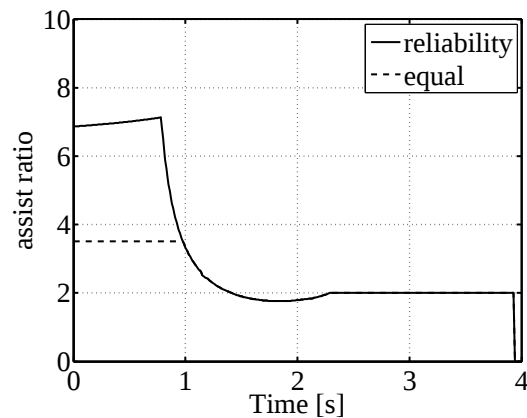
図 2.17: 加えられた誤差と台車の速度（作業者の入力予測よりも小さかった場合）。

次に、予測が外れた場合において負担軽減率がどのように推移するのかを確認するために、作業者が予測どおりに動かなかった状況についてもシミュレーションを行った。ここでは作業者の入力に図 2.15(a) で示されるような、式 (2.2) で表される誤差を導入した。これは、最小誤差二乗法を用いてマッチングした場合に加わる誤差の形に近いのである。また、予測が外れるようにするために、予測結果が常に $t_f = 4.0 \text{ s}$, $v_f = 1.0 \text{ m/s}$, となるようにし、予測誤差が時間経過に伴って大きくなるようにした。図 2.19(a) はシミュレーションにおける台車の速度を示している。ここでは最終速度が 1 m/s となる基準動作（実線で表示）が、50%から 150%となるように作業者の力に誤差を加えた。図 2.19(b) はこれらの5つの異なる状況における負担軽減率の推移を表している。このケースでは、予測値は最終速度が 1 m/s , 最終時間が 4 s となるように固定されている。

図 2.19(b) で示されているように、全ての状況においてトルク飽和が起こる前に負担軽減率が増加しており、それが最終負担軽減率の値の改善に寄与していることがわかる。しかし、誤差によって作業者の力が予測値よりも大きくなった状況において、最終負担軽減率は目標値に達していない。これは、トルク飽和が起こった後で、負担軽減率の改善に使



(a) 負担軽減率



(b) アシスト比

図 2.18: 信頼度を考慮した効果（作業者の入力が予測よりも小さかった場合）.

える力積が不足しているためである．また，誤差によって作業者の力が予測値よりも小さくなった状況において，最終負担軽減率は目標値よりも大きくなっている．これは，より多くの負担が軽減されていると考えることができるのであまり大きな問題にはならない．予測した通りに作業者の入力が増加した場合には，目標値通りの負担軽減率が得られている．これらの結果から，目標値に達しない場合も存在するが，提案手法は台車押し作業において負担軽減率を改善するのに有効であることが示された．

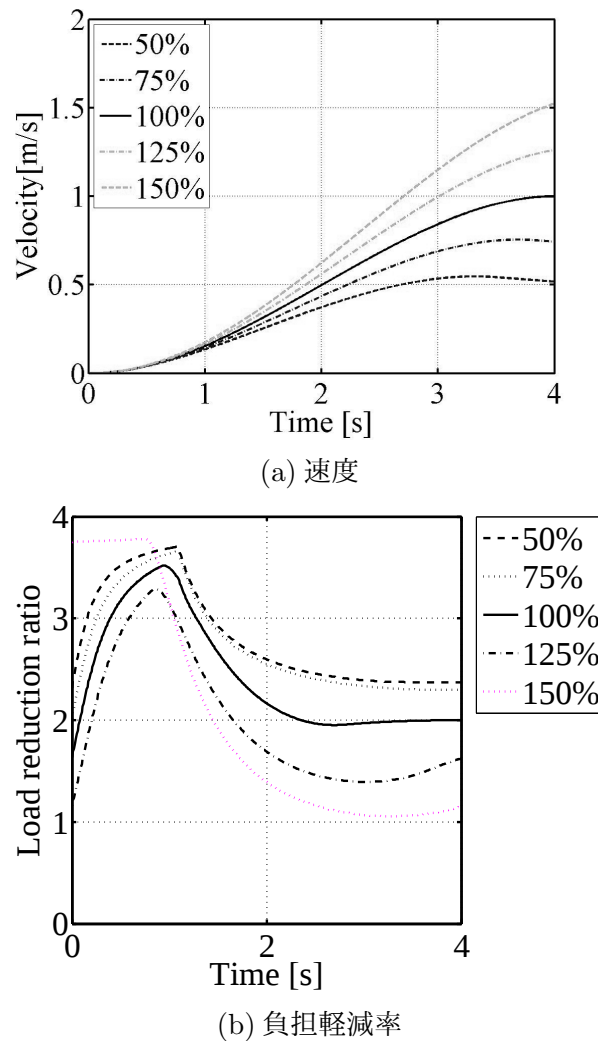


図 2.19: 信頼度を考慮し、誤差を加えたシミュレーション結果
(a) は作業者の入力 F_h と アシスト力 F_a を示している. (b) は負担軽減率を示している.

2.4 実験環境

2.4.1 システム構成

本研究では台車押し作業をモーターによってアシストするというものであり、作業者が台車を押す際にハンドルに加えられている力と台車の速度を用いて制御系を構成する。装置はパチンコのドル箱を運搬するために開発された小型のパワーアシスト台車を改造することによって台車押し作業の実験を行えるようにした。図 2.20 に実験システムの概要を示す。

パワーアシスト台車のハンドルには4つの歪ゲージが取り付けられており、歪検出基板を介してハンドルの歪が電圧として出力される。この電圧はPSoCマイコンに内蔵された

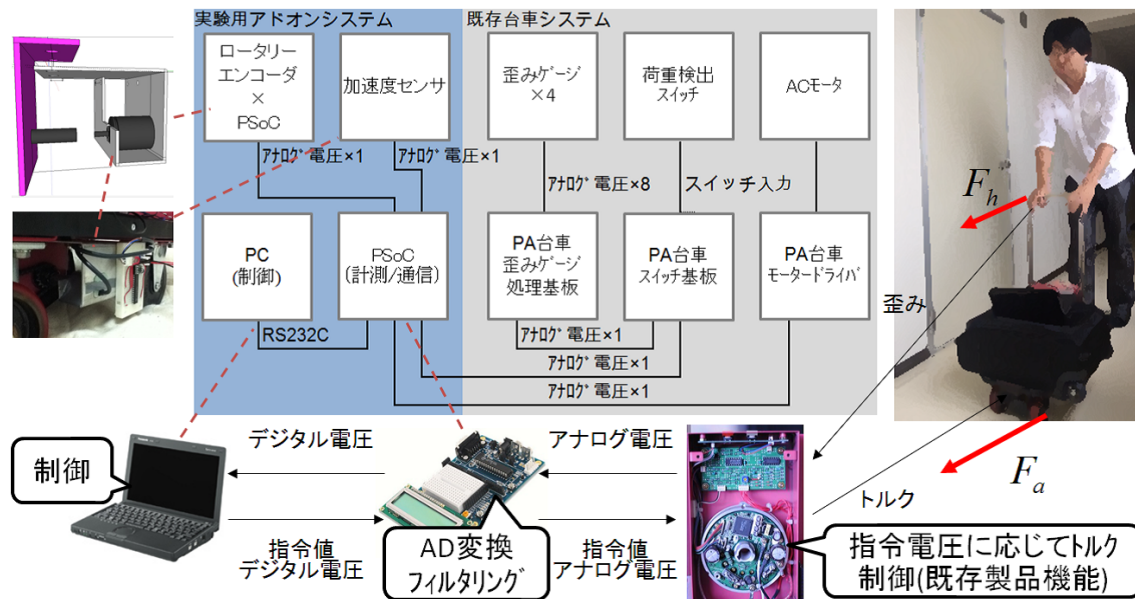


図 2.20: 実験システムの概要

AD 変換器でデータに変換され、UART を用いた通信によって PC に取り込まれる。制御則に従って計算されたトルクを出すために必要な電圧が PSoC マイコンに内蔵された DA 変換器を通して台車に内蔵された制御基盤に入力され、トルク制御が行われる。使用したデバイスを以下に示す。

- CY3210-PSoCEval1 Kit
- 3 軸加速度センサモジュール KXM 52-1050

本研究では、山一精工製のパワーアシスト台車を用いて実験を行った。図 2.21 にその外観を示す。

この台車は市販されていないが、研究用として一台提供していただいた。この台車には SPG 社製の 25W の AC モーターが搭載されており、インバータ内に集積された制御装置によってトルク制御が行われる。実験装置ではこのトルク制御の機能を利用して、後から接続した PSoC マイコンから指令を出せるようにしている。前方の駆動輪にはディファレンシャルギアがあり、後輪はキャスターで容易に台車を旋回させることができるようになっているが、今回の実験では直進のみを考慮しているためキャスターを取り外して進行方向に固定された車輪を取り付けた。



図 2.21: パワーアシスト台車の外観

表 2.3: パワーアシスト台車の仕様

寸法	800 × 450 × 270[mm]
台車重量	14.5[kg]
制御方式	人力比例アシスト方式
駆動方式	後 2 輪デフ駆動式
ブレーキ機能	回生ブレーキ方式
最大牽引重量	300[kg]
モータ	AC モーター (25W)spg 社製, 単相
電池	24V NiMH3.2Ah[N]

2.4.2 実験条件

前節で示した実験装置を使って実験を行った。図 2.22 に実験を行った時の台車の写真を示す。台車に十分な重さの錘を載せるため、市販されているクリアボックスに錘を入れ、そのボックスの上にデータ記録用のノートパソコンと接続した制御器である PsoC マイコンを載せた。また、一定の値でトルク飽和が起こるように、マイコン上のプログラムにおいてトルク命令の値に制限を設け、ドライバへの入力を制限した。

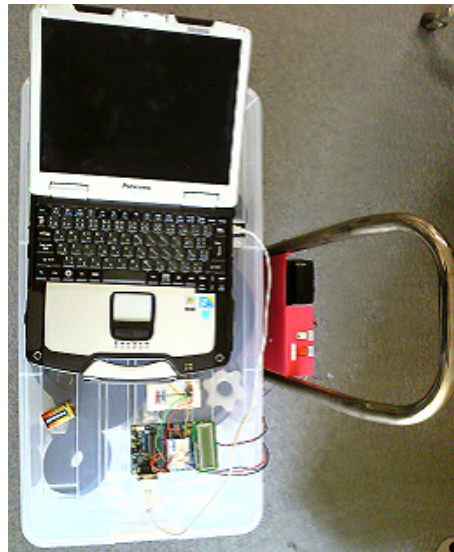


図 2.22: 実験に用いた錘と制御器

2.5 実験結果

2.5.1 加速時における各パラメータの推移

図 2.23 は，実験結果における作業者の入力とアシスト力を示している．ここでは従来手法と提案手法における負担軽減率の違いを示すために，作業者が台車を時間 $t_f = 0.0 \text{ s}$ から $t_f = 2.0 \text{ s}$ にかけて速度 $v = 0.0 \text{ m/s}$ からおよそ $v_f = 0.15 \text{ m/s}$ まで滑らかに加速させるように意識して台車を押した．図中に示されている従来手法におけるアシスト力については，実験では同じような入力を再現することが難しいため，ここでは提案手法を適用した場合の入力において従来手法を適用していた場合にどのようなアシスト力が出力されていたかを示した．薄い点線は従来手法におけるアシスト力を，実線は提案手法におけるアシスト力を，濃い点線は作業者の入力をそれぞれ示している．図 2.24 は，実験結果における負担軽減率の推移を表している．

図 2.24 からわかるように，従来の手法ではトルク飽和が起こるまで固定されたアシスト比の値である 2 に近づき，トルク飽和が発生した時点で急激に負担軽減率が下がっている．一方で提案手法を適用した場合には加速の初期において負担軽減率が高められている．これは予測によって不足すると判断された力積の大きさからアシスト比を高める必要があると判断されたためであり，ここで負担軽減率を高めたことが全体の負担軽減率の改善に寄与している．ここで，0 秒に近い期間で負担軽減率が 2 よりも小さいのは，AD 変換器と DA 変換器において発生する量子化誤差と，計算によって発生する丸め誤差の影響によるものである．また，図 2.23 からおよそ 1 秒が過ぎたあたりでトルク飽和が終わっていることがわかる．従来の手法ではアシスト比が 2 に固定されているのに対して，提案手法ではアシスト比が高められることによってトルク飽和が終了した後の負担軽減率が改善されている．

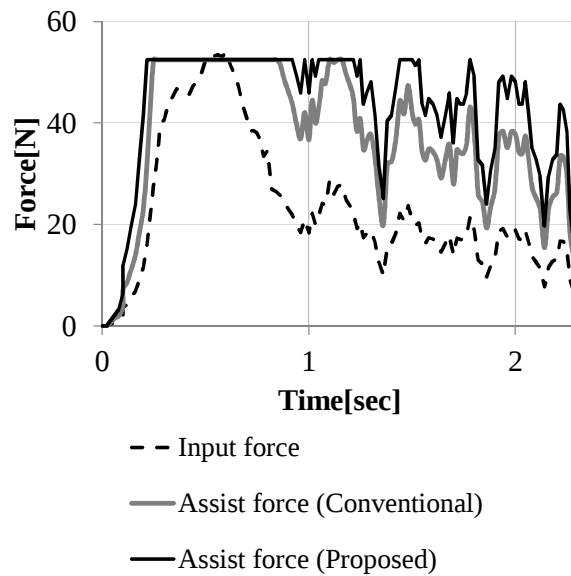


図 2.23: 作業者の入力とアシスト比の推移

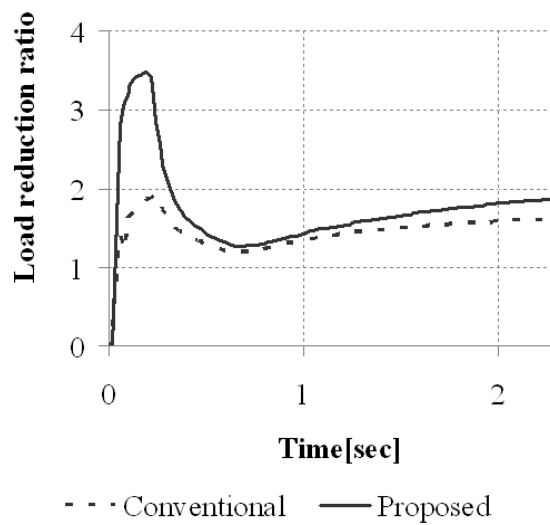


図 2.24: 負担軽減率の推移

2.5.2 従来手法と提案手法の比較

我々はまた、シミュレーションで得られたような結果が得られるか確認するために実験を行った。2秒で加速が終了するようにパワーアシスト台車を5回加速させ、その時の負担軽減率を記録した。この実験においてはアシスト比の上限は安全のためにシミュレーションで用いられていた20から4に下げられている。図2.26は各手法における実験結果の比

較を表している。棒グラフは負担軽減率の平均を示しており、実線で最大値と最小値が示されている。図 2.26 で示されているように、提案手法を適用することによって負担軽減率の最大値が所望の値である 2 に近づいている。さらに、提案手法を適用することによって最小値と平均値が改善されていることがわかる。この結果は提案手法を適用することによって台車押し作業の負担軽減率を改善できることを示している。

図 2.25 は各手法における実験結果の比較を表している。棒グラフは負担軽減率の平均を示しており、5 回実験を行ったうちの最大値と最小値が実線で示されている。図 2.25 で示されているように、提案手法を適用することによって負担軽減率の最大値が所望の値である 2 に近づいている。さらに、提案手法を適用することによって最小値と平均値が改善されていることがわかる。この結果は提案手法を適用することによって台車押し作業の負担軽減率を改善できることを示している。

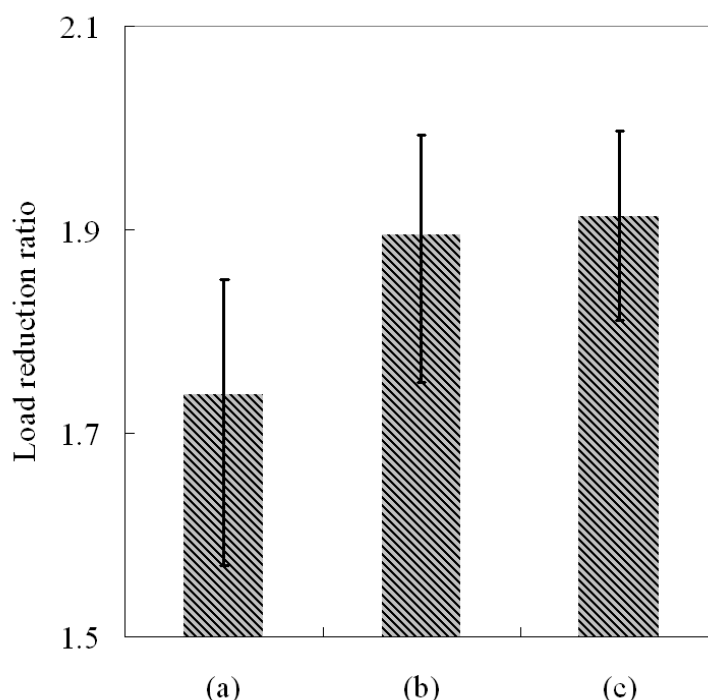


図 2.25: 信頼度を考慮したシミュレーション結果における負担軽減率の最大値と最小値
(a):従来手法, (b):提案手法, (c):提案手法 (信頼度を考慮)

2.5.3 信頼度を考慮した場合の影響

2.6 考察

予測通りに作業者の入力が推移した場合、所望の負担軽減率を得ることができる。しかし、結果からわかるように、提案手法を適用しても常に目標の負担軽減率を補償できるとは限らない。これは予測が外れて不足する力積の大きさが少なめに見積もられていた場合

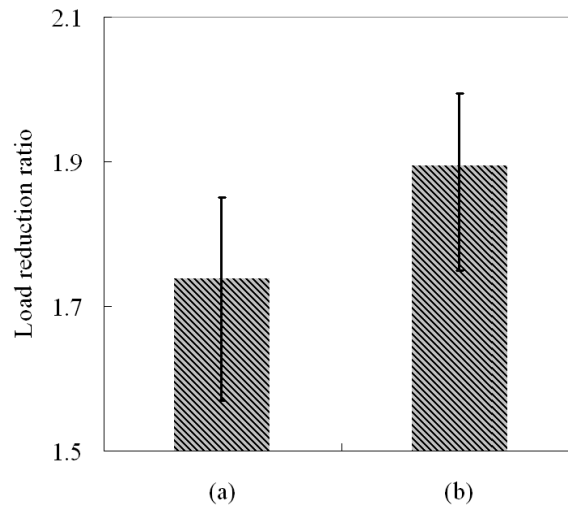


図 2.26: 実験結果における負担軽減率の最大値と最小値
(a):従来手法, (b):提案手法

に、後からそれを補おうとしても間に合わないことがあるためである。このような状況では、後半でアシスト比が常に上限の値を取る。また、後半で急激に入力が大きくなった場合にも目標の負担軽減率に達しない場合がある。つまり、トルク飽和発生後から終了時間までにかけてアシスト比が上限になるような力が入力された場合、所望の負担軽減率を得ることは難しくなる。逆に、予測が外れても不足する力積の大きさが多めに見積もられていた場合はさほど問題にはならない。その場合には加速の前半でアシスト比が高められるが、トルク飽和によって不足する力積が小さいか、もしくはトルク飽和が発生しないためトルク飽和後のアシスト比が比較的小さくなるか、所望の負担軽減率より高い負担軽減率を得られる。

次に、この手法における操作感と安全性について述べる。トルク飽和が起こる瞬間とトルク飽和が終了する瞬間には、急激なアシスト比の変化が起こる。今回の実験ではアシスト比を2から4の間で設定していたためあまりアシスト比の変化に対して違和感を感じなかったが、例えばシミュレーションのようにアシスト比の上限を20まで高めた場合、アシスト比の急激な変化に対して違和感を感じる事が予想される。しかし、違和感を感じることがあってもあくまでアシスト力は作業者の力を増幅したものである。つまり、違和感を感じて力を抜けばアシスト力は無くなるし、減速するにはハンドルを引くだけで良い。よってアシスト比の急激な変化は改善されるべきであるが、提案手法を適用するにあたって安全性は保障されているといえる。以上のような課題もあるが、シミュレーション結果においても実験結果においても提案手法を適用することで負担軽減率を改善でき、我々が提案した手法が有効であることが示された。

第3章 歩行モデルによる 予測を用いた制御

本章では、2章で示した制御方法を、作業者の歩行の影響を考慮してよりロバストに所望の負担軽減率に近づける方法について示す。また、実験によって歩行の影響を考慮した制御方法の有効性を示す。

3.1 信頼度を考慮した LRRC の課題

2章では、本研究の目的を達成するための LRRC という制御方法について述べた。しかし、LRRC では作業者がスムーズに目標速度まで加速すると仮定していたため、歩行による入力が速度に影響を与える際に予測誤差が大きくなり、目標負担軽減率が達成されないことがあった。本章では、歩行による入力が速度に大きく影響を与えても、初期入力から加速パターンを予測して適切な予測モデルに切替えることを考慮することによって、負担軽減率が改善されることを示す。

パワーアシスト制御方法の関連研究としては、A. Kaisumi [35] らが斜面の角度等の環境の変化に応じて適切なアシスト力を出力する制御方法について報告している。また、レーザーレンジセンサを使った意図推定によって適切なアシスト力を出力する方法なども報告されている [36, 37, 38]。我々が提案した LRRC は後者のアプローチに近く、我々の手法で負担軽減率を改善するためには意図推定をより適切に行う必要がある。

作業者の意図を認識する方法には2つの方法がある。1つはカメラやモーションキャプチャのような外界センサを使う方法 [10, 11] で、2つめは加速度センサやジャイロセンサのような内界センサを使う方法 [12, 13] で、ステレオカメラを使って作業者の意図推定を行うパワーアシストシステム等も報告されている [14]。しかし、これらの方法を一般的なパワーアシスト台車に適用するにはセンサーを追加で取り付ける必要があり、そうするとパワーアシスト台車が高価になってしまい我々の目的を達成することができなくなる。よって、我々は一般的なパワーアシスト台車に取り付けられている歪みゲージと速度センサと荷重計を使って作業者の意図予測をして適切なアシスト力を出力する制御方法を提案する。本章では、キャリブレーション、歩数予測、トルク飽和予測、そして所望の負担軽減率を達成するための方法について述べ、我々の提案手法の効果について実験を通して説明する。

3.2 歩行モデルによる予測を用いた LRRC の適用条件

ここでは、LRRC を適用するために必要ないくつかの条件について述べる。

3.2.1 物理条件

LRRC を適用するために必要となる物理条件を以下に示す。

- ・床や地面が十分に平らであること
- ・転がり抵抗が一定であること
- ・荷物の重さが既知か、測定できること

我々は屋内の工場や建設現場で使われるパワーアシスト台車に LRRC を適用することを考えており、1つ目の条件と2つ目の条件に関しては大きな問題ではないと考えているが、3つ目の条件については荷重計を持たないパワーアシスト台車へ適用する際に課題になる可能性がある。しかし、工場で使われている台車の多くには荷重計が取り付けられており、たとえパワーアシスト台車に荷重計が取り付けられていなかったとしても、同じ重さの製品の搬送を行う場合には LRRC を適用することができる。

3.2.2 操作者の意図

作業者の入力と速度を予測するにあたり、本手法では以下の条件を想定する：

- ・作業者は目標速度まで台車を加速させる。
- ・作業者は台車のダイナミクスの変化を感じ取りながら滑らかに台車を加速させる。
- ・加速完了までの歩数は3歩以内である。

我々は、アシスト比が変化しても作業者が台車のダイナミクスの変化を感じ取りながら台車を滑らかに目標速度まで加速させると仮定している。作業者がダイナミクスの変化を感じ取ってから制御パラメータを変化させるまでの期間については、0.4秒以内に剛性率と制動係数が変化することを Laman らが報告している [40]。作業者の歩行速度については様々な研究が報告されており、例えば、Dias[41] らは通常条件下で自由意志での歩行速度は 1.44m/s ($SD = 0.18$) であると報告している。我々は実験的に得られた 1.1m/s をパワーアシスト台車押し作業の目標値として設定する。図 3.1 はパワーアシスト台車を意図せずに 20 回押した際の定常速度の分布を示す。図 3.1 で示されている通り、定常速度は 80% の確率で 1.0m/s から 1.2m/s までに分布している。これらの結果は Dias らの報告よりも遅いが、これらの違いは台車押し作業における走行抵抗、通常歩行との姿勢の違い、被験者の体格の違いが影響しているのではないかと推測している。歩数に関しては、関連する研究が見つからなかったため、実際にパワーアシスト台車を使って実験を行った。図 3.2 は加速までの歩数の分布を示している。図 3.2 で示されている通り、加速までの歩数は 95% 以内の確率で 3 歩以下になっている。

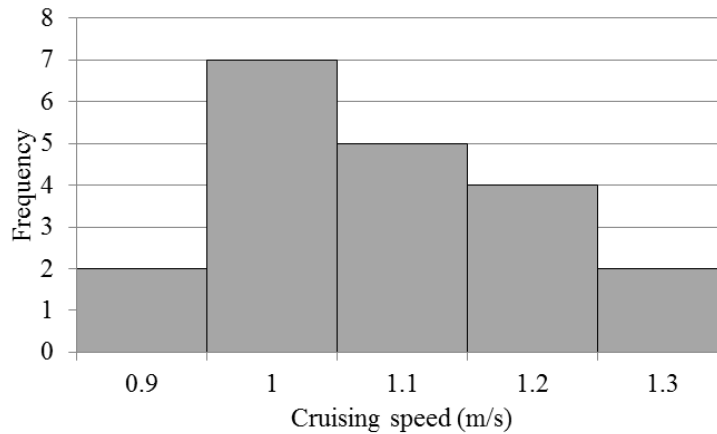


図 3.1: 定常速度の分布

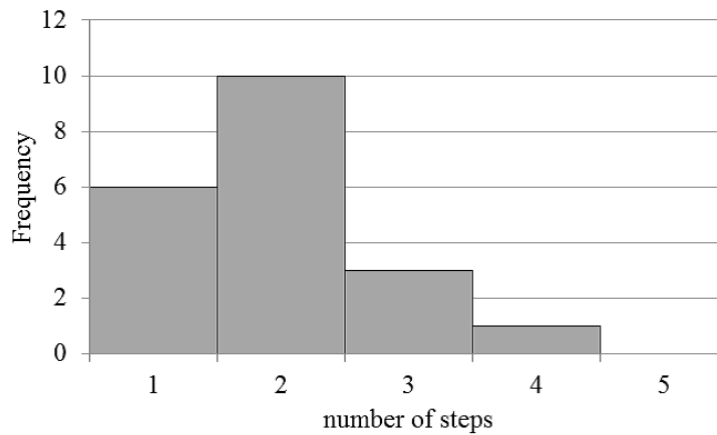


図 3.2: 加速にかかる歩数の分布

3.2.3 予測の誤差に対するリスク

次に、予測誤差のリスクについて述べる。提案した制御手法は不足する力積を予測することでアシスト力を制御しているので、不足する力積が実際よりも大きく予測された時は不必要に大きなアシスト力が台車に加えられる。通常、このように目標の負担軽減率よりも大きくなるような場合は問題にならないが、作業者が大きなアシスト力を予期していなかった場合は作業者が台車を止めようとする可能性がある。このような場合でも、式 (3.1) のように作業者の入力に応じて制御則を切替えることによって作業者は安全に台車を停止させることができる。

$$F_a(t) = \begin{cases} F_h \alpha(t) & F_h < 0 \\ F_h \beta_{ref} & F_h \leq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで F_h, α, β_{ref} はそれぞれ作業者の入力, 制御されるアシスト比, 目標の負担軽減率である. 一方で, 予測された不足する力積が実際よりも小さくなる場合, 目標の負担軽減率を達成できる可能性は低くなる. また, もし本制御方法が適用されている間に台車が何かの障害物に衝突した場合は大きな力が障害物に加わる可能性がある. 本研究ではこの点を解決する方法については検証できていないが, 速度センサから衝突を検知してアシスト力の出力を 0 にしたり, Y. Ueno[34] らが報告しているように衝突回避機能を実装したりすることでリスクを軽減することができると考えている.

3.3 歩行の影響を考慮した LRRC のアルゴリズム

ここでは, 歩行を考慮した LRRC のアルゴリズムについて説明する.

3.3.1 キャリブレーション

図 3.3 は歩行を考慮した LRRC のキャリブレーションプロセスをのフローチャートを示す. 最終速度の決定無意識に台車を加速させた時の最終速度 v_f を計測し, その中央値を用いる. 歩数検出の決定初期入力から 2 歩の加速, 3 歩の加速を検出するために必要な値を求める. 歩行の周波数の決定台車を繰り返し押し, その平均値を取ることでモデルの周波数の較正を行う.

3.3.2 初期入力からの予測

図 3.4 は歩行を考慮した LRRC のフローチャートを, 図 3.5 はブロック線図を示す.

歩行の影響を考慮した LRRC は作業者の初期入力から加速パターンを判断し, 予測モデルを適切なモデルに切替える. 加速パターンを大きく分けると滑らかに加速する場合とそうでない場合に分けられる. 加速が滑らかでない場合は, 歩行の影響が速度に現れるため 2 章で述べた通常の LRRC は適用できない. 図 3.6, 図 3.7 はそれぞれ, 各歩数における台車の速度, 各速度における作業者の入力を示している. これらは同じ条件でパワーアシスト台車を押す実験を行って取得したものである. 図 3.6 では, 各歩数における初期速度カーブは似たような形を示している. しかし, 2 歩, 3 歩の場合には加速が止まっている点があり, 我々はこの点を歩数の予測に使用する. 加速が止まる点が無い場合は, 2 章で述べた躍度最小モデルを使う. 我々は台車の加速が止まる条件を作業者の入力 F_h が減少しておりかつ速度 v の増加率が閾値 ϵ より小さい時として定義した. その加速状態を保持する関数 η_{stop} を以下に示す:

$$\eta_{stop}(t) = \begin{cases} 0 & \left(\frac{dv}{dt} \geq \epsilon \vee \frac{dF_h}{dt} \geq 0 \right) \\ 1 & \left(\frac{dv}{dt} < \epsilon \wedge \frac{dF_h}{dt} < 0 \right) \end{cases} \quad (3.2)$$

ノイズによる誤検出を防ぐため, サンプル数 N_{sample} 回の加速状態をカウントする. カウントされた値が閾値 N_{th} よりも大きくなった時間を台車の加速が止まった時間 t_{stop} とし

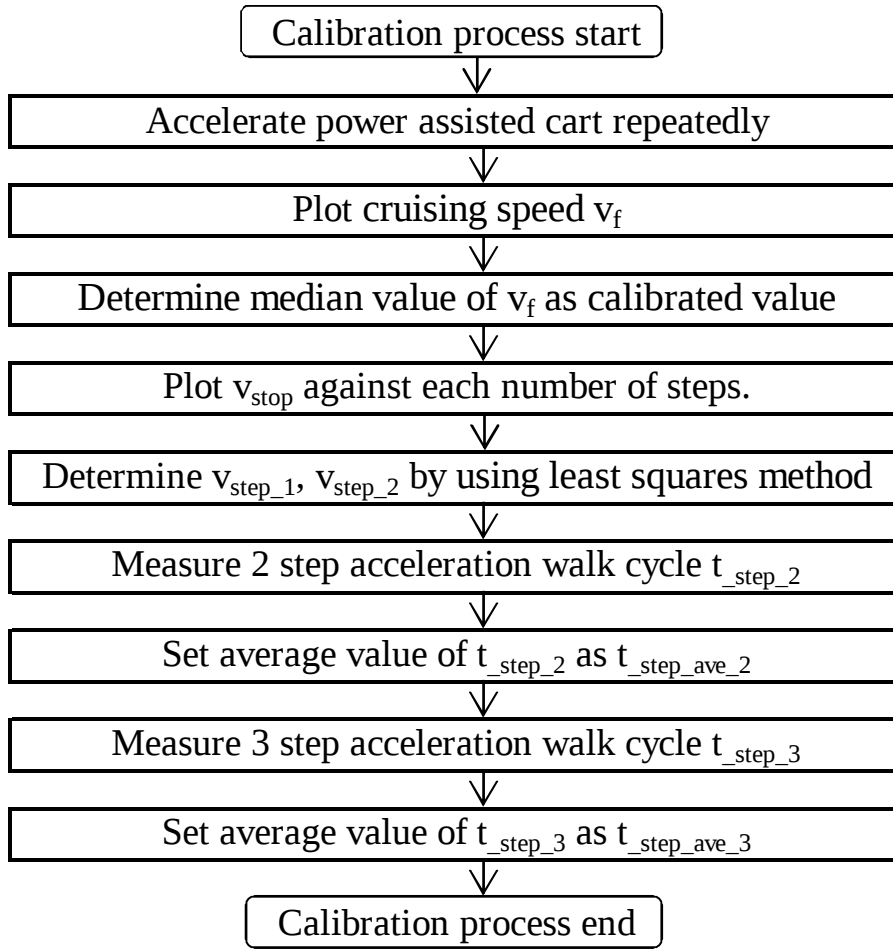


図 3.3: 歩行を考慮した LRRC のキャリブレーションのフローチャート

て定義する.

$$\sum_{t=t_p-N_{sample}}^{t_p} (\eta_{stop}(t)) > N_{th} \quad (3.3)$$

ここで t_p はその時点での時刻である. また v_{stop} は時間 t_{stop} における台車の速度である. v_p が小さい程, 歩数 N_s は大きくなる. 我々は歩数 N_s を以下の条件を使って判断する.

$$N_s = \begin{cases} 1 & v_{step.1} < v_{stop} \\ 2 & v_{step.2} < v_{stop} \leq v_{step.1} \\ 3 & 0 < v_{stop} \leq v_{step.2} \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで v_{step1} , v_{step2} は歩数を判定するための閾値である. 我々はこれらの条件を使って初期入力から 3 パターンの予測モデルのどれを使うか判定する. v_{step1} , v_{step2} は個人によって異なるが, キャリブレーションによって求めることができる. v_{step1} と v_{step2} をキャリ

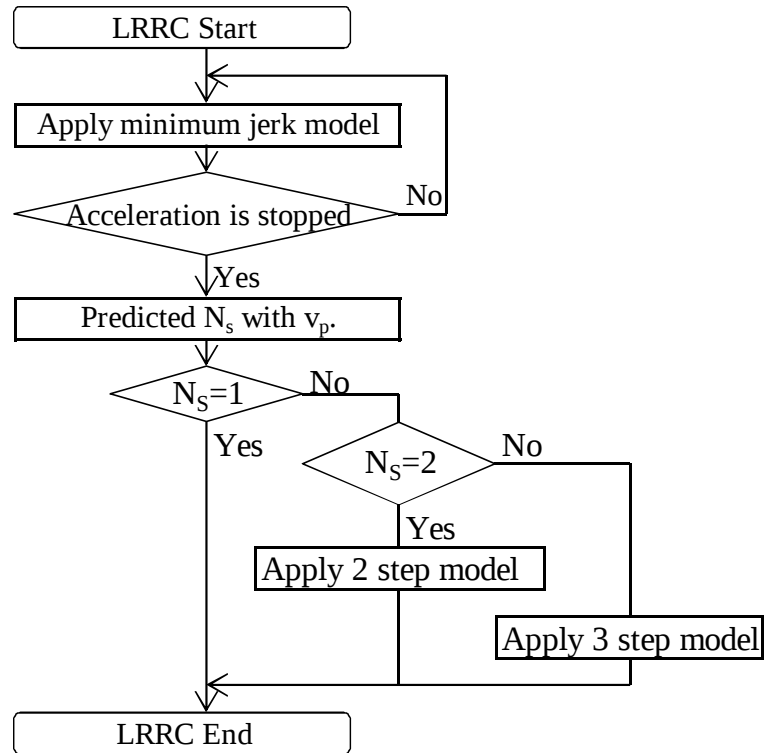
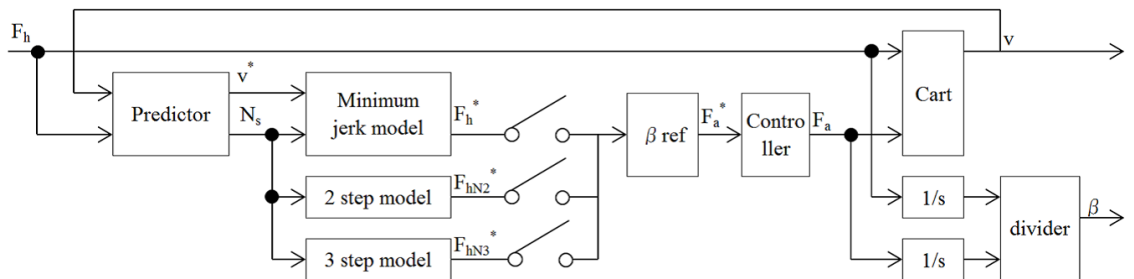


図 3.4: 歩行を考慮した LRRC のフローチャート



F_h : Force of operator, F_{hN1}^* : Predicted F_h (1 step), F_{hN2}^* : Predicted F_h (2 step), F_{hN3}^* : Predicted F_h (3 step), N_s : Number of steps
 F_a : Assist force, F_a^* : Predicted F_a , v : Velocity, v^* : Predicted velocity, β : Load reduction ratio

図 3.5: 歩行を考慮した LRRC のブロック線図

ブレークションするには、作業者が台車を加速させる時の作業者の入力 F_h と台車の速度 v を測定する必要がある。そして加速までの歩数に対する加速停止時刻 v_{stop} をプロットする。個人に対する適切な v_{step1} と v_{step2} は歩数予測の誤差を最小にようにして求められる。図 3.8 は各歩数に対する v_{stop} の実験結果を示す。表 3.1 は歩数予測の実験結果を示す。実験ではパワーアシスト台車を 30 回押し、実際の歩数と予測された歩数を記録した。表 3.1 で示されている通り、30 回のうち 21 回は正しく歩数が予測されており、我々の提案手法は実験で 70% という結果が得られた。

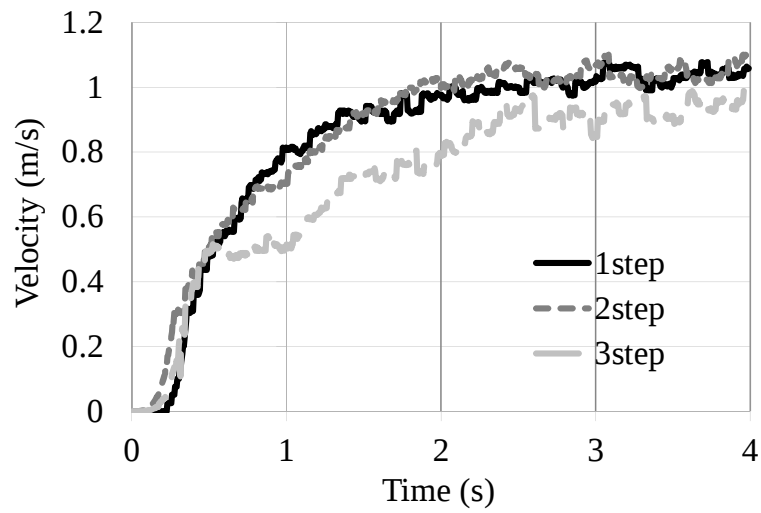


図 3.6: 各歩数における速度の比較

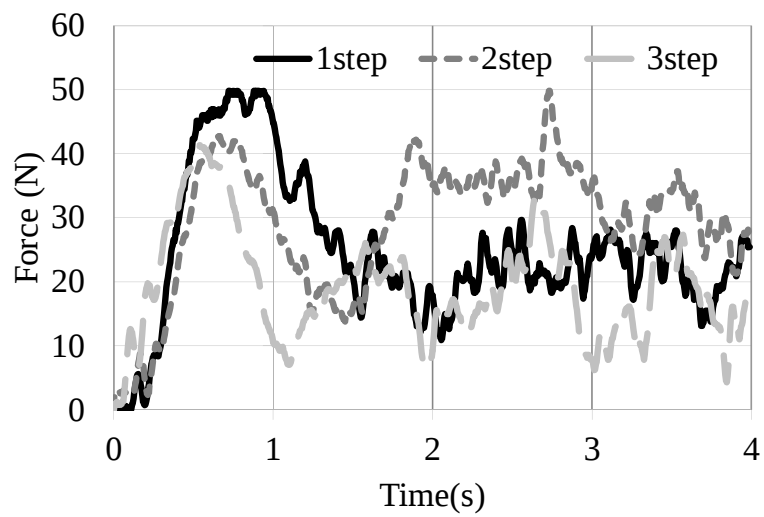


図 3.7: 各歩数における入力の比較

表 3.1: 歩数予測の実験結果

	Actual			
		1	2	3
Predicted(step)	1	7	1	0
	2	3	9	4
	3	0	1	5

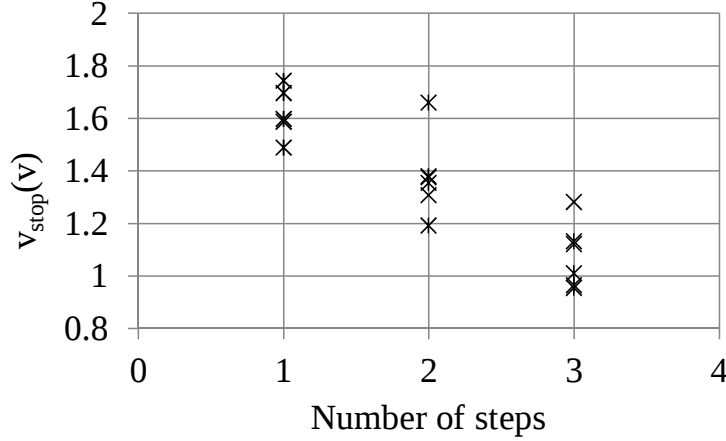


図 3.8: 各歩数に対する v_{stop} の実験結果

3.3.3 予測モデル

ここでは、各加速パターンに対する予測モデルについて述べる。LRRC は加速が滑らかな時は躍度最小モデルを用いるが、速度が歩行の入力に大きく影響を受けて歩数が予測された時は、実験的に得られた予測モデルを使用する。

(i) 加速が滑らかな場合の予測モデル

加速が滑らかな場合については、2章の式 (2.14) から式 (2.27) で示したように台車の速度を予測し、台車のダイナミクスを使って将来の作業者の入力を求める。

(ii) 加速が滑らかでない場合の予測モデル

加速が滑らかでなく、加速までの歩数が予測された時は、実験的に得られた予測モデルを使用する。人間の歩行の特性解析については、様々な研究が報告されている。例えばモーションキャプチャを使った解析 [42] や、加速度センサを使った歩行速度の推定 [43]、更に個人のパラメータの自動キャリブレーション [44, 45] まで報告されている。1歩あたりの平均時間 t_{step_avg} については、歩行速度が 1.39m/s の時で $0.53 \pm 0.02s$ [46] と報告されている。

本論文では、加速が完了するまでの歩数に応じて異なる予測モデルを使用する。ここでは、台車押し作業を何度か繰り返し、平均的なモデルを得た。図 3.9 は実際の作業者の入力と予測モデルを示している。

2歩の場合の作業者の入力モデル F_{hN2}^* と3歩の場合の作業者の入力モデル F_{hN3}^* は以下のように表される：

$$F_{hN2}^*(t) = \begin{cases} C_1 \sin(C_2 t) + C_3 & 0 < t < t_{step_avg_2} \\ C_4 \sin(C_5 t) + C_6 & t \geq t_{step_avg_2} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$F_{hN3}^*(t) = \begin{cases} C_7 \sin(C_8 t) + C_9 & 0 < t < t_{step_avg_3} \\ C_{10} \sin(C_{11} t) + C_{12} & t_{step_avg_3} < t < t_{step_avg_3} * 2 \\ C_{13} \sin(C_{14} t) + C_{15} & t \geq t_{step_avg_3} * 2 \end{cases} \quad (3.6)$$

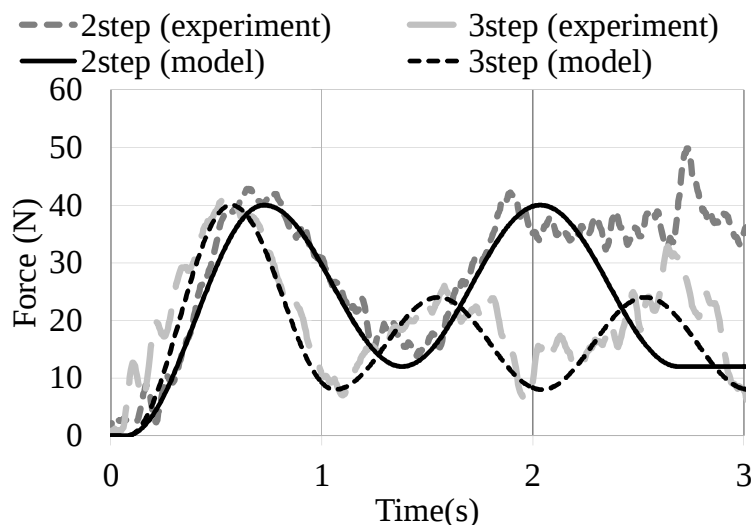


図 3.9: 作業者の実際の入力と予測モデル

ここで C_1 から C_{15} は定数であり、台車のダイナミクスに応じて調整される。表 3.2 は我々の実験で使用された値を示す。 $T_{step.avg.2}$ は 2 歩で加速が終了する場合の 1 歩当りの平均時間であり、 $T_{step.avg.3}$ は 3 歩で加速が終了する場合の 1 歩当りの平均時間である。 $T_{step.avg.2}$ と $T_{step.avg.3}$ の値は個人によって異なるので、これらの値は平均値を計算することによってキャリブレーションされる必要があり、歩数は式 (3.2) から式 (3.4) を使って計算される。本研究では、最終速度が一定である時を対象として、実験結果に基づいた予測モデルが生成されており、最終速度が定義された目標値から異なる場合には適用できない。この問題についてはもし予測モデルが異なる最終速度に対して調整されれば改善されるが、本論文の目的は、初期入力から加速パターンを予測して予測モデルを適切なモデルに切替えることを考慮することによって負担軽減率が改善される事を示すことであるので、本論文ではこの問題を扱わず将来の課題とする。

表 3.2: 実験で使用された変数の値

変数	値	変数	値	変数	値
C_1	1.000	C_6	0.600	C_{11}	0.032
C_2	0.024	C_7	1.000	C_{12}	0.500
C_3	1.000	C_8	0.032	C_{13}	0.400
C_4	1.000	C_9	1.000	C_{14}	0.032
C_5	0.700	C_{10}	0.700	C_{15}	0.500

3.3.4 アシスト力の計算

ここでは、予測モデルからどのように不足する力積を計算し、目標の負担軽減率を計算するためにどのようにアシスト力を計算するかについて説明する。

(a) 加速が滑らかな場合のアシスト力の計算

加速が滑らかな場合については、2章の式 (2.14) から式 (2.27) で示したように不足する力積を予測し、予測の信頼度に基づいて力積を分配する。

(b) 加速が滑らかでない場合のアシスト力の計算

作業者の歩行による入力速度曲線に大きく影響して歩数が予測された場合、アシスト力の上限 F_{aMAX} を考慮して将来のアシスト力 F_a^* を予測する：

$$F_{aNs}^*(t) = \begin{cases} \beta_{ref} F_{hNs}^*(t) & F_{aNs}^* < F_{aMAX} \\ F_{aMAX} & F_{aNs}^* \geq F_{aMAX} \end{cases} \quad (3.7)$$

図 3.10、図 3.11 はそれぞれ、アシスト力の上限を考慮した場合に予測されるアシスト力、計算された不足する力積を示す。

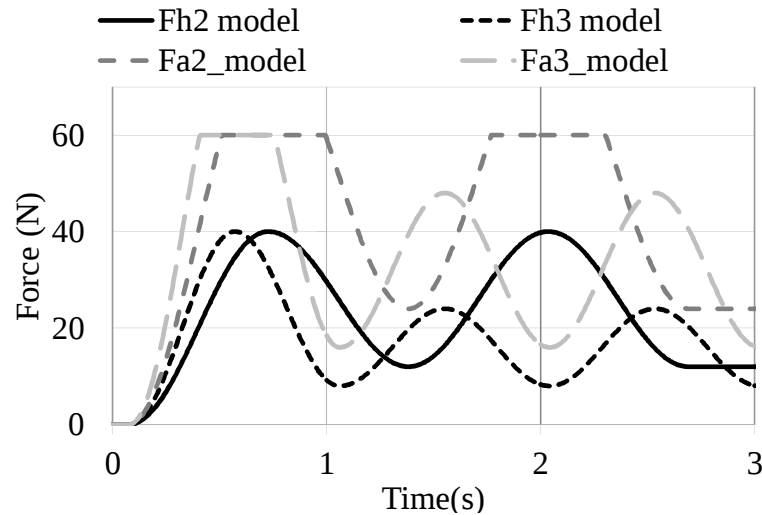


図 3.10: トルク飽和を考慮した予測アシスト力

目標の負担軽減率を達成するためには、予測される総合的な入力 $F_T^*(t)$ を使って不足する力積 S_{NEED} を計算する必要がある。目標速度曲線 $v^*(t)$ は目標速度 $v_f = 1.1$ と終了時間 $t_f = 3$ を式 (2.12) に代入することで得られる。予測される総合的な入力 $F_T^*(t)$ は目標速度曲線 $v^*(t)$ を式 (2.15) に代入することによって得られる。よって不足する力積 S_{NEED} は以下のように表される：

$$S_{NEED} = \int_{t_0}^{t_f} F_T^*(t) dt - \int_{t_0}^{t_f} \{F_{aNs}^*(t) - F_{hNs}^*(t)\} dt \quad (3.8)$$

目標の負担軽減率を達成するためのアシスト力を出力するための比は以下のように表さ

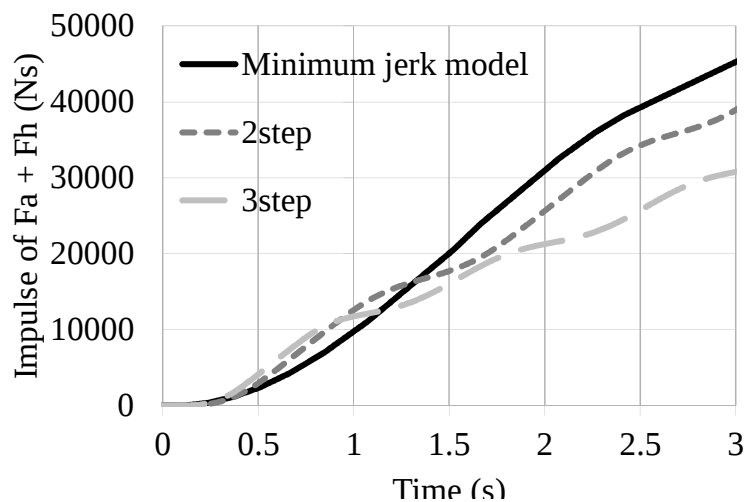


図 3.11: 計算された不足する力積

れる：

$$\alpha(t) = \frac{\int_0^{t_f} F_a^*(t) dt + S_{NEED}}{\int_0^{t_f} F_h^*(t) dt} \quad (3.9)$$

図 3.12 は計算されたアシスト比が適用された際のアシスト力を示す。

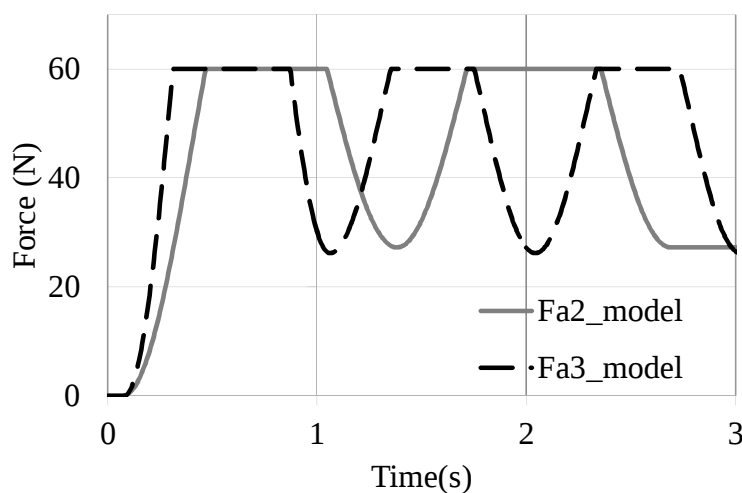


図 3.12: 目標の負担軽減率を達成するためのアシスト力

本論文では加速が4歩未満で終わるような場合を扱う。しかし、もし加速が4歩以上で終了する場合は、3歩の予測モデルが使われて不足すると予測された力積を補うためにアシスト力が加えられる。しかし、加速がゆっくり行われる場合はトルク飽和が起きにくい傾向にあるので、負担軽減率は目標値よりも大きくなる。この場合、アシスト力と作業者の

入力の違いが違和感をもたらす可能性があるが、このようなケースが起きる可能性は低いので、この点については将来の課題とする。

3.4 実験結果

3.4.1 各ステップのモデル予測の誤差

たとえ歩数が正しく予測されたとしても、予測モデルと実際の作業者の入力の間には誤差がある。ここでは、歩行予測モデルが使用された場合にどの程度の誤差が発生するかについて述べる。これらの実験は1名の被験者によって行われた。本論文の目的は、初期の入力から加速パターンを予測することを考慮することによって負担軽減率が改善される事を示すことであるので、作業者の特性の変化に対して制御方法がどの程度ロバストかという点については将来の課題とする。

図 3.13 は予測モデルと実際の入力の例との比較を示す。図 3.13 で示されているように、加速が停止した時点での速度 v_p は式 (3.4) の3歩での条件を満たすので歩数は3歩と予想される。速度が目標速度に近づくまでの実際の歩数は3歩であり、このケースで歩数予測は正しく行われている。しかし、予測モデルと実際の作業者の入力には差異がある。図 3.13 と図 3.14 で示されているように、速度が目標速度に達した時、誤差はおよそ40%程度になっている。この結果は表 3.2 で示した21回の実験結果の最悪の結果を示しており、この条件での最大累積誤差はおよそ40%程度であると言える。

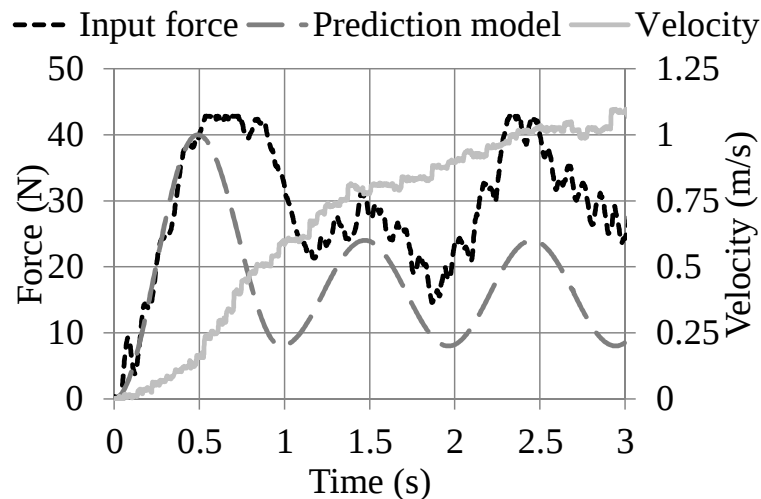


図 3.13: 予測モデルと実際の入力の比較

3.4.2 歩行を考慮した LRRC と考慮しない LRRC の比較

図 3.15 は台車の速度センサの電圧、作業者の入力 (歪みゲージの出力電圧) とアシスト力を示している。図 3.15 では、およそ1秒の付近で作業者の入力が増加して加速が一時

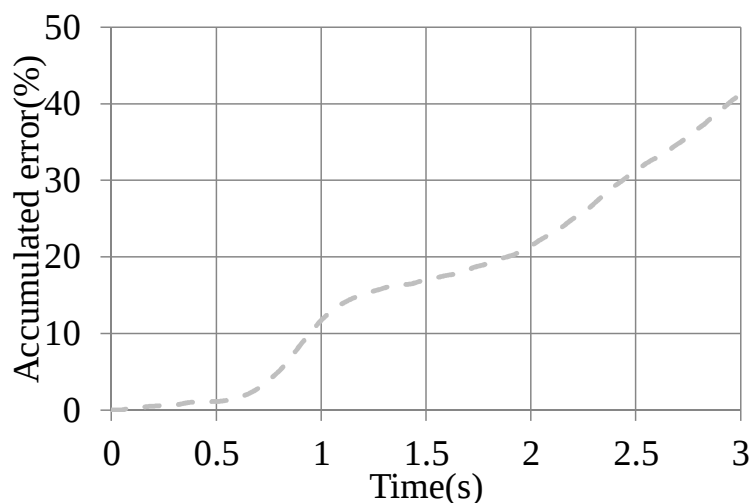


図 3.14: 予測モデルに対する実際の力積の誤差

表 3.3: 歩行予測に対する負担軽減率

Predicted (step)	Actual			
		1	2	3
1	1	1.88	1.78	-
2	2	1.93	1.94	2.45
3	3	-	2.02	2.31

的に止まっている．この条件は式 (3.2), 式 (3.3) と, 式 (3.4) の3歩の条件に一致しているので, この時点で予測モデルは3歩のモデルに切り替えられる．このように, 我々の方法では不連続点が発生する．実験ではアシスト比が比較的小さかったため違和感は無かったが, この点は将来の課題として解決されるべき点である．この点で, アシスト力の制御則は比例アシスト制御から式 (3.6) で表されるモデルに切り替わる．

図 3.16 は LRRC と, 歩行予測モデルを考慮した LRRC における負担軽減率の比較を示している．ここでは, 歩行予測モデルを考慮した LRRC の結果は実験から得られた結果であり, LRRC の結果は実験時と条件を合わせるために実験時の入力からアシスト力と負担軽減率をシミュレーションして得られた結果である．図 3.16 で示されているように, 歩行予測を考慮しない LRRC の結果では不足する力積が予測されないため負担軽減率が目標値を下回っている．一方で, 歩行予測を用いた LRRC では, 歩行予測モデルによって不足する力積が予測されて負担軽減率が目標値を上回っている．

図 3.17 は実験における負担軽減率の範囲を示している．棒グラフはそれぞれ従来のアシスト手法, 歩行予測を用いない LRRC, 歩行予測を用いた LRRC の結果に対する負担軽減率の最大値, 平均値, そして最小値を示している．ここでは制御方法の効果を評価するために平均値を用いる．最大値は実際の入力が入力より小さかったときに得られ, 最小値は実際の入力が入力より大きくトルク飽和が長い期間にわたって起きたときに得られ

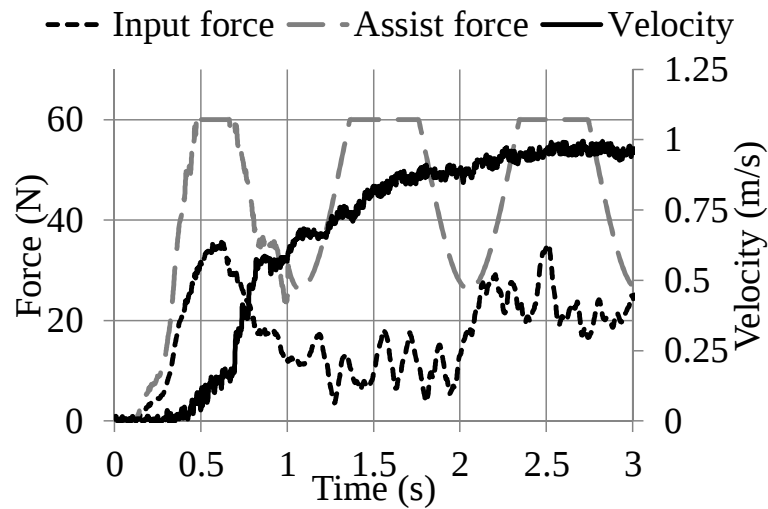


図 3.15: 作業者の入力に対するアシスト力と台車の速度

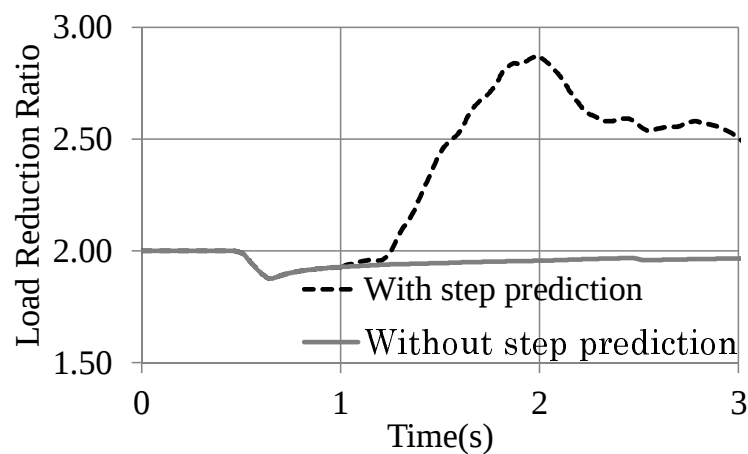


図 3.16: 歩行予測モデルを考慮した LRRC における負担軽減率の比較

る。最大値は、作業者に違和感を与えない範囲で、大きければ大きい程良い。最小値については、場合によってはほぼ全ての期間にわたってトルク飽和が起こって、最小の負担軽減率が制御方法に関わらずほぼ同じ値になるため、制御方法の効果の評価の対象として使用するべきではない。

図 3.17 の (b) と (c) で示されているように、歩行の影響を考慮した LRRC を適用することによって、負担軽減率の平均は 1.88 から目標の負担軽減率よりも高い 2.05 へ増加している。最大の負担軽減率もまた 2.04 から 2.76 に増加している。これらの結果は台車押し作業が、歩行の影響を考慮した LRRC を適用することによって改善されることを示している。

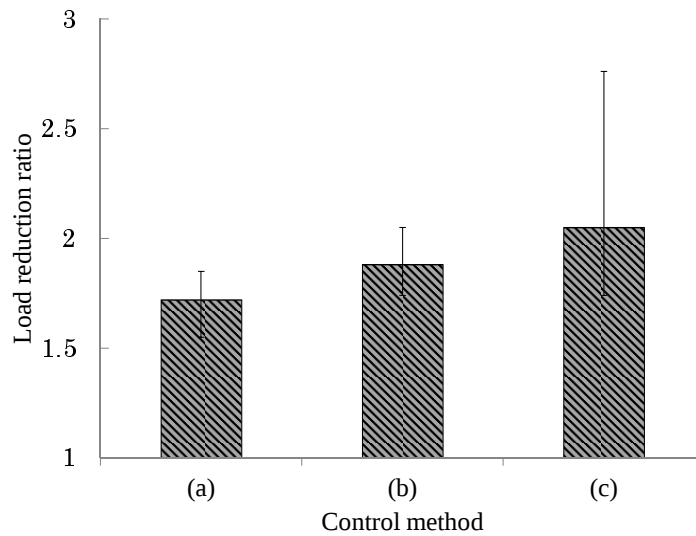


図 3.17: 実験結果における負担軽減率の範囲

(a) 従来手法, (b) 歩行の影響を考慮しない LRRC (c) 歩行の影響を考慮した LRRC

3.5 考察

本論文では、初期入力から目標速度までの歩数を予測することによって目標の負担軽減率の達成率を改善するパワーアシスト制御方法について述べた。この方法では、作業者の加速パターンを予測するために作業者の入力と台車の速度を用いた。実験を通じ、初期入力からの歩数を予測し、その予測結果をもとに予測モデルを切り替えて制御することによって、平均の負担軽減率が1.88から目標の負担軽減率の2.0よりも高い2.05に増加することを示した。しかし、定義された最終目標速度と最終速度が異なる場合や、作業者の特性が変化した場合にこの制御方法を適用できない。また、アシスト比の急激な変化によって起こる違和感は改善されるべきであり、これらは将来の課題として挙げられる。

第4章 結論

本章では、本論文で述べてきた研究の内容とその成果を総括する。また、残された今後の課題についても述べる。本論文では、パワーアシスト台車を低出力化するための機構と、その機構において発生する課題を解決するための制御手法を提案した。提案した負担軽減率補償制御は、力積を使った評価指標を用い、作業者の入力を予測して不足する力積を補うことを特徴としている。第1章では、研究背景とパワーアシスト台車についての関連研究およびその課題について述べるとともに、本研究の目的を示した。第2章では、提案する機構とその機構を用いた場合に発生する課題について示し、解決策の概念と従来手法との違いについて述べた。新しく導入する負担軽減率の定義と、それを利用した解決策のアルゴリズムについても述べ、その有効性を確認するためにシミュレーションと実験を行った。シミュレーションと実験によって、提案手法を用いることで負担軽減率を改善できることが示され、提案手法の有効性が確認された。また、負担軽減率補償制御に予測値の信頼度を考慮したアルゴリズムを導入し、その手法の有効性を確認するためにシミュレーションと実験を行った。シミュレーションと実験によって、予測より作業者の入力が大きくなった場合について、信頼度を考慮することで負担軽減率の範囲を改善できることが示され、提案手法の有効性が確認された。第3章では、初期の入力から目標速度に達するまでの歩数を予測して適切な予測モデルに切り替えることで目標の負担軽減率を達成するパワーアシスト制御方法について述べた。その有効性を確認するために実験を行い、提案手法を用いることで負担軽減率を改善できることが示され、提案手法の有効性が確認された。第4章では、結論を述べている。ここで、提案した負担軽減率補償制御と信頼度を考慮した制御方法について、それぞれの結論を述べる。

4.1 負担軽減率補償制御について

台車を加速させるのに不足する力積を予測して目標の負担軽減を得るために、新しい評価指標である負担軽減率を導入して躍度最小モデルに基づいて作業者の入力を予測する負担軽減率補償制御を提案した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 力積に基づいた負担軽減の指標である負担軽減率を提案した。
- (2) 躍度最小モデルに基づいて作業者の入力を予測する負担軽減率補償制御を提案した。
- (3) 負担軽減率補償制御を適用することで負担軽減率を改善することを示した。
- (4) 予測が的中した場合、約90%の出力のモーターで同じ負担軽減率が得られる。

これらの結果は実験を行うことで得られ、シミュレーションと同様な傾向が得られることが示された。今後の課題としては、トルク飽和の前後に起きる急激なアシスト比の変化を緩和することと、予測モデルの改善によって予測の的中率を改善することが挙げられる。

4.2 信頼性を考慮した制御方法の影響について

予測値の信頼度を考慮して不足する力積を分配する負担軽減率補償制御を提案した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 最小誤差二乗法を用いた場合の予測誤差モデルを定義した。
- (2) 予測誤差に基づいて力積を分配する手法を提案した。
- (3) 信頼度を考慮することで負担軽減のロバスト性が高まることが示された。

これらの結果は実験を行うことで得られ、シミュレーションと同様な傾向が得られることが示された。

4.3 歩行モデルによる予測を用いた制御方法について

初期の入力から目標速度に達するまでの歩数を予測して適切な予測モデルに切り替えることで目標の負担軽減率を達成するパワー制御方法を提案した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 初期の入力から、目標速度に達するまでの歩数を予測する方法を提案した。
- (2) 加速にかかる歩数に基づいて予測モデルを切り替える方法を提案した。
- (3) 歩行モデルを考慮することで負担軽減率が改善されることが示された。

これらの結果は実験を行うことで得られた。今後の課題としては、加速の最終速度や作業者の特性が変わっても対応できるようにすることと、アシスト比の急激な変化を抑えることが挙げられる。

4.4 まとめと今後の課題

本稿では、操作者の操作意図を初期の入力から目標速度に達するまでの歩数を予測して適切な予測モデルに切り替えることでトルク飽和によって不足する力積の大きさを求め、その不足する力積に基づいてアシスト比を変化させることで目標の負担軽減率を達成するパワーアシスト制御方法を検討した。負担軽減率の評価指標としては、加速開始から終了までの時間におけるアシスト力の力積と作業者の力積の比を用いた。いくつかの仮定に基づいて提案手法のシミュレーションと実験を行った結果、躍度最小モデルに基づいて入力を予測し、不足すると予測された力積をトルク飽和が起こる前後に分配することで所望の負担軽減率を得られることが確認できた。更に、予測の信頼度を考慮して不足する力積の分配比率を変化させることで負担軽減率が改善されることを確認した。また、歩行の影響によって入力が躍度最小モデルから大きく外れる場合には、初期の入力から目標速度に達するまでの歩数を予測して適切な予測モデルに切り替えることで負担軽減率が改善されることを確認した。本論文では検証の対象として比較的構造が簡単なパワーアシスト台車を用いて実験を行ったが、提案した制御手法はパワーアシスト自転車やパワーアシスト台車などの他のパワーアシストシステムにも適用できる可能性がある。提案手法によってパワーアシストシステムの低出力化が実現できれば、更なるパワーアシストシステムの普及が期待される。今後の課題としては、作業者の特性の変化への対応と、アシスト比の急激な変化による操作感の変化への対応が挙げられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，貴重な機会を下さり，様々な援助を筆者に与えて下さると共に，熱心にご指導いただいた田中孝之准教授，並びに金子俊一教授，山下裕教授に心から感謝申し上げます．そして研究生活に関する様々な手続きをしていただいた吉川美紀秘書，途中雅恵秘書，福島静帆秘書，研究内容について議論して下さった日下聖特任助教，研究室の先輩方，同輩方，後輩方にも感謝申し上げます．また，社会人博士として北海道大学に在籍することを許可していただいた株式会社小松製作所，並びに許可していただいた当時の上司である栗原隆様，現在の上司である佐川清和様に感謝申し上げます．最後に，本論文を執筆するにあたり協力してくださった全ての方に心から感謝いたします．

参考文献

- [1] Schwatka, N. V., Butler, L. M., & Rosecrance, J. R. , “ An aging workforce and injury in the construction industry, ” Epidemiologic Reviews, vol. 34, pp. 156-167, 2012.
- [2] 佐川 克雄, 中嶋 勝也, 平野 聡, 大高 理秀:パワーアシスト積載運搬台車の研究開発, 茨城県工業技術センター研究報告, Vol.27,28-29,1999.
- [3] 藤原 茂喜, 北野 斉, 山下 秀樹, 前田 裕史, 福永 秀雄:全方向移動型パワーアシストカート, 日本ロボット学会誌, Vol.20,No1, p53-54,2002.
- [4] 北原隆, 早津昌樹: “パワーアシスト運搬台車の開発”, 機械力学・計測制御講演論文集, pp.190,2002.
- [5] 株式会社シロ産業 Web サイト, 電動アシスト台車,
<http://www.newproduct.jp/3813.html>
- [6] 株式会社山一精工 Web サイト,
<http://yamaichi-seikou.com/>
- [7] 電動車いす用電動アシストユニット JWX-2, <http://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/lineup/jwx2/>
- [8] Y.Satoh et al., Smart Suit for Agricultural Use (1st Report, A prototype of smart suit and its fundamental experiments), Proceedings. of the 24th Annual Conf. of the Robotics Society of Japan, 3G24(CD-ROM), 2006.
- [9] 藪下英典, 平田泰久, 小菅一弘,: “パワーアシスト自転車の走行抵抗可変型制御”, 日本機械学会論文集 (C 編)69 巻 680 号, pp.195-200,2003.
- [10] Shian-Ru Ke, Le Uyen Thuc Hoang, Yong-Jin Lee, Jenq-Neng Hwang, Jang-Hee Yoo, and Kyoung-Ho Choi, “A Review on Video-Based Human Activity Recognition, ” Computers, vol. 2, no. 2, pp. 88-131, 2013.
- [11] T. Mori, K. Tsujioka, “ Human-Like Daily Action Recognition Model, ” J. of Robotics and Mechatronics, vol. 17, no. 6, pp. 672-680, 2005.
- [12] N. Ravi, N. Dandekar, P. Mysore, and M. L. Littman, “ Activity recognition from accelerometer data, ” AAAI, vol. 5, pp. 1541-1546, 2005.

- [13] T. Choudhury et al., “The Mobile Sensing Platform: An Embedded System for Activity Recognition,” *IEEE Pervasive Comp.*, vol. 7, no. 2, pp. 32-41, 2008.
- [14] K. Kiguchi, M. Liyanage, Y. Kose, “Perception Assist with an Active Stereo Camera for an Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton,” *International Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 21, no. 5, pp. 614-620, 2009.
- [15] K.J.Astrom and L.Rundqwist: “Integrator Windup and How to Avoid it”; *Proc. ACC*, pp1693-1698, 1989.
- [16] R.Hanus, M.Kinnaert and J.L.Henrotte: “Conditioning Technique, a General Anti-windup and Bumpless Transfer Method”; *Automatica*, Vol.23, No6, pp.729-739, 1987.
- [17] M.V.Kothare, P.J.Campo, M.Morari, and C.N.Nett: “A Unified Framework for the Study of Anti-Windup Designs”; *Automatica*, Vol.30, No12, pp.1869-1883, 1994.
- [18] 和田信敬, 佐伯正美: “入力飽和システムの Anti-windup 制御”, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, 46(2), pp84-90, 2002.
- [19] 荒井裕彦, 舘すすむ: “トルク飽和を考慮したマニピュレータの目標経路追従制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.727-734, 1991.
- [20] 小島正稔: “電動スクーター市場の生成と萌芽期-環境適応型ベンチャーの発展基盤としての環境政策と産業政策”; *経営力創成研究* (6), pp.31-44, 2010.
- [21] 株式会社アラキ製作所 Web サイト, スキルカート,
<http://www.araki-mfg.co.jp/img/catalogue.pdf>
- [22] Martin Kienle, Daniel Dambock, Johann Kelsh, : “Towards an H-Mode for highly automated vehicles:Driving with side sticks”, *Proceedings of the First International Conference on Automotive User Interface and Interactive Vehicular Applications*,pp.19-23,2009.
- [23] Hiroshi Maeda, Shigeki Fujiwara, Hitoshi Kitano, Hideki Yamashita, Hideo Fukunaga:Control of omni-directional power assisted cart, *Proceedings ... International Conference on Motion and Vibration Control* 6(2), 891-896,2002.
- [24] Yabushita Hidenori, Hirata Yasuhisa, Kosuge Kazuhiro:Control of Power assisted Cycle with Adjustable Apparent Drag Force, *日本機械学会論文集,C編* 69(680), 1031-1036, 2003-0425.
- [25] N.Hogan, T.Flash: “The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model” *The Journal of Neuroscience* Vol5, No7, pp1688-1703, 1985.

- [26] 趙莉, 堀洋一: “安全と乗り心地の向上を目指し加速度・ジャーク限界とドライバ指令変更を考慮したリアルタイム速度パターン生成”, 電気学会産業計測制御研究会,IIC-04-29, pp.190,2002.
- [27] Y.Maeda, T.Hara, T.Arai, ”Human-Robot Cooperative Manipulation with Motion Estimation Using Minimum-Jerk Model,” Journal of the Society of Mechanical Engineers, 68(675),3367-3372, 20021125.
- [28] 関弘和, 杉本武明, 多田隈進:“躍度最小軌道に基づくパワーアシスト車椅子の走行制御法”, 電学論 C,Vo;.125,No.7,pp.1133-1139,2005.
- [29] 渡辺信哉, 堀洋一: “傾斜環境を考慮したパワーアシスト車椅子制御の高機能化”, 電気学会産業計測制御研究会,IIC-04-29, pp.190,2002.
- [30] Maeda, H. et al. “Development of omni-directional cart with power assist system,” (in japanese), In Proc. 18th Annual Conf. of Robotics Society of Japan, vol. 15, pp.1155-1156, 2000.
- [31] K. Terashima, K. Watanabe, Y. Ueno, Y. Masui, “ Auto-tuning Control of Power Assist System Based on the Estimation of Operator’s Skill Level for Forward and Backward Driving of Omni-directional Wheelchair, ” Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2010), pp. 6046-6051, Taipei, Taiwan, Oct. 2010.
- [32] Y. Nemoto, S. Egawa and M. Fujie, “ Power assist control developed for walking support, ” Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 11, no. 6, pp. 473-476, 1999.
- [33] Miyawaki K, Iwami T, Obinata G, Kutsuzawa K, Nishimura S, “ Evaluation of the gait of elderly people using an assisting cart (gait on slope), ” Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 14, no. 6, pp. 538-546, 2002.
- [34] Y. Ueno, H. Kitagawa, K. Kakihara and K. Terashima, “ Design and Control for Collision Avoidance of Power-assisted Omni-directional Mobile Wheelchair System, ” Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), pp. 902-907, Kyoto, Japan, Dec. 2011.
- [35] A. Kaisumi, Y. Hirata, and K. Kosuge, “ Investigation of User Load and Evaluation of Power Assistive Control on Cycling Wheelchair, ” Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 25, no. 6, pp. 959-965, 2013.
- [36] A. Nakamura, Y. Fujimoto, O. Nitta, T. Yamaguchi, “ Intelligent Powered Wheelchair Assistance in Daily Use, ” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol. 14, no. 3, pp. 281-287, 2010.
- [37] K. Miyawaki, T. Iwami, G. Obinata, et. al., “ Evaluation and development of assistive cart for matching to user walking, ” Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 19, no. 6, pp. 637-645, 2007.

- [38] M. Saida, Y. Hirata, K. Kosuge, “ Motion Control of Caster-type Passive Mobile Robot with Servo Brakes, ” *Advanced Robotics*, vol. 26, issue 11-12, 2012.
- [39] M. Kienle, D. Dambock, J. Kelsh, “ Towards an H-Mode for highly automated vehicles:Driving with side sticks, ” *AutomotiveUI 2009*, pp. 19-23, 2009.
- [40] M. Rahman, R. Ikeura, and K. Mizutani, “ Investigation of the Impedance Characteristic of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Humans, ” *JSME Int. J., Series C*, vol. 45, no. 2, pp. 510-518, 2002.
- [41] Dias, C., Sarvi, M., Shiwakoti, N., Ejtemai, O, “ Experimental Study on Pedestrian Walking Characteristics through Angled Corridors, ” *36th Australasian Transport Research Forum (ATRF)*, pp. 1-11, Brisbane, Australia, 2013.
- [42] Bofeng Zhang, Susu Jiang, Ke Yan et al. “ Human Walking Analysis , Evaluation and Classification Based on Motion Capture System, ” In *Health Management - Different Approaches and Solutions*, InTech, pp. 361-398, 2011.
- [43] Teruaki Ito, “ Walking Motion Analysis Using Small Acceleration Sensors, ” *International Journal of Simulation*, vol. 10, no. 3, pp. 65-71, 2009.
- [44] M. Altini, M. van Dort, R. Vullers, C. van Hoof, O. Amft, ”Self-Calibration of Walking Speed Estimations Using Smartphone Sensors,” *PerCom Workshops 2014*, pp. 10-18, Budapest, Hungary, 2014.
- [45] Lukowicz P, Junker H, Troster G, “ Automatic calibration of body worn acceleration sensors, ” In: *Proceedings of the Second International Pervasive Computing Conference*, pp. 176-181, Vienna, Austria, 2004.
- [46] Satkunskiene D, Grigas V, Eidukynas V, Domeika A, “ Acceleration based evaluation of the human walking and running parameters, ” *Journal of Vibroengineering*, vol. 11, issue 3, pp. 506-510, 2009.

研究業績

- 小林憲弘, 田中孝之, 金子俊一: “CVT と受動素子を組み合わせたパワーアシスト機構の基礎研究”, 精密工学会北海道支部 50 周年記念学術講演会講演論文集, pp.43-44, 2009.
- 小林憲弘, 田中孝之, 金子俊一: “作業者の操作予測とその信頼度に基づいたエネルギー回生パワーアシスト装置の制御方法”, ロボティクスメカトロニクス講演会 2010, 1A1-G28, 2010.
- Norihiro Kobayashi, Takayuki Tanaka, Shyn'ichi Kaneko: "Control method for power-assist systems with an energy regeneration system based on predicting operation," Proc. of IEEE IECON 2010 Industrial Electronics Conference, pp.1477-1482, 2010.
- Norihiro Kobayashi, Takayuki Tanaka, Shun'ichi Kaneko: "Power-Assisted cart Control Method with Motor Torque Limiter based on Prediction of Torque Saturation," Journal of Energy & Power Engineering 6(8) pp.1349-1357 Aug 2012(2).
- Norihiro Kobayashi and Takayuki Tanaka: "Control Method for Power Assisted Cart Using Walking Effect Prediction Aimed at Improvement of Load Reduction Ratio," Journal of Robotics and Mechatronics, 26(6), pp.780-789, 2014/12.
- Norihiro Kobayashi and Takayuki Tanaka: "Power-Assisted Cart Control Method with Motor Torque Limiter Based on Prediction and Its Reliability," Norihiro Kobayashi and Takayuki Tanaka, SII2014, pp.632-637, Tokyo, Japan, 2014/12.