



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	パワーアシストシステムにおける操作対象物の操作方向を考慮した軌道上への誘導力場の設計と手先誘導効果の検証
Author(s)	松田, 潤樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15698号
Issue Date	2023-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15698
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91208
Type	doctoral thesis
File Information	Junki_Matsuda.pdf



博士論文

パワーアシストシステムにおける操作対象物の操作方向を考慮した
軌道上への誘導力場の設計と手先誘導効果の検証

松田 潤樹

2023 年 12 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。

松田 潤樹

審査委員： 主査 田中 孝之 教授
副査 山下 裕 教授
近野 敦 教授

パワーアシストシステムにおける操作対象物の操作方向を考慮した軌道上への誘導力場の設計と手先誘導効果の検証*

松田 潤樹

概要

パワーアシストシステム (PAS) は、産業、医療などの分野で、操作者の肉体的な疲労軽減や重量物の搬送を目的として活用され、我が国の生産労働人口減少に伴う産業の労働力不足の解消にも期待されている。作業用 PAS の特徴としては、操作者が PAS を操作するためのインターフェースを備え、マニピュレータが人に追従して動作する人間機械協調型のシステムである点が挙げられ、一般的な産業用ロボットで必要とされるティーチング作業が不要であり、人間の巧みさや臨機応変さを損なわずに運用できるという利点がある。一方で、作業が繰り返しを前提とする場合、操作者に対する肉体的および精神的な負担が蓄積し、集中力や生産性の低下が懸念される問題も存在する。これらを抑制するために、インピーダンス制御を用いて PAS の追従性を改善し、操作性を向上させる取り組みが行われてきた。従来のパワーアシストシステムにおいて、操作力を低減するために、操作者にとっては意図しない小さな力であっても大きな力として出力され、操作者に危険をもたらす可能性があることがあった。操作者が系に入力した力が制御則に従って拡大するため、これらの問題を抑制するのは難しいこともある。

本研究では、従来の PAS の問題点に対処すべく、PAS の自律性を活用した手法を提案する。従来型 PAS と同様に操作性を向上させつつ、生産性を維持し、操作者の集中力の低下が事故につながらないように、操作者の「随意性」を活かしながら PAS の「他律性」を最適化する設計を行う。提案手法では、仮想的な誘導力を使用して PAS の手先を誘導し、操作者の「随意性」を活用しつつ、PAS の「他律性」を最適化し、従来の PAS と同様に操作者が発揮する操作力を低減することを目指した。手先誘導では、対象物に適した経路で接近できるように、操作対象物の操作方向を考慮して軌道を生成し、軌道上の手先速度を予測する操作モデルを構築した。予測した手先速度が実現できるように、仮想的な力で操作者の手先を誘導する。この際、作業者のスキルや行動戦略に対する影響を最小限に抑えるため、仮想的な誘導力の範囲を定義し、操作者の意図が PAS の予測した動作や力と合致しない場合には誘導力から解放されるように設計した。

本論文では、第 1 章で研究の背景と従来研究、本論文の目的、提案手法を実装する PAS のシステム構成について説明する。第 2 章では、操作対象物の操作方向を定義し、対象物までの軌道生成方法と手先誘導の設計について述べる。作業者のスキルを損なわず、行動戦略を妨げないために、誘導力の範囲も考慮に入れる。第 3 章では、設計した誘導力を評価する操作性評価実験を実施し、提案手法が操作性向上に寄与することを示す。さらに、

*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-DT79145205, 2023 年 12 月 31 日。

第4章では、操作者の「随意性」とPASの「他律性」を最適化するため、誘導力の範囲を適切に設定することで、更なる操作性向上を実現する。

以上の提案手法により、従来の作業用PASで研究されてきた操作力の低減だけでなく、操作者の行動戦略を妨げないアシスト手法を実現した。この論文の成果は、PASの自律性と安全性を向上させるのに大いに貢献できるものと考ええる。

キーワード: パワーアシストシステム, スキルアシスト

Design of Guidance Force Field Considering Approachability for Power Assist System and Validation of Improvement Maneuverability[†]

Junki Matsuda

Abstract

Power Assisted Systems (PASs) are utilized in industrial, medical, and other fields to reduce physical fatigue of operators and to transport heavy objects. The features of the PASs for work use are that it is equipped with an interface to operate the PASs, and that the manipulator follows the operator. The PASs is a human-machine cooperative system in which the manipulator follows the operator. The PASs has the advantage that it does not require teaching work, which is necessary for general industrial robots, and can be operated without losing the skill and flexibility of humans. On the other hand, if the work is repetitive, physical and mental strain on the operator may accumulate, and there are concerns about loss of concentration and productivity. To suppress these problems, efforts have been made to improve the tracking performance of PASs using impedance control and to improve maneuverability. In conventional PASs, even a small force unintended by the operator is output as a large force in order to reduce the operating force. This may cause danger to the operator. It is sometimes difficult to control these problems because the force input to the system by the operator expands according to the control law.

In this study, we propose a method that utilizes the autonomy of PASs to address the problems of conventional PASs. We propose a method that improves operability as in the case of conventional PASs, while maintaining productivity and avoiding accidents due to a loss of operator concentration. The design is to optimize the "autonomy" of the PAS while taking advantage of the "voluntariness" of the operator. The proposed method uses a virtual guiding force to guide the PASs paw and While utilizing the "voluntariness" of the operator, the "autonomy" of the PASs is optimized, aiming to reduce the operating force exerted by the operator in the same manner as a conventional PASs. For end-effector guidance, a manipulation model was constructed to generate a trajectory considering the manipulation direction of the manipulated object and to predict the end-effector velocity on the trajectory, so that the operator can approach the object along an appropriate path. To achieve the predicted end-effector velocity, the operator's end-effector is guided by virtual guidance force. In order to minimize the

[†]Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT79145205, December 31, 2023.

influence on the operator's skill and action strategy, the range of the virtual guidance force is defined. The design was such that the operator is released from the guidance force when the operator intention does not match the predicted motion or force of the PAS.

In this paper, Chapter 1 describes the background of the research, previous studies, the purpose of this paper, and the system configuration of the PASs that implements the proposed method. In Chapter 2, we define the operation direction of the manipulated object, describe the trajectory generation method to the target object, and describe the design of the end-effector guidance. The range of guiding forces is also taken into account in order not to impair the operator's skills and not to interfere with his action strategy. In Chapter 3, maneuverability evaluation experiments are conducted to evaluate the designed guidance force, and it is shown that the proposed method contributes to improving maneuverability. In Chapter 4, we further improve the maneuverability by appropriately setting the range of the guidance force to optimize the operator's "voluntariness" and the "autonomy" of the PASs.

The above proposed method not only reduces the operation force, which has been studied in conventional PASs for work, but also provides an assist method that does not interfere with the operator's action strategy. We believe that the results of this paper will contribute greatly to improving the autonomy and safety of PASs.

Keywords: Power Assist System, Skill Assist

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	本研究の位置づけと目的	3
1.3	PAS のシステム構成	6
1.4	PAS のシステム設計	9
1.5	論文の構成	10
第2章	作業経路上で手先誘導を行う誘導力場	11
2.1	誘導力場を用いた手先誘導	11
2.2	操作方向性	11
2.3	操作方向性を考慮した手先軌道計画	13
2.4	手先軌道と操作モデル	13
2.4.1	手先軌道	13
2.4.2	操作モデル	14
2.5	予測軌道上に手先誘導を行う誘導力場	15
第3章	誘導力場による手先誘導効果の検証	19
3.1	操作性評価値	19
3.2	手先誘導効果評価実験	20
3.2.1	実験条件	20
3.2.2	実験結果	21
3.3	考察	22
3.3.1	最適な誘導力場の広がり σ に対する考察	22
第4章	誘導力場の広がり最適化	35
4.1	最適な誘導力場の広がり推定	35
4.1.1	実験結果から求める最適な誘導力場の広がり推定	35
4.1.2	最適な誘導力場の広がり逐次推定	37
第5章	結論	43
	参考文献	45

目 次

1.1	Overview of PAS with visual sensors	6
1.2	Experimental PAS feature	7
1.3	6-axis force torque sensor	7
1.4	End effector of PAS	8
1.5	System Configuration	9
2.1	Concept of Approachability	12
2.2	Direction of Guidance Force $\mathbf{d}$	16
2.3	Guidance force field $\mathbf{F}_g$	17
3.1	Trajectory Planning	20
3.2	Result of experiment (Subject1)	23
3.3	Result of experiment (Subject2)	24
3.4	Result of experiment (Subject3)	25
3.5	Result of experiment (Subject4)	26
3.6	Sample of the practical workpath	27
3.7	Sample of the practical workpath	28
3.8	Sample of the practical workpath	29
3.9	Sample of the practical workpath	30
3.10	Evaluation value of Spreading Guidance force field σ (acceleration)	32
3.11	Evaluation value of Spreading Guidance force field σ (deceleration)	33
4.1	Evaluation value and the spread of guidance force field σ	36
4.2	Sequential estimation of σ_{opt}	38
4.3	Sequential estimation of σ_{opt}	39
4.4	Sequential estimation of σ_{opt}	40
4.5	Sequential estimation of σ_{opt}	41

表 目 次

1.1	Specification of force sensor	8
4.1	Parameters of $J^*(\sigma)$	37
4.2	Coefficients of determination R^2	37

第1章 序論

1.1 研究背景

我が国においては、足下の少子高齢化の進行により、生産年齢人口が1995年をピークに減少の一途を辿っている。生産年齢人口の減少による労働力の不足や国内需要の現象による経済規模の縮退により、様々な社会的・経済的課題の深刻化が懸念されているところである [1]。

また建設業及び運輸・郵便業の生産性については、国内の全産業において比較的低い水準で推移しており、物流倉庫内の作業のうち、ピッキングやパレタイズ作業における機械化・自動化等による物流業務の効率化、住宅やビル等の建設作業のうち、ロボット等による代替が可能な作業の機械化・自動化等などにより生産性の向上が求められている。また、就業者もここ20年ほどで急速な高齢化が進行している現状にあり、今後、これらの産業における担い手不足の深刻化が懸念される場所である。生産年齢人口の減少に起因した担い手不足の解消に向けて、女性や高齢者を含めた就業者が働きやすい職場環境の創出が求められており、このような就業環境の改善という観点からも、肉体的に負担の大きな作業における負担軽減を目的として、機械化や省力化を推進していく必要がある。

これらの課題を解決する技術としてパワーアシストシステム（PAS）の活用が期待されており、産業、医療などの分野において操作者の肉体的疲労の軽減や重量物の搬送を目的として利用されている [2, 3, 4, 5]。建設業などの重労働が伴う作業現場においては、作業員の生産性向上、および負担軽減を目的として導入されており、少子高齢化の社会の中で、就業者の高齢化に起因した担い手不足を解決する手段としても適用を拡大する取り組みが推進されている [6]。

PASの特徴としては操作者の動きを検出するセンサに加えて、身体的な負担軽減を目的としたアシストを行なうアクチュエータを備え、人に追従して動作する人間機械協調型のシステムである点が挙げられる。PASにおいては一般的な産業用ロボットを利用する際に必要となる教示（ティーチング）作業が不要であり、人間の巧みさや臨機応変さを損なわずに運用が可能であることに加え、使用者が特殊な訓練や教育を受けずに活用できるというのも利点に挙げられる。

製造現場以外においても、人間が生活していく上で行う多種多様な作業をアシストする機器が存在し、例えば重量物を運ぶための台車型のPASでは2002年には松下電工株式会社が病院などでの活用を想定し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 [7] ほか、汎用的な台車におけるPAS [8]、自転車や車椅子などの民生機器についてもアシスト機能が付加された製品が市販されている [9, 10, 11]。

PASのハードウェアに関しては、ゴムやバネなどの素材の伸縮、あるいはモータなどの動力を利用して、身体を用いた作業のアシストを行なうパワーアシストスーツが社会実装

され始めている。装着者あるいは作業対象に対して作用することで、身体動作の支援によりや身体機能の改善を目的としたものが多く存在する [12, 13]。PAS を導入することで、装着者の肉体的な負担が軽減される、あるいは装着者が運べなかった荷物が運べるようになるなど、工程の処理能力を増強、あるいは生産性の向上を図ることができる。例えば農林水産業、食品産業、あるいはサービス業においては、操作者による対象物の認識や操作が不可欠な作業が存在する。自動化が困難なワーク（操作対象物）の取り扱いが生じる作業も多く存在し、作業者の負担軽減を目的に PAS 活用されている [14]。これらの PAS の中には衣服のような形態となっており、操作者が容易に着脱できるものも存在する [15] 重量物や危険物を扱う必要のある建設業や製造業においては、人が持ち上げられない重量物を持ち上げる作業、あるいはワークに人間が近づくことが危険な作業が存在する場合があります、このような作業においては操作者が直接ワークに触れることなく、クレーンや産業用ロボットを PAS として利用できるシステムも開発と活用が進んでいる [16, 17, 18, 19]。

このように様々分野において社会実装が進む PAS について、前述のとおり使用者・装着者に対して追従して動くため、特殊な技術やスキルを必要とせずに利用できる利点が挙げられた。少子高齢化の社会の中で生産年齢人口の減少が続いており、働き手が不足することによって生じる人手不足の解消と、労働生産性の向上は喫緊の課題である [20]。令和 4 年版「労働経済の分析」[21]によると、感染症拡大後の経済社会活動が活発化してきたことに伴い、概ねすべての産業で人手不足感が強まる動きとなっている。令和元年版 [22] においては、全産業通して 8 割以上の企業が人材不足に悩む中で業務プロセスの見直しや、省力化・合理化投資による解決を模索する中働く環境への影響が出ていると答える企業は全体の 6 割にのぼり、残業時間の増加や休暇取得数の減少、従業員の働きがいや意欲の低下などへの影響が懸念されている。これらの課題に対して、人材の確保や育成といった解決に向けた取り組みをおこなうのに併せて、各種作業において使用者が特殊なスキルを必要としない PAS を活用することは、働き手の選択肢を増やす点でも有効であり、多様な分野でのさらなる活用と社会実装が期待されるところである。

本研究においては、これらの社会問題の解決に寄与できるような PAS の活用方法についての提案を行う。昨今普及が進んでいる産業用ロボットを活用し、これらに PAS として利用できるハードウェアについて設計・実装するとともに、操作者がより扱いやすく、肉体的負担が軽減されるよう PAS が自律的に操作者を誘導する制御手法について本論文で述べる。

1.2 本研究の位置づけと目的

PAS のハードウェアについては、前節で述べた通り様々な作業や運動の様態に合わせたかたちで社会実装が進んでいる。これら PAS の活用には、操作時に人の意志を反映するとともに、意図した通りに動く追従性を向上するために様々な試みがなされており、これらは PAS のソフトウェアとして実装される。

本研究で扱う PAS の制御ソフトウェアに関し、操作性を改善するためのこれまでの試みとしては、手先にインピーダンス制御 [23, 24, 25] を実装したものなどが挙げられる。これらに加えて、脳波や筋電信号によって人の意志や行動戦略をセンシングおよび推定を行うことによって、事前に PAS が操作者の動作を推定し、予測することで操作者により良く追従するための試みもなされてきた [26, 27]。これら自律化を行った装着型 PAS の中には、既に実用化や産業利用されているもの [28, 29] も存在し、現在では各々の分野で活用されている。

また、近年では人協働型ロボット [30, 31] のように、当初から人間が産業用ロボットの作業範囲内で作業することを想定して設計されたロボットが市販されている。従来の産業用ロボットにおいては、人が行なうには危険な重量物の搬送や溶接などの作業、あるいは人が行なうよりも高速な作業を安全柵などで仕切られた区画においてロボットが行なう。一方で人協働型ロボットシステムは、人と同じ空間でロボットが作業を行なうことを前提とし、ロボットの作業範囲内に人間が入ったことをセンサが感知すると低速動作となる、あるいは人や障害物に衝突した際に本体に備えたセンサにより動作を停止するものなど、人とロボットの作業範囲が重なったことを検出し、操作者の安全を確保する機能が組み込まれたものである。

これら人協働型ロボットシステムの中には、手先にダイレクトティーチングの機能を備えたものも存在する。一般的な産業用ロボットにおけるティーチング作業では、付属のコントローラを利用して座標を入力し、ロボットの手先を目標位置まで移動させる。ハンドの開閉あるいはワークの把持などの操作がある場合についても、それらをコントローラから入力のうえ一連の作業を事前に記録し計画を行なう。一方で、ダイレクトティーチングは、ロボットの手先を人の手の操作に追従させることで行う機能であり、アームの先端を掴んで操作者の手によって操作し、位置決めをしたい場所に移動させて作業を計画していくものである。この機能を用いると、操作者はロボットの手先などに装備されたセンサを活用してロボットの手先を誘導することで、ティーチング作業における座標入力の手間を省くことが可能となるため、ロボットシステムの操作に際したティーチング作業に費やす時間や作業負担の軽減に寄与するものであり、ロボットと操作者の作業領域が重なる場合においても安全に作業を行うことができる装備がなされた人協働ロボットならではの機能である。

産業用ロボットを用いた PAS においても、ダイレクトティーチングのようにロボットに装備された人の操作力を捉えるセンサを活用し、マニピュレータが人に追従して操作を行なう。一方で、PAS の操作においては操作者が対象物の置かれた位置や状態を認識し、操作方向や操作力を調整しながらマニピュレータを操作させることが一般的である。繰り返しを必要とする作業の場合には、操作者はこれらの動作を繰り返し行う負担を負う必要があり、回数が多くなるほど集中力の低下や疲労の蓄積が不可避で、その結果発生する作業精度や生産性の低下が懸念される。

PAS の利用による肉体的な疲労の蓄積を極力少なくするためには、操作者に対する追従性を向上するとともに、操作者が不要な操作力を発揮することがないようにすることが望まれるところである。また、繰り返しを伴う単調な作業においては、操作者の精神的な負担軽減を図ることも望まれる。

PAS の操作者に対する追従性を向上することで操作者への負担を軽減する点においては、これまでも様々な研究がなされている。山田らによる自動車の製造工程で使用される PAS での操作フィーリングを向上させる試み [32, 33, 34] や、渋谷らによるインピーダンスの調整によって追従性を向上させる試み [35] に代表される操作性を向上させる試みに加え、日下らによる人間の運動を拘束せず、他の動作状態への遷移を促すことを目的としたスキルアシストに関する研究 [36] などが行われてきた。これらはマニピュレータのインピーダンスを決定すること、または系への入力有位相を調整することで追従性の向上を実現している。

生産現場に留まらず一般社会で活用される作業用 PAS を利用する場合、操作者は別の作業と並行して PAS を活用した作業を行うことがほとんどであるが、従来の脳波や筋電信号を用いた手法により、操作者に装着するセンサを用いて PAS を利用する作業のみの動作の予測を行うことが困難な場合も存在すると考える。また作業が繰り返しを前提とする場合、操作者に対する肉体的および精神的な負担が蓄積し、集中力や生産性の低下に起因した誤操作が懸念される問題も存在する。これらを抑制するために、インピーダンス制御を用いて PAS の追従性を改善し、操作性を向上させる取り組みが行われてきたところであるが、従来のインピーダンス制御を用いた PAS では、操作力を拡大するという用途から、操作者が系に入力した力が制御則に従って拡大されて出力される。操作者にとっては小さな力であっても、大きな力となって出力されることによって意図しない動作の原因となり、操作者にとって危険を伴う場合も考えられるものの、PAS の特徴からこれらの問題を抑制するのは難しい場合も存在する。この点については、様々な形態で応用されるであろう PAS において、その制御系設計に急激な応答を回避するための仕組みを組み込んだ取り組み [37] も行われているところである。より操作者の負担軽減に寄与する PAS の構築に際しては、従来型 PAS と同様に操作性を向上させつつ、生産性を維持し、操作者の集中力の低下が事故につながらないよう、PAS の自律化によって操作者の安全を考慮した設計を取り込み、操作者にとっての「随意性」を活かしながら、PAS からみた「他律性」の最適化を行なう人間機械系システムの設計を行なう必要がある。

本研究においてもこの PAS の問題点に対処すべく、PAS の自律性を活用した手法を提案する。上記の先行研究を踏まえ、繰り返し作業において作業精度を維持し、人の運動を完全に妨げることがないという点を考慮すると、人工ポテンシャル法 [38, 39, 40] を活用できると考えた。

人工ポテンシャル法は自律移動ロボットではしばしば導入されている目標位置にロボットを誘導する手法である。この方法では、目標とする位置において最小となるポテンシャルを作業空間内に設定し、目標位置に至る勾配ベクトルを用いてロボットを制御する。ポテンシャル場を積極的に変形させることで進行方向の制御が可能になることに加えて、作業空間内に障害物など回避すべきオブジェクトが存在する場合には、障害物付近に高いポテンシャルを設定することで壁を作り、目標位置までの経路において経由しないような経路設計も可能である。これらは PAS において応用する場合には目標座標への誘導を行う

一方で操作者の意思を PAS に反映しやすい点が有用であり、これまでの研究において人工ポテンシャル法を踏襲して設定した誘導力場の勾配ベクトルを誘導力として活用することにより、作業者の肉体的負担が軽減されることを実験的に確認した [41]。

一方で、人工ポテンシャル法においてはロボットが進行する方向を得るにはポテンシャルの勾配を得ることで可能となるが、目標位置に至る軌道を得たい場合には、この勾配に基づいて逐次計算を行う必要がある。PAS においては、目標位置にロボットを到達させることも重要であるが、これらに加えて目標位置に置かれた作業対象物（ワーク）を扱うこと自体が目的となるケースがほとんどである。この場合、操作対象物には把持しやすい方向やハンドリングすべき方向が定義できる（ロボットハンドの幅の制約や操作作用の取っ手があるなど）場合もあると考える。PAS の実利用を想定した場合には、ワークへの到達のみならず、その後の操作についても考慮することができると操作者の負担軽減に寄与するという仮説から、操作対象物に対してアプローチすべき方向を定めた上で作業経路を予め計画することとした。

本研究においては手先誘導を行うにあたり、まず対象物に対してどちらから接近すべきかを示す操作方向ベクトルを定義する。操作方向ベクトルに対して滑らかに接続するように、作業経路を予め計画した上で、この経路を進むにあたって最低限必要となる誘導力を生成する。目標位置までの間に誘導力を用いた手先誘導を行うことにより、操作者の肉体的な負担軽減を図る。誘導力場を時間の関数として設計することで、スキルアシストの考え方を踏襲し、操作者の動作を拘束することがないように設計した。操作者が誘導力場を不要とする場合には力場を抜ける、あるいはやり過ごすことができるよう、誘導力場の広がりに関する変更可能なパラメータを定義することで、必ずしも操作者の運動を拘束せず、技能を損なうことなく操作ができるようアシストすることとした [42]。

これらの手法により、操作者の意思を PAS に反映しやすくする点で操作者の技能を損なうことがないよう「随意性」を活かしながら、操作者が次の動作に遷移しやすい誘導力を用いることで操作者のスキルアシストを行なう。加えて、PAS の「他律性」としてワークの姿勢を考慮した軌道生成を活用したパワーアシストを行なうことにより操作者の肉体的・精神的な負担軽減と安全性設計を備えた PAS を設計することを目的とする。

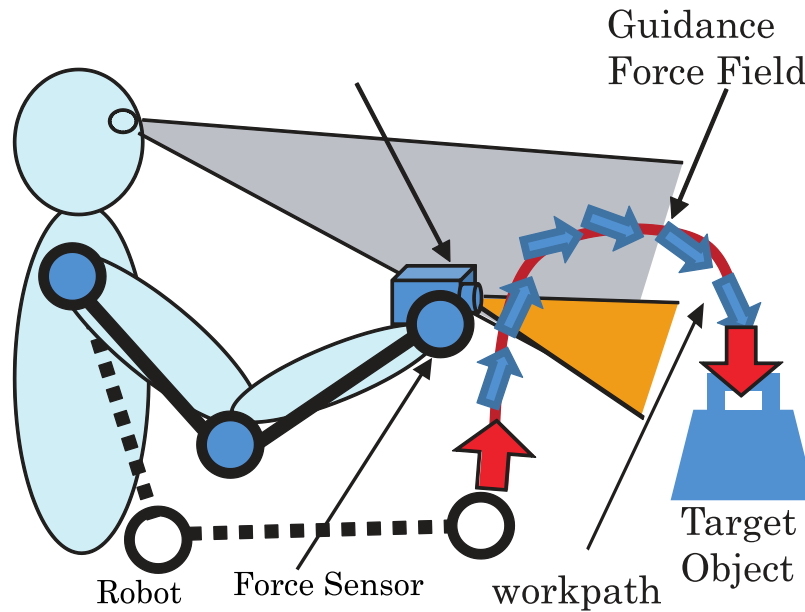


図 1.1: Overview of PAS with visual sensors

1.3 PASのシステム構成

本研究で提案する PAS の概要について図 1.1 に示す。

操作者はマニピュレータの先端に取り付けられた力センサにより PAS の操作を行なう。PAS には視覚センサなどを備えることにより、対象物の位置や形状に応じた軌道計画を行い、対象物に対して手先を誘導するために必要なアシストを行なうものである。

本研究では図 1.2 に示す一般的な産業用マニピュレータに対してインピーダンス制御を実装するのに加え、誘導力場による手先誘導を行った。使用するマニピュレータでは位置制御のみが可能なマニピュレータを用いる。手先における可搬重量は 12kg であり、操作者が本マニピュレータを用いる際の可搬重量もこれに準じる。

一般的な産業用ロボットでは位置制御が可能となっており、一般的な PAS で用いられる力制御を用いて実現する障壁が高い。そこで、一般的な位置による制御が可能なマニピュレータに対して、PAS としての機能を付加することを考慮した設計とすることで、一般的なロボットシステムに対する汎用性の向上を図った。

図 1.2 に示したマニピュレータ先端部の点 P には、図 1.3 に示す 6 軸フォース・トルクセンサ (ビー・エル・オートテック製) が実装されている。表 1.1 に 6 軸フォース・トルクセンサの諸元を示す。

フォース・トルクセンサは図 1.4 に示すようにハンドルを取り付けた状態で、PAS 先端に取り付けを行う。操作者はこのハンドルを握って PAS の操作を行う。

視覚を付加した PAS においては、センサを用いた対象物の位置計測、あるいは対象物の形状を測定することで対象物の位置や形状を取得する。これらを PAS の軌道生成に活

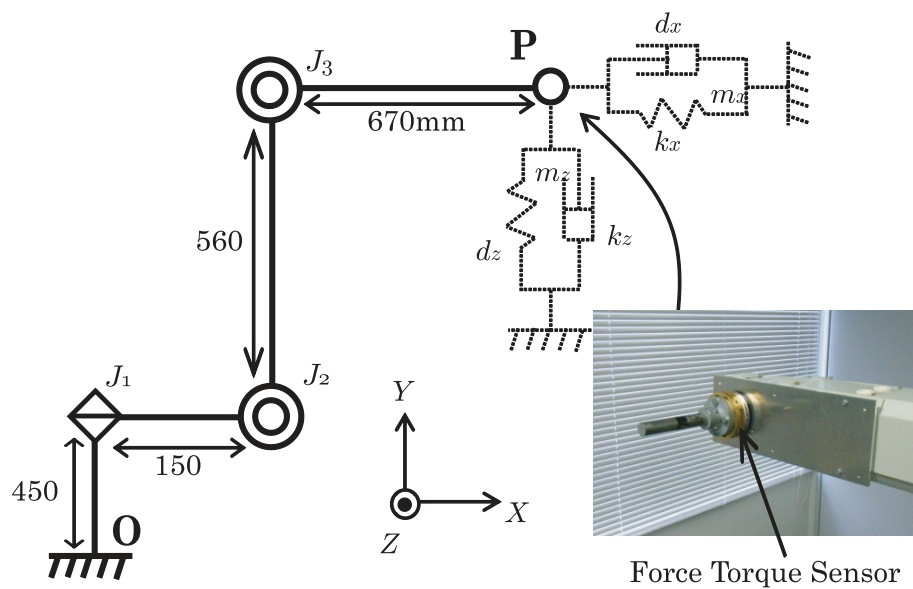


図 1.2: Experimental PAS feature



図 1.3: 6-axis force torque sensor



図 1.4: End effector of PAS

表 1.1: Specification of force sensor

Model	BL 0353 10/100
Load rating	100 N
Permission electrical overload	500% of a rated value
Accuracy	$\pm 1\%$
Response Time	Max 0.5 mSec
Output signal	Analog $\pm 5V$ Digital 12bit TTL

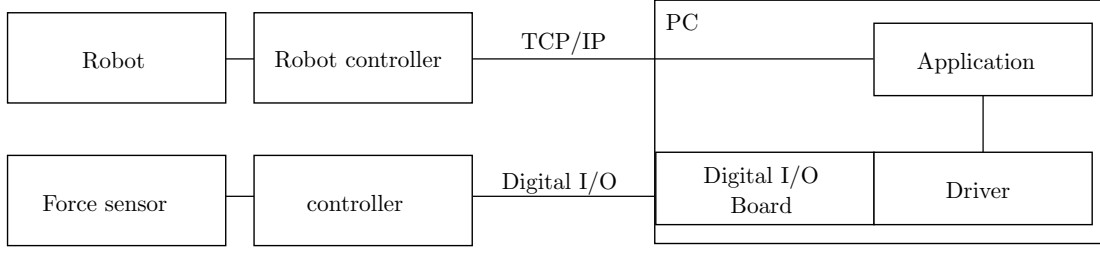


図 1.5: System Configuration

用することで、対象物の位置や形状に応じた予測軌道によって操作者目標位置に誘導し、操作者の繰り返し作業負担を軽減を図るものである。

なお、今回実験で用いるマニピュレータは産業用のマニピュレータであるため、ロボット稼働領域と作業者が作業する領域が重なることがないように、XY 矢状面上のみを動くように下記の対策を行っている。

- ソフトウェア的に図 1.2 に示す J_1 関節の可動角度を 0 度とした
- ハードウェア的に図 1.2 に示す J_1 関節角度を制限した（軌道上にボルトを打って物理的に制限した）

システム構成について図 1.5 に示す。センサ類については、一般的な PC 上で稼働するアプリケーションでセンシングを行なうとともに、PAS としてのマニピュレータ制御についてもアプリケーション上で実装する。

1.4 PAS のシステム設計

本研究では前節で挙げた位置制御が可能であるマニピュレータを PAS として利用する。前節で述べたシステム構成の通り、操作者はロボットの手先に装備された力センサを握ってロボットの手先を誘導する。以下にその制御方案について述べる。

本研究で扱う PAS においてはセンサに加えられた操作力 $\mathbf{F}_h = (F_{hx}, F_{hy}, F_{hz})^T$ と誘導力 $\mathbf{F}_g = (F_{gx}, F_{gy}, F_{gz})^T$ を入力として、手先に仮想的な慣性、粘性、剛性を設定することでインピーダンス制御を実現した。式 (1.1) に運動方程式を示す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}\mathbf{r} = \alpha(\mathbf{F}_h + \mathbf{F}_g) \quad (1.1)$$

式 (1.1) において、 α はアシスト比であり、 $\mathbf{M}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{K}$ は図 1.2 に示す手先に加わる仮想的な慣性、粘性、剛性である。ここではそれぞれ $\mathbf{M} = \text{diag}(m_x, m_y, m_z)$, $\mathbf{D} = \text{diag}(d_x, d_y, d_z)$, $\mathbf{K} = \text{diag}(k_x, k_y, k_z)$ と定義する。これらの係数を用いてインピーダンス制御を実現するために、式 (1.1) と式 (1.2) から実験的に $(m_x, m_y, m_z) = (1, 1, 1)$, $\omega_n = 0.25$, $\zeta = 0.5$ として各パラメータを定めた [41]。

$$\begin{aligned}
 \ddot{\mathbf{r}}_x + 2\zeta\omega_n\dot{\mathbf{r}}_x + \omega_n^2\mathbf{r}_x &= \frac{1}{m_x}(\mathbf{F}_{hx} + \mathbf{F}_{gx}) \\
 \ddot{\mathbf{r}}_y + 2\zeta\omega_n\dot{\mathbf{r}}_y + \omega_n^2\mathbf{r}_y &= \frac{1}{m_y}(\mathbf{F}_{hy} + \mathbf{F}_{gy}) \\
 \ddot{\mathbf{r}}_z + 2\zeta\omega_n\dot{\mathbf{r}}_z + \omega_n^2\mathbf{r}_z &= \frac{1}{m_z}(\mathbf{F}_{hz} + \mathbf{F}_{gz})
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

ただし、各軸成分の固有各周波数 ω_n および減衰比 ζ は式 (1.3) に示すとおりである。

$$\begin{aligned}
 \omega_n &= \sqrt{\frac{k_x}{m_x}} = \sqrt{\frac{k_y}{m_y}} = \sqrt{\frac{k_z}{m_z}} \\
 \zeta &= \frac{d_x}{2\sqrt{k_x m_x}} = \frac{d_y}{2\sqrt{k_y m_y}} = \frac{d_z}{2\sqrt{k_z m_z}}
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

式 (1.1) における $\mathbf{F}_g$ は本研究で設計に関して提案する広がりをもった誘導力場である。予測した作業軌道と実際の作業軌道に乖離が生じた場合にも操作力の低減に寄与するように設計したもので、次章以降でその設計に関して述べる。

1.5 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

- 第1章では、研究の背景を述べるとともに従来研究の紹介と本論文の目的、ならびに PAS のシステム構成について述べた。
- 第2章では、作業経路上で手先誘導を行なうための誘導力場の設計について述べる。
- 第3章では、設計した誘導力場の評価を行うにあたって、その有用性を評価するための操作性評価値の定義を行い、操作性評価実験を行なう。
- 第4章では、誘導力場を生成するために決める必要のあるパラメータである、力場の広がりに関するパラメータについてその最適化を行なう方法について述べる。
- 第5章では、本研究の結論と今後の課題について述べる。

第2章 作業経路上で手先誘導を行う誘導力場

2.1 誘導力場を用いた手先誘導

本研究では、誘導力場を用いて対象物位置に対して手先誘導を行う PAS を提案する。誘導力場の生成にあたっては、これに先立って予測軌道を決定する。予測軌道は、PAS が設計した対象物位置に至る作業軌道である。センサを用いて対象物の位置と形状を計測した上で、対象物位置に至る軌道を 3 次のエルミート曲線により決定する。この際に、対象物位置における接線ベクトルは操作方向性 (Approachability) に一致するものとする。操作者が、この予測軌道上で作業を行う場合、最も操作力が少なくなるように誘導力場を生成し、操作者の手先の誘導を行う。

本研究で提案する誘導力場は、以下の手順により時間的に変化する力場として定義される。

- 操作方向性を終点における接線とする予測軌道の決定
- 作業開始から終了時間の決定
- 予測軌道上への誘導力の定義

まずは、操作方向性を終点における接線とする予測軌道の決定を行う。操作方向性は次節で述べる対象物に接近すべき方向を定義したベクトルで、終点における予測軌道の接線ベクトルとして定義する。作業開始点である始点と、ワーク位置である終点を結ぶエルミート曲線を PAS の予測する作業軌道として決定する。

次に、予測軌道上で作業するにあたって、始点から終点に至るまでの作業時間を定義する。作業軌道と対象物までの到達時間を決めることによって、到達運動の計算論的なモデル生成をおこなうことで、軌道上の任意の位置、ならびに任意の時間における手先速度が決まる。この作業軌道上で任意の手先速度を実現するため、最低限必要となる誘導力を定義することで、作業の手先誘導を行う誘導力場の生成を行う。

2.2 操作方向性

操作方向性 (Approachability) は対象物に接近すべき方向を定義したベクトルである。操作を行いたい対象物 (ワーク) に対し、把持しやすい等の理由で接近すべき方向を定義するために利用する。対象物により個別に定義することが好ましく、実用的には対象物の位置や形状を計測可能である、PAS における視覚に相当するセンサを利用して取得することを想定したものである。操作対象物であるワークに対する、マニピュレータの姿勢やハンドの自由度を考慮した Approachability の定義方法について、その一例を図 2.1 に示す。

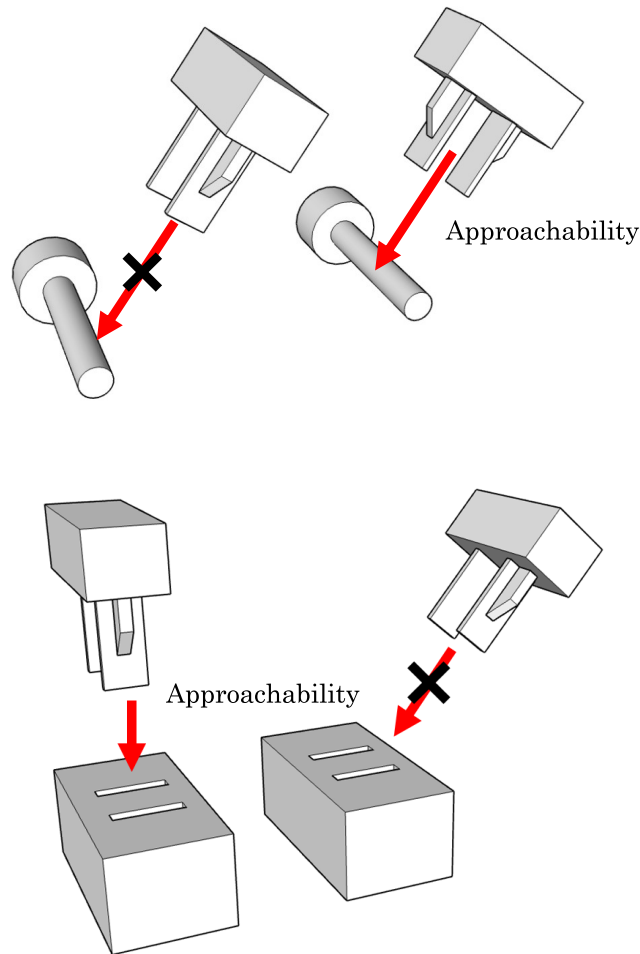


図 2.1: Concept of Approachability

本研究においては、誘導力場をPASが予想する予測軌道に沿って生成する。この際に、予測軌道上の終点である目的位置（ワーク位置）における接線ベクトルが Approachability になるよう定義を行う。

さらに、人間がPASの近くで操作を行い、その作業者が感じる操作性を改善する目的から決定した経路上において人間の動作に合った操作モデルを作成する。経路上での操作モデルを作成し、本システムに搭載された手先インピーダンスモデルから操作力モデルを得る。これにより操作経路と操作力を決定できることから、経路上でその操作力を実現できる誘導力場を生成し操作性の向上を図る。

本研究においては Approachability はPASに装着された視覚によって得られた対象物の形状によってロボットが到達可能である、あるいは把持しやすいなどの目的に合致するものを生成することを想定している。ただし、本紙において Approachability は視覚センサから得られたものとして、対象物に対して任意のベクトルを与えた上で検証を行なうものとする。

2.3 操作方向性を考慮した手先軌道計画

本節では予測軌道 $\mathbf{r}(u(t))$ について述べる. 平面における予測軌道 $\mathbf{r}(u(t))$ を3次の曲線として定義する. $0 < u(t) < 1$ とすると, 始点 $\mathbf{P}_s = \mathbf{r}(u(0))$, 終点 $\mathbf{P}_f = \mathbf{r}(u(1))$ であるため

$$\begin{aligned}\mathbf{r}(u(t)) &= au^3 + bu^2 + cu + d \\ \mathbf{r}(u(0)) &= \mathbf{P}_s = a \\ \mathbf{r}(u(1)) &= \mathbf{P}_f = a + b + c + d\end{aligned}\tag{2.1}$$

また, 始点ベクトル $\mathbf{V}$ は $\mathbf{r}(u(0))$, 操作方向ベクトル $\mathbf{A}$ は $\mathbf{r}(u(0))$ ならびに $\mathbf{r}(u(1))$ における $\mathbf{r}(u(t))$ の接線であるため

$$\begin{aligned}\mathbf{r}'(u(t)) &= 3au^2 + 2bu + c \\ \mathbf{r}'(u(0)) &= \mathbf{V} = c \\ \mathbf{r}'(u(1)) &= \mathbf{A} = 3a + 2b + c\end{aligned}\tag{2.2}$$

式 (2.1) および式 (2.2) から a, b, c, d を消去して $\mathbf{r}(u(t))$ を求める.

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_w(u) &= (2u^3 - 3u^2 + 1)\mathbf{P}_s + (u^3 - 2u^2 + u)\mathbf{V} \\ &\quad + (-2u^3 + 3u^2)\mathbf{P}_f + (u^3 - u^2)\mathbf{A}\end{aligned}\tag{2.3}$$

以上により, 任意の始点, 終点である $\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_f$ に至る軌道を, 任意の始点ベクトル $\mathbf{V}$ と操作方向ベクトル $\mathbf{A}$ を決めることにより軌道 $\mathbf{r}_w(u)$ が得られる. 次節以降で述べる操作モデルでは, $\mathbf{r}_w(u)$ の軌道上に操作モデルを当てはめることによって, 操作者の手先軌道がいつどこにいるかを推定する予測軌道を定義する.

2.4 手先軌道と操作モデル

2.4.1 手先軌道

手先軌道は, 作業を始める始点と対象物位置である終点の間を補完するよう, 操作方向ベクトルと始点ベクトルを用いて3次のエルミート曲線として設計した. 手先軌道として定義する3次のエルミート曲線において, 0 から 1 の値をとるパラメータ u を用いて作業軌道を定義すると以下の式 (2.4) となる. ただし, 式 (2.4) において, $\mathbf{P}_s$ は初期位置座標, $\mathbf{P}_f$ は終点位置座標, $\mathbf{V}$ は始点ベクトル, $\mathbf{A}$ は操作方向ベクトルを示し, 式 (2.5) の制約において決定したものである. 操作方向ベクトル $\mathbf{A}$ は終点位置座標 $\mathbf{P}_f$ における接線ベクトルである.

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_w(u) &= (2u^3 - 3u^2 + 1)\mathbf{P}_s + (u^3 - 2u^2 + u)\mathbf{V} \\ &\quad + (-2u^3 + 3u^2)\mathbf{P}_f + (u^3 - u^2)\mathbf{A}\end{aligned}\tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}_w(0) &= \mathbf{P}_s \\
 \mathbf{r}_w(1) &= \mathbf{P}_f \\
 \frac{d}{du}\mathbf{r}_w(0) &= \mathbf{V} \\
 \frac{d}{du}\mathbf{r}_w(1) &= \mathbf{A}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

2.4.2 操作モデル

本節では、前節の式 (2.4) に示した軌道上における操作モデルを作成する。操作モデルは手先軌道上の任意の時間における手先の速度を決める関数である。

本研究において提案する PAS では、操作者は PAS 先端に取り付けられたグリップを用いて PAS を操作する。そのため手先速度を得るための操作モデルについては人間機械系の協調を考慮して、人間が手先を目標の位置にもっていく際の到達運動を考慮する。到達運動においては、ヒトの運動計測について人間の矢状面における肩と肘の二関節運動をモデルとして様々な調査がなされた。運動を開始する始点から終点に至る軌道がほぼ直線の場合には、手先速度はベル型の曲線になる（運動開始後に滑らかに増加し、作業時間の半分程度で最大速度をとり、その後滑らかに現象する推移をする）ことが知られている [43]。この到達運動の特徴を再現するにあたり、評価関数モデルとして躍度最小、トルク最小とするもの、筋張力変化最小など様々なものが存在するが、本研究においてはこの中でも運動の滑らかさを要求した評価関数である、躍度最小モデル [44, 45, 46] を採用することとした。

提案する PAS で利用する操作モデルについては、予測する軌道上においての人間機械系の協調動作の際にしばしば導入される躍度最小モデルを利用することに加え、パラメータ u を時間の関数として代入する事で定義する。作業開始時刻 $t = 0$ および作業終了時刻 $t = t_f$ における手先の速度と加速度、および操作力は 0 であることを考慮すると $\mathbf{r}(u(t))$ には式 (2.6) のような制約が存在する。

$$\dot{\mathbf{r}}(u(0)) = \dot{\mathbf{r}}(u(t_f)) = \ddot{\mathbf{r}}(u(0)) = \ddot{\mathbf{r}}(u(t_f)) = 0 \tag{2.6}$$

ここで $u(0) = 0, u(t_f) = 1$ をとるものとして、上記の $\mathbf{r}(u(t))$ の拘束を満たすためには式 (2.7) の条件を満たす必要がある。

$$\dot{u}(0) = \dot{u}(t_f) = \ddot{u}(0) = \ddot{u}(t_f) = 0 \tag{2.7}$$

これを満たす $u(t)$ は 0 から t_f の間で単調増加の関数となり、 $u(t)$ を式 (2.8) に示す 5 次関数のように定めて操作モデルとした。

$$u(t) = 6t^5 - 15t^4 + 10t^3 \tag{2.8}$$

上記の操作モデルは手先速度が緩やかに上昇し、最大値をとったのち緩やかに減少するベル型の速度をもつモデルを適用している。加減速が複数存在するような曲線を有する軌道における作業の場合など、作業モデルが操作者の戦略と合致しない場合に操作感が悪く

なることも予想される。後述する操作性評価実験においては直線的な軌道を用い、操作モデルが比較的合致する状況下において実験を行う。

2.5 予測軌道上に手先誘導を行う誘導力場

誘導力の大きさは、マニピュレータを予測軌道に沿って、所定の作業時間で目標位置まで動かした時に最低限必要となる力を設定するとともに、操作者の意思を反映しやすくなる観点から、作業軌道が予測軌道から離れるほど誘導力が小さくなる設計とした。

時刻 t において操作モデルが示す速度と加速度を実現するような誘導力 $\mathbf{F}_g(t)$ を式 (2.9) のように設計した。

$$\mathbf{F}_g(t) = |\mathbf{F}_m(t)| \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_w(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)|^2}{2\sigma^2}\right) \mathbf{d} \quad (2.9)$$

式 (2.9) において、誘導力場の強度 $\mathbf{F}_m(t)$ は、式 (2.10) に示すように予測軌道上を作業時間が t_f となるように移動した場合に必要な力を設定した。式 (2.9) における $\sigma(>0)$ は誘導力場の広がり、つまり誘導力が影響する範囲の大きさを定義するパラメータである。誘導力場の生成時に操作者の手先に作用する誘導力の広がり大きさをこのパラメータにより定義することができる設計とした。誘導力は予測軌道上を中心に σ で設定した広がりをもって生成される。 σ が大きい場合、操作者は PAS の予測軌道上から離れた際に、軌道方向に誘導する力をより多く受けられるため、作業中の操作力をより小さくすることができる。一方で σ が小さい場合には、予測軌道上から離れた際に誘導力場から受ける力は小さくなり、操作者の意図をより反映した作業を行うことができる。

誘導力場は時間の関数であるため、力場の中心が予測軌道に沿って進むこととなるが、操作者が誘導力を不要とするような場合には進行する誘導力をやり過ごす、あるいは前述の σ で定義された広がりをもつ力場から抜けることで、操作者の動作を拘束することがなく、次の動作への遷移が容易になるような設計とした。後述する誘導力場の操作性評価実験では、 σ の値を適切に調整することで複数の σ の値を採用して操作性について評価実験を行い、 σ の設定方法についても考察を行う。

$$\mathbf{F}_m(t) = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}_w(t + \Delta t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{r}}_w(t + \Delta t) + \mathbf{K}\mathbf{r}_w(t + \Delta t) \quad (2.10)$$

ただし、各ベクトルは図 2.2 で示したような関係となり、 $\mathbf{F}_g$ の向き $\mathbf{d}$ は式 (2.11) のように設定される。

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{r}_w(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{|\mathbf{r}_w(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)|} \quad (2.11)$$

式 (2.10) に示した誘導力の定義では、操作力 $\mathbf{F}_h = 0$ の場合においても、予測軌道に基づいて誘導力が発生する。操作力が無いにも関わらず PAS が動作することがないように、操作力 $\mathbf{F}_h > 0$ の場合にのみ PAS として動作するように実装を行うことが必要である。実際の実装では、操作力のノルムが数 N 以下の場合には PAS を動作させないよう設定を行っている。

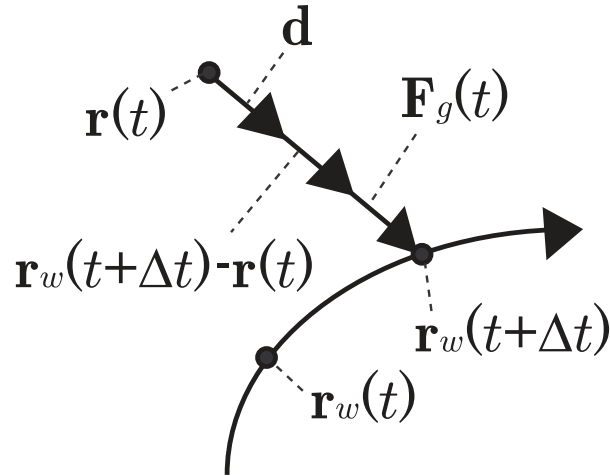


図 2.2: Direction of Guidance Force d

予測軌道である $r_w(t)$ と実際の手先位置 $r(t)$ の乖離が大きくなることが予想される状況について以下に列挙する.

- 軌道上に障害物が存在するため、操作者が回避を要する場合（PAS の予測軌道が障害物を回避する軌道となっていなかった場合）
- PAS の予測軌道と操作者の意思が大きく乖離した場合
- 操作者が何らかの事情で操作を行わなかった場合

式 (2.10) に示した誘導力の設計においては、上記のような状況において誘導力が小さくなるような設計としたため、PAS に対して操作者の意思を反映し易い設計とした。これによって、予測軌道と操作者の戦略に差異がある、あるいは異なった状況においても操作性を損なうことがないことを期待した設計となっている。

式 (2.10) に示した誘導力場について、作業時間 $t_f = 1.4[s]$ と設定した場合の誘導力の方向について図 2.3 に示す。

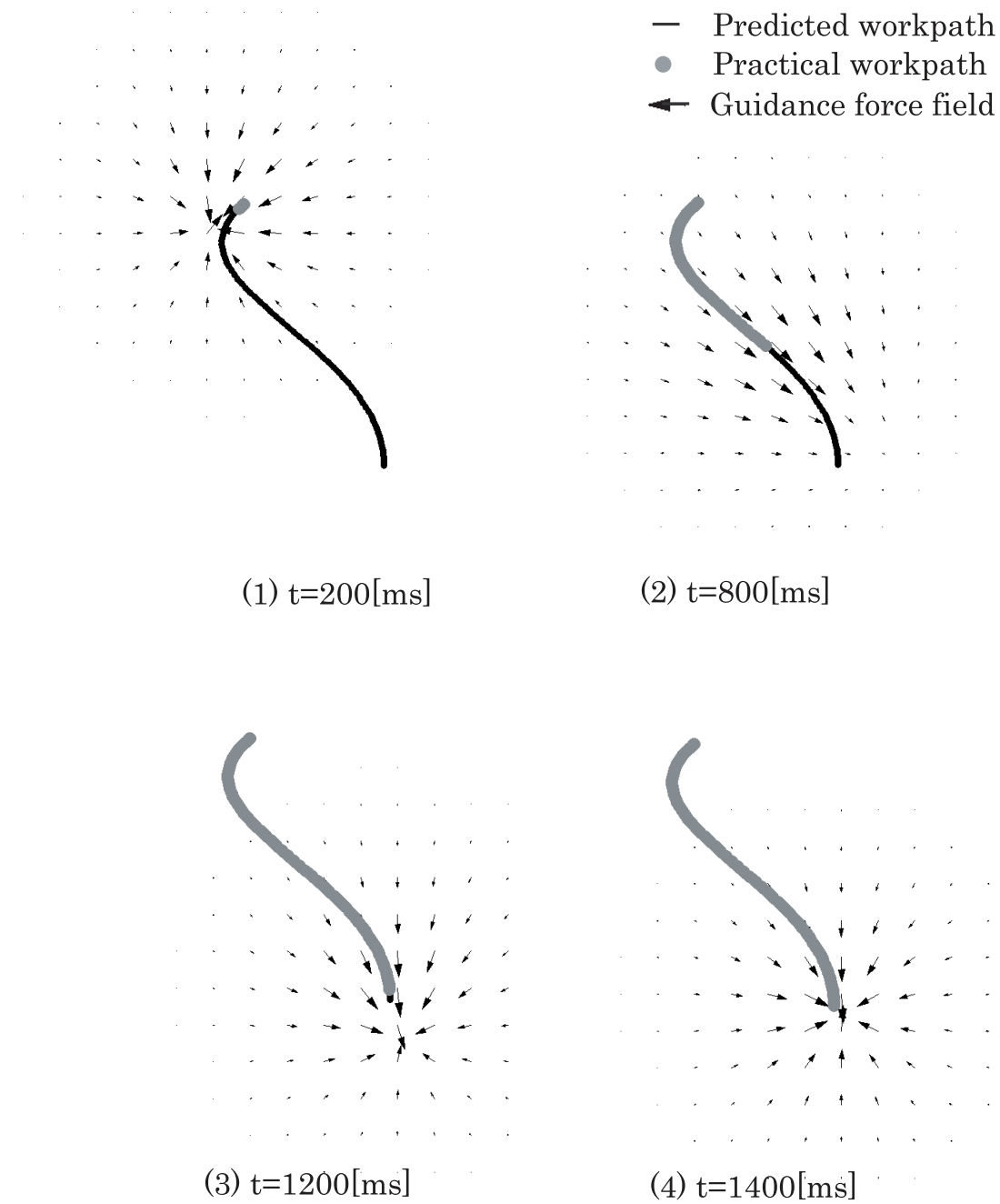


図 2.3: Guidance force field $\mathbf{F}_g$

第3章 誘導力場による手先誘導効果の検証

3.1 操作性評価値

本章では、定義した誘導力場に対して操作性評価実験を行う。実験結果から誘導力場の操作性評価を行う評価値の定義と、最適な誘導力場の広がりやを推定する方法について述べる。

本節では、式 (2.9) で定義した誘導力場 $\mathbf{F}_g(t)$ を適用した際に操作性評価を行うための評価値を定義する。従来の PAS として利用した場合に比べて誘導力場の生成機能を備える PAS を利用した場合に操作力がどれだけ減少したかを評価するため、次の式 (3.1) に示す J を操作性評価値として用いた。

$$J = \frac{1}{2}J_f + \frac{1}{2}J_g \quad (3.1)$$

式 (3.1) における評価値 J はその値が大きいほど操作性が高いものと定義する。誘導力場の評価に際して、評価 J は誘導力によって操作力が減少した点に関する評価に加え、誘導力と操作力の方向についても評価を行うため、2つの指標の和として定義することとした。式 (3.1) における J_f は操作力に関する評価値、 J_g は誘導力の方向に関する評価値としてそれぞれ次式のように定めた。

$$J_f = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \|\mathbf{F}_{hi}\|}{\frac{1}{m} \sum_{j=0}^m \|\mathbf{F}_{h0j}\|} \quad (3.2)$$

ただし、 $\mathbf{F}_{hi}$ は誘導力場がある場合の操作力のサンプリング値、 $\mathbf{F}_{h0j}$ は誘導力場がない場合の操作力サンプリング値、 n は誘導力場が存在する場合における操作力のサンプリング数、 m は誘導力場がない場合の操作力のサンプリング数である。

$$J_g = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n a_i \quad (3.3)$$

ここで、式 (3.3) における a_i は式 (3.4) に示す値を取るものとする。

$$a_i = \begin{cases} 1 & ((\mathbf{F}_h \cdot \mathbf{F}_g)_i \geq 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (3.4)$$

J_f は誘導力場による操作力の軽減を評価する指標、 J_g は誘導力による予測軌道上への誘導効果について評価する指標として定義した。 J_f は誘導力がない場合の操作力を基準として、誘導力により操作力が低減した際には最大値を 1 として値が大きくなり、悪化し

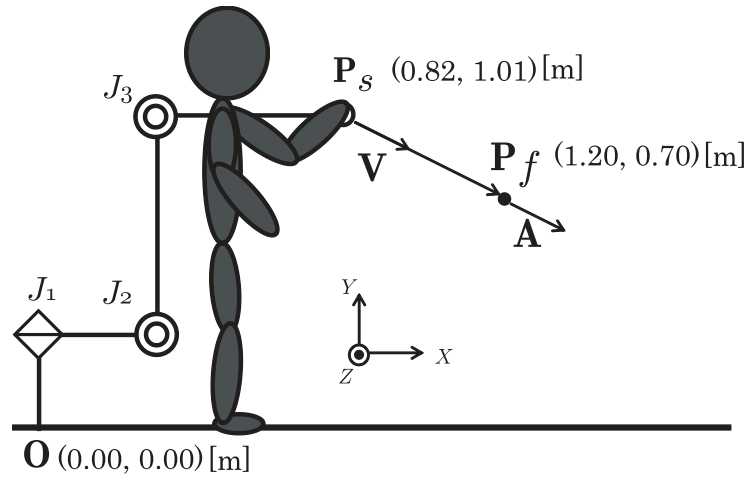


図 3.1: Trajectory Planning

た場合は 1 以下あるいは負の値を取る．評価値 J_g については，操作力に寄与する誘導力の成分が存在したかの指標として内積を評価する．操作者が予測軌道と異なる軌道をとる場合，図 2.3 の $\mathbf{F}_g$ に示した通り，誘導力は作業空間内のいずれの位置においても予測軌道 $\mathbf{r}_w(t + \Delta t)$ 上に向かうよう生成される．操作者が誘導力を効果的に活用した場合，操作力と誘導力の方向は常に合致するため，作業時間のうち，操作者が発揮した操作力 $\mathbf{F}_h$ と $\mathbf{F}_g$ の内積が 0 以上である割合を評価する．実際の試行においては，実作業時間は t_f に厳密に一致せず，操作の加減速も PAS の操作モデルに一致しない．そのため， J_g では操作力と誘導力の大きさにより変化するノルムについては評価せず，その方向のみの平均を取る．評価値 J_g は，誘導力と操作力の方向が完全に一致していれば最大値の 1 を取り，操作力と誘導力が全く逆方向を向いていた場合には評価値は 0 を取る指標として定義した． J_f , J_g いずれもその値が大きいほど誘導力による手先誘導の効果が大きいものと定義した．

3.2 手先誘導効果評価実験

3.2.1 実験条件

本節では，誘導力場が操作者の負担軽減と操作性の向上に寄与することを確認する実験を行う．実験において操作者は図 3.1 に示すように，マニピュレータの手先に装備された力センサを握って対象物位置への到達運動を繰り返しを行い，誘導力場の広がりを設定するパラメータ σ を複数の値に設定することで，操作者に及ぼす誘導力を変えながら操作性の評価を行う．以下に実験条件を示す．

- ① 操作者はその矢状面をマニピュレータの XY 平面と平行になるように立ち，マニピュレータを XY 平面上で操作する．
- ② 操作者は直線として設定したマニピュレータ手先の予測軌道を把握しており，この軌道に沿って繰り返し作業する．

- ③ 作業軌道上において障害物は想定せず、回避動作などは行わない。
- ④ 誘導力場の広がり $\sigma = (0.001, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2)$ の6水準設定する。水準を変更する際に操作者にその旨を伝えずに実験を行った。
- ⑤ 1試行ごとに式(3.1), 式(3.2), 式(3.3)に示した操作性評価値 J_f , J_g を算出し、そこから J を算出した。
- ⑥ 開始位置は図3.1における $\mathbf{P}_s = (0.82, 1.01)[m]$, 目標位置は $\mathbf{P}_f = (1.20, 0.70)[m]$ とする。また $\mathbf{V} = \mathbf{A} = \mathbf{P}_f - \mathbf{P}_s$ とする。
- ⑦ 操作性評価値 J_f の分母は $\sigma = 0.001$ の時の操作力の平均値を利用する。
- ⑧ 手先位置が目標位置から 0.02m に到達した時点で目標位置に到達したものとして実験終了とする。
- ⑨ 30歳代男性2人および20歳代男性1人に対し、それぞれの水準の試行を5回ずつ実施した。
- ⑩ 基礎的な知見を得るために、式(1.1)におけるアシスト比 $\alpha = 1$ とした。
- ⑪ 予測軌道を定義するにあたり、作業時間は $t_f = 1.0[s]$ として設定した。

実験条件に示した誘導力場の広がり σ の水準については、式(2.9)に示した $\mathbf{F}_g(t)$ の定義から、0より大きい値を設定する必要があるため、下限値を限りなく小さな値である0.001に設定し、上限値については誘導力が人の運動に影響を与えることを評価するために、実験的に0.2として設定した。また、作業の開始位置と終了位置については、被験者である成人男性が無理なく、かつ肩の位置が変えずに目標位置に到達できる位置を設定した。

3.2.2 実験結果

前述の実験設定において、それぞれの水準について5回ずつ試行を行った。誘導力場の広がり σ に対するそれぞれの操作性評価値 J_f , J_g , J の推移をそれぞれの被験者ごとに図3.2, 図3.3, 図3.4, 図3.5に示す。

図3.2, 図3.3, 図3.4, 図3.5において評価値 J に着目すると、 J の値が正の値をとり、操作性を改善した水準が存在した。一方で、被験者1と2については、評価値 J が $\sigma = 0.2$ のとき負の値となったことから、この水準においては誘導力場は操作性をかえって悪化させたことがわかった。被験者3と4については、評価値 J はすべての水準において正の値となったため、誘導力場によって操作性が改善したことを実験的に確認した。評価値 J はすべての被験者において、 $\sigma = 0.05$ から $\sigma = 0.1$ の水準において最大値を取り、最大値を取った以降の水準では σ が大きくなるにつれて評価値 J が低下した。また、 $\sigma = 0.2$ の水準においては、すべての被験者においてその前の水準より操作性が悪化した。

操作力に関する評価値 J_f に着目すると、例えば被験者1,2,3については、 $\sigma = 0.2$ の場合に J_f が負の値となった。これは被験者が、 $\sigma = 0.2$ の水準において誘導力場が存在する状態で操作を行った際、誘導力のために本来発揮しなくても良かった操作力を必要とした

ことを示している。被験者4については、評価値 J_f に着目するといずれの水準においても評価値は正となり、誘導力場によって操作力が低減し、操作性が改善したという結果を得た。

評価値 J_g に着目すると、いずれの被験者においても最大値を取る J_g が存在した。 J_g は0に近い値を取るほど、操作力と誘導力の内積が0以下であることを示しており、誘導力が操作力の反対側に出ていた可能性が高いことがわかった。特に被験者4については、 $\sigma \leq 0.02$ において評価値 J_g が低調であり、操作力と誘導力が反対方向に向いていた時間が長かったことがわかった。

次に、誘導力場の広がり σ による試行中の手先軌道の変化について図 3.6 から図 3.9 に示す。予測軌道上への誘導効果についてはそれぞれの被験者ごとに誘導力場の広がりによる個人差があることがわかった。例えば被験者1では力場の広がり σ の下限値である図 3.6(a) に比べ、大きい場合である図 3.6(c) に手先軌道と予測軌道の乖離が大きくなった。一方で、被験者2では σ の下限値である図 3.7(a) では予測軌道から大きく逸れていた手先軌道が σ が大きくなるにつれて予測軌道上に誘導された結果を得た。

評価値 J の推移から、操作性が最も改善する σ は被験者ごとに異なるという結果を得たことから、被験者ごとに個別に設定することで操作性の改善を図ることができる見通しを得た。次節以降で考察を行う。

3.3 考察

前節では、誘導力場による操作性評価実験をおこなった。得られた実験結果から、誘導力場が操作性改善に寄与することを確認した。また、誘導力場の広がり σ を変更することによって、操作性評価値の大きさが異なることから、適切に設定することで操作性の改善を望めることを示した。本節では、誘導力場の広がり σ を操作者ごとに個別かつ適切に設定することで、より操作性が改善する誘導力場を生成するための考察を行う。

3.3.1 最適な誘導力場の広がり σ に対する考察

図 3.2 から図 3.5 における各操作性評価値の σ に対する推移から、操作力に関する指標 J_f については σ が大きくなるにつれて増加するとともに、一旦最大値を取ったのちに右肩下がりとなる傾向となった。操作者が誘導力場から受ける誘導力 $\mathbf{F}_g$ は式 (2.9) の定義より、誘導力場の広がり σ が大きくなるにつれて増加する設計としていた点を考慮すると、実験結果から特に被験者1と被験者2については被験者3と4に比べて $\sigma = 0.2$ の際の J_f の悪化が顕著であることから、誘導力によって操作者が余分に操作力を発揮しなければならなかったことが考察される。したがって、今回行った4被験者の同一軌道、同一作業という実験条件下における結果の傾向から察するに、誘導力場の大きさ σ については大きければ大きい方が良いわけではなく、適切な大きさに留めることによって、操作者が余分な操作力を発揮することなく操作性を向上できるものとする。被験者や試行ごとに誘導力場の大きさ σ を最適な値に設定する方法についても今後検討したい。

また、試行においては作業開始から加速を行ったのち減速に入り、目標位置に対して位置決め作業に遷移する。図 3.7 から図 3.9 において、被験者2, 3, 4の $\sigma = 0.2$ の手先軌

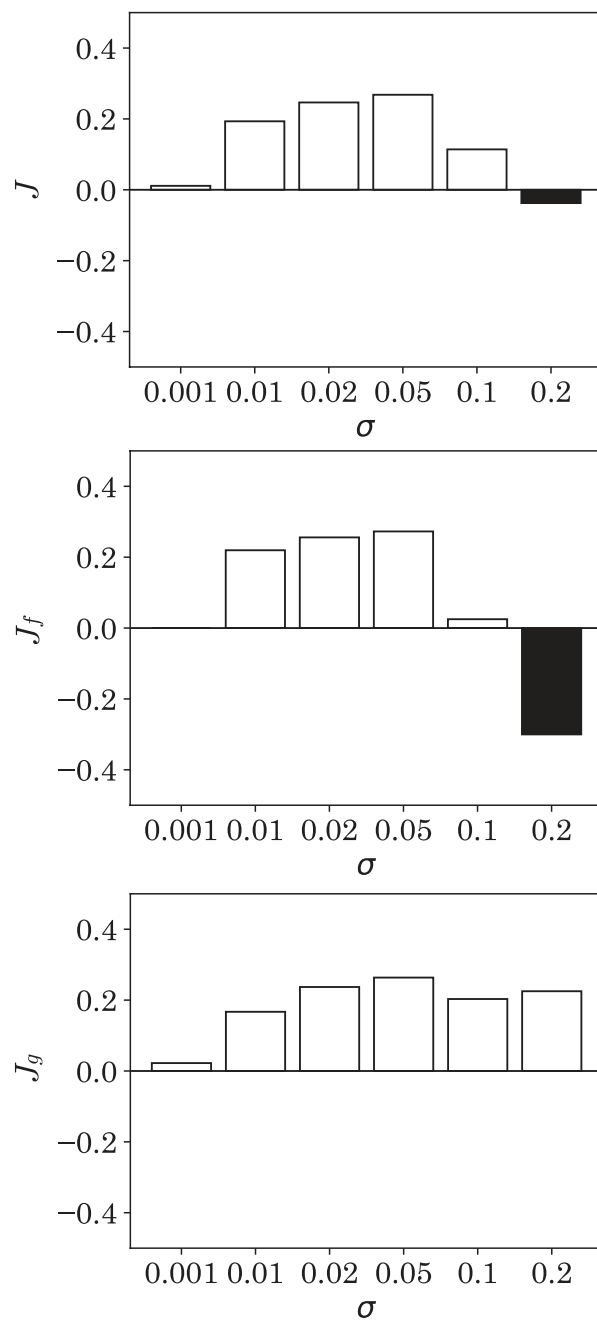


図 3.2: Result of experiment (Subject1)

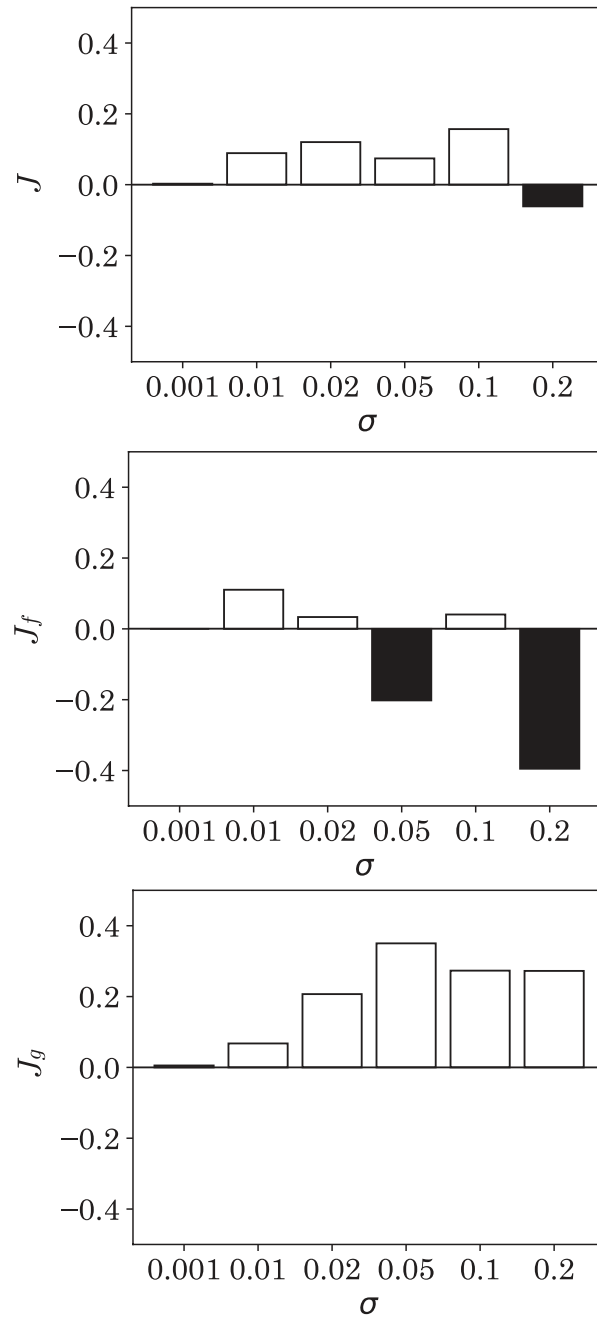


図 3.3: Result of experiment (Subject2)

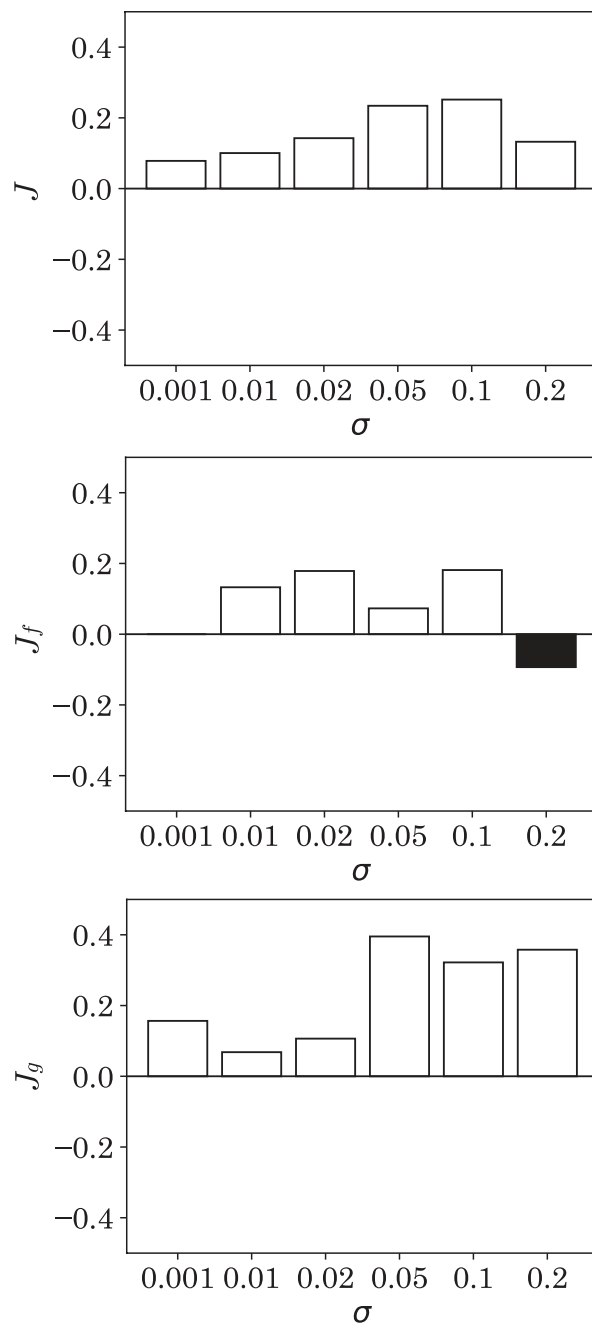


図 3.4: Result of experiment (Subject3)

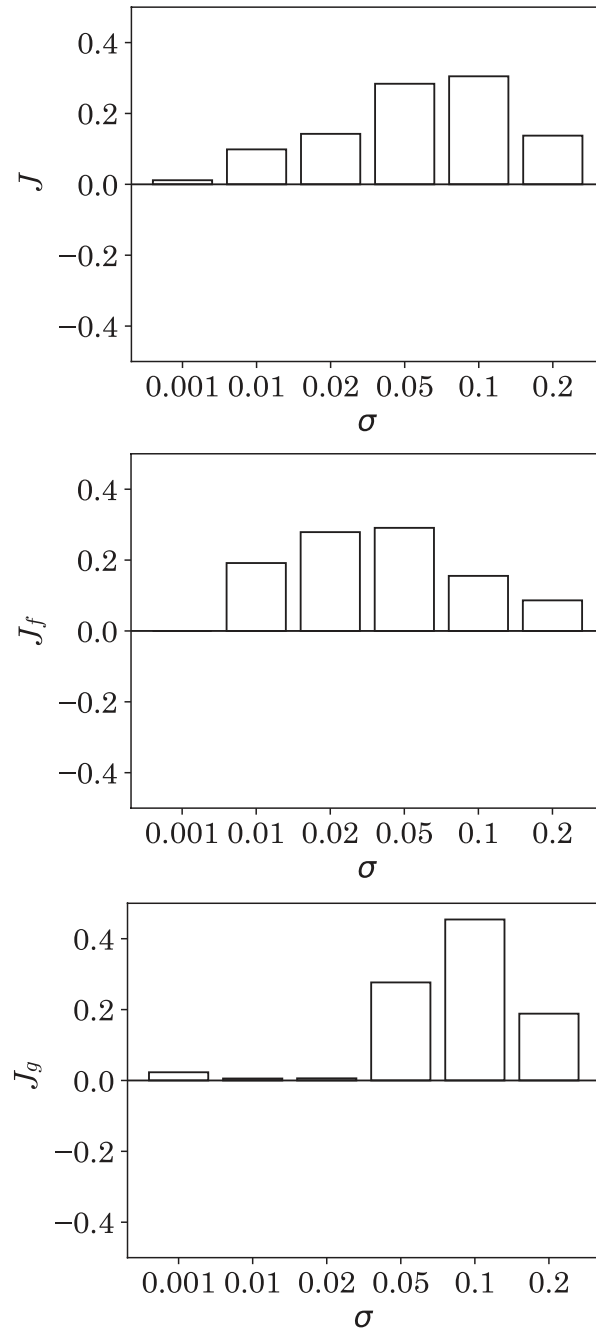


図 3.5: Result of experiment (Subject4)

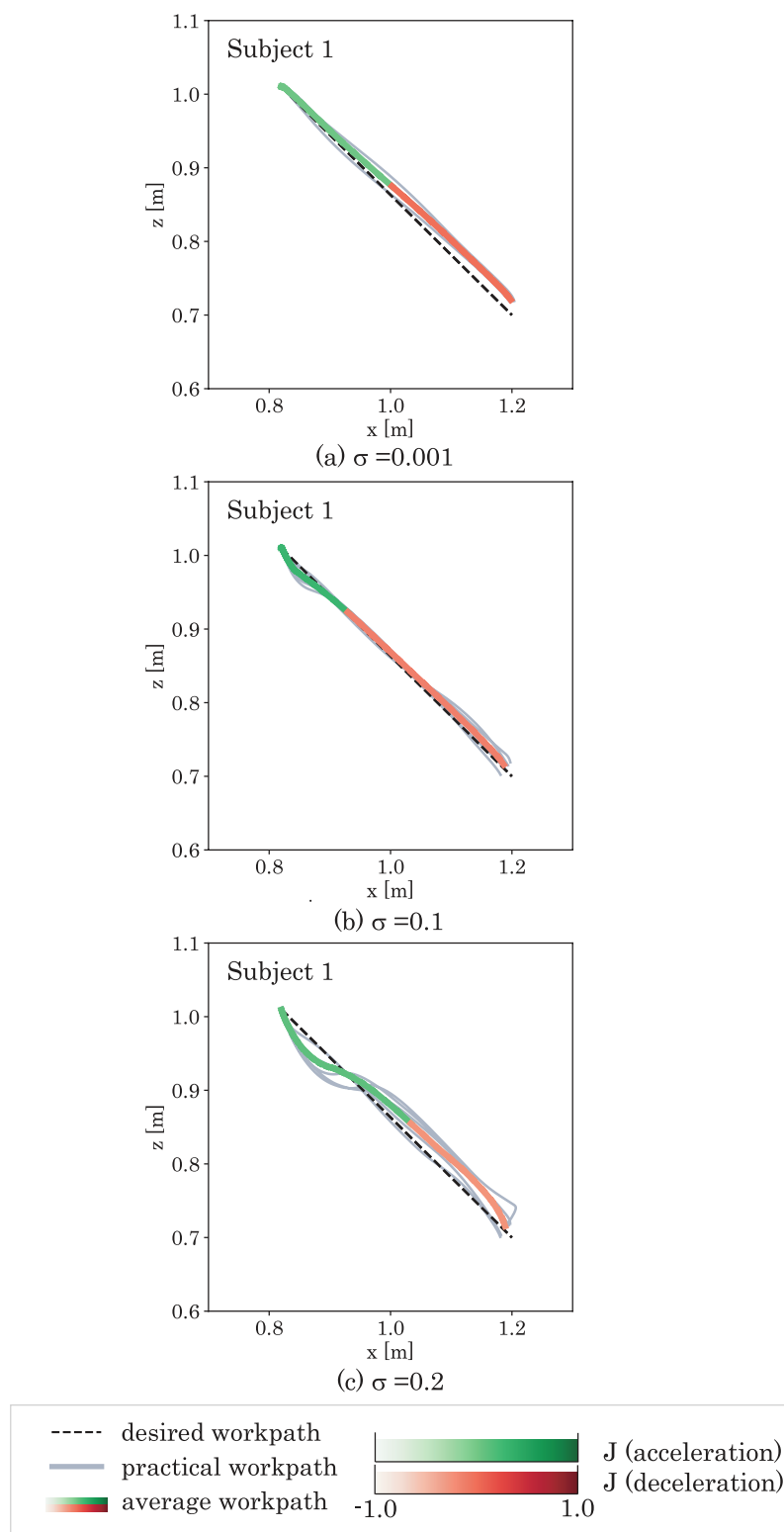


図 3.6: Sample of the practical workpath

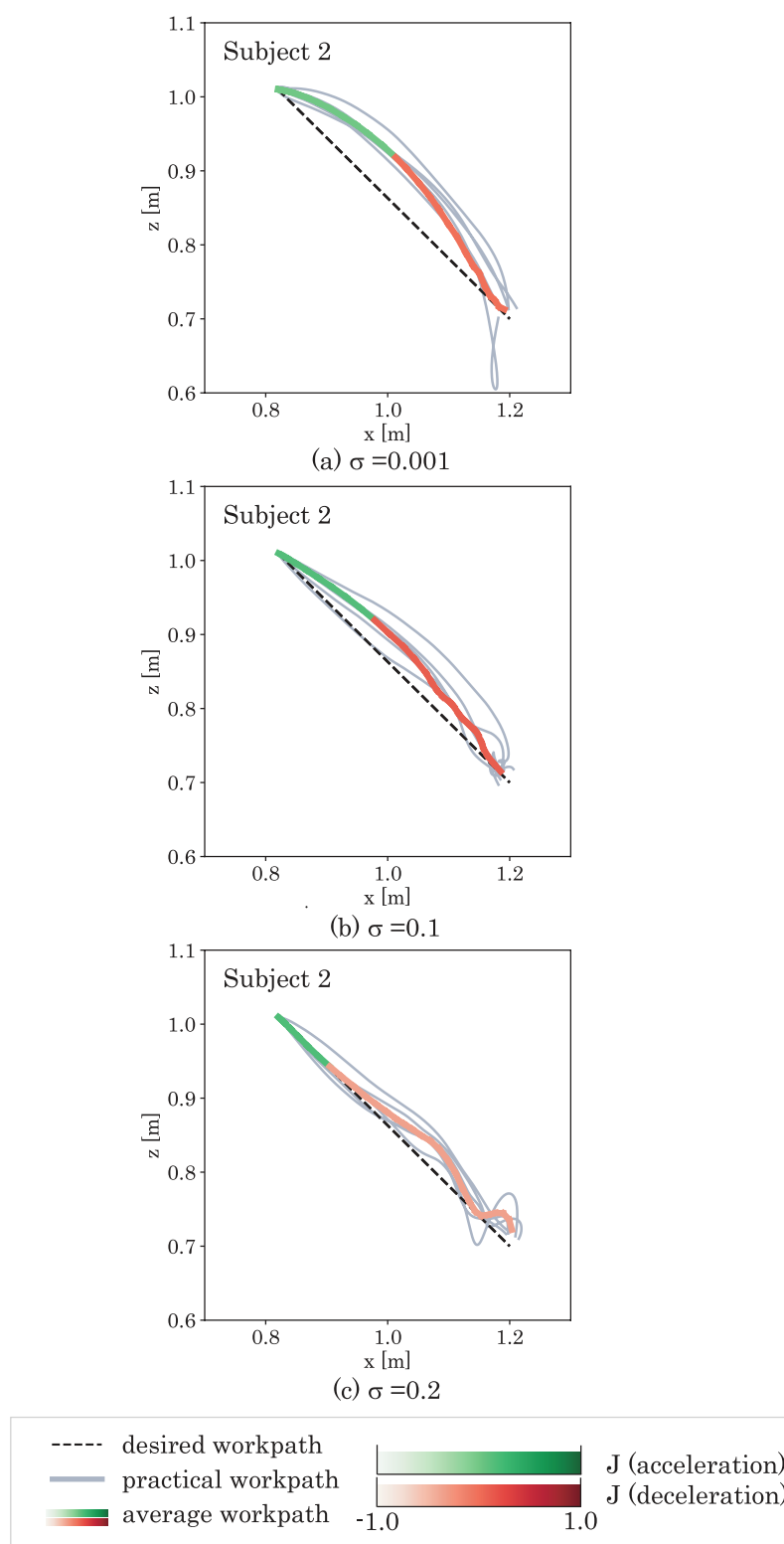


図 3.7: Sample of the practical workpath

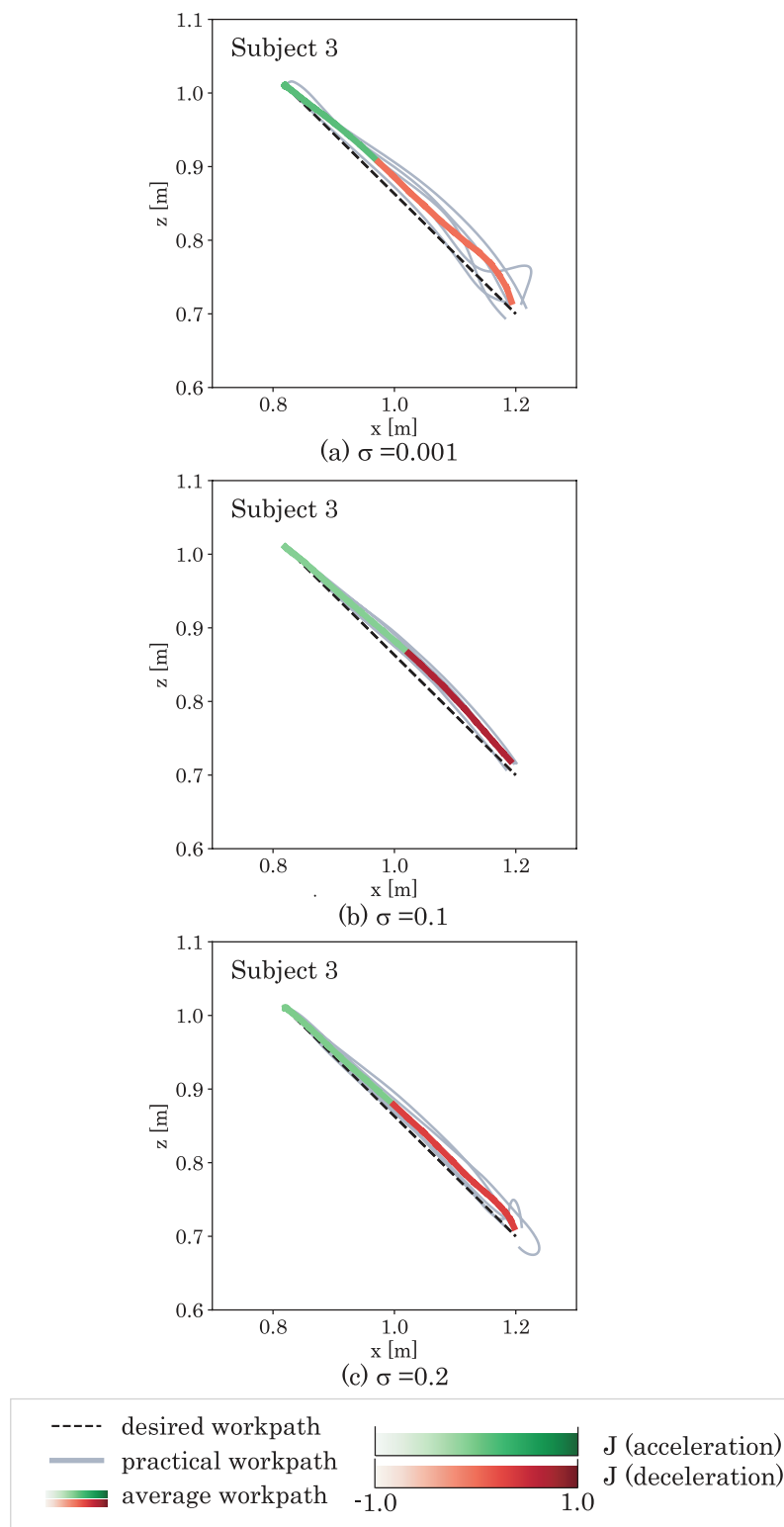


図 3.8: Sample of the practical workpath

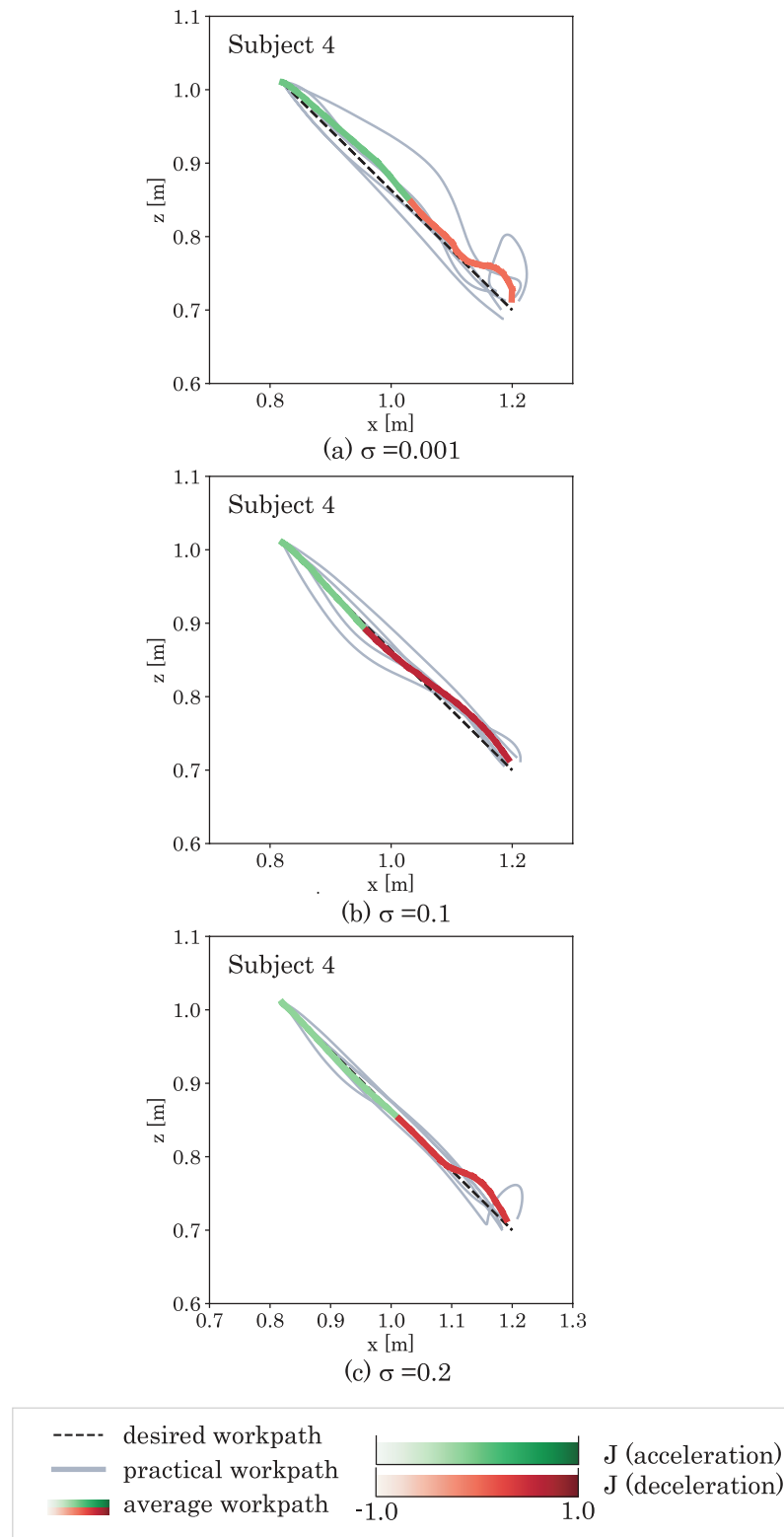


図 3.9: Sample of the practical workpath

道に着目すると、目標位置周辺で手先軌道が予測軌道から離れて振動的になった部分が存在する。この点については終端近くにおいて、位置決め作業に入る際に減速が早すぎたり位置決め到手間取ると、結果として余分な力を操作者が発揮することとなり評価値が悪化することも懸念されるところである。

そこで作業経路終端付近の位置決め操作における操作性評価値の悪化を検証するにあたり、減速を行なうタイミングに注目することとした。図 3.10 および図 3.11 にそれぞれの被験者について加速、減速の動作に分割して評価値を算出した結果を示す。

図 3.10 および図 3.11 において、操作性評価値 J に着目すると、加減速いずれの場合についても、誘導力場がある場合の操作に際して評価値が正となる σ が存在した。一方で負になる場合も存在し、この場合は誘導力場により操作性が悪化したことを示している。加速時について被験者ごとそれぞれの評価値に着目すると、被験者 1 については $\sigma = 0.2$ における加速時の評価値が著しく低下する結果を得るとともに、被験者 4 については評価値 J の値が $\sigma > 0.001$ の水準においてすべて負となり操作性が悪化した。さらに被験者 3,4 では評価値 J_f の値が $\sigma > 0.001$ の水準で負となったことから、加速時においては誘導力によって不要な操作力を発揮したことがわかる。

減速時に着目すると被験者 2 は σ が大きくなった場合についても J_g の値が他の被験者に比べて大きな値を取っており、誘導力場と操作力の方向が一致していることがわかった。被験者 4 については評価値 J_g の変化が σ に関わらずほぼ横ばいであり、操作者によって誘導力を有効に活用できるかは差が生じる結果となった。加速の際に操作性が悪化する原因としては、 σ が大きくより大きな誘導力を受ける場合、操作者の行動戦略に合わない大きな誘導力を受けることによって制動を行った可能性が考えられる。

被験者 1 に着目すると、 $\sigma = 0.1$ の場合の加速時に、操作力に関する指標 J_f が正の値を取って操作性が改善している一方で、減速時については J_f が負となり著しく操作性が悪化していた。被験者 2 については、減速時に全体的に J_f が悪化する傾向が得られたが、これは減速時に目標位置付近における最終的な位置決め動作に手間取り、操作力を発揮せざるを得なくなった可能性があるものと考察する。被験者 3、および被験者 4 については、操作性評価値 J に着目すると、加速時よりも減速時のほうが全体的に操作性が良い結果を得た。

以上の通り、誘導力場の広がり σ によって、評価値の傾向は被験者ごとに様々であった。本実験においては、それぞれの被験者が同一の軌道で同一の作業を実施した経緯から、操作者によって誘導力場を活用する戦略が異なったものと考察できる。これについては誘導力場の広がり σ を被験者ごとに設定を行うことによって更に操作性を向上させる余地があるものと考ええる。

被験者ごとに最適な σ を設定するための方案としては、作業を行うごとに σ の値を変更して評価値を推定し、評価値 $J(\sigma)$ が最も大きくなる σ を目的関数とすることで逐次推定を行うことにより実現できると考察するところである。

また、今回は被験者の間で概ね無理なく開始位置から終了位置まで到達できる時間である $t_f = 1.0$ を採用したが、例えばこの時間を短くした場合には加減速の傾斜が急峻になることが考えられ、操作者が肉体的に負担に感じる加速度を必要とする場合には操作性は悪化するものと推測する。一方で、 t_f を長くした場合についても、操作者が予測軌道 $\mathbf{r}_w(t)$ 追従することが難しくなるほど t_f を長く設定した場合、結果として操作者が予測軌道に

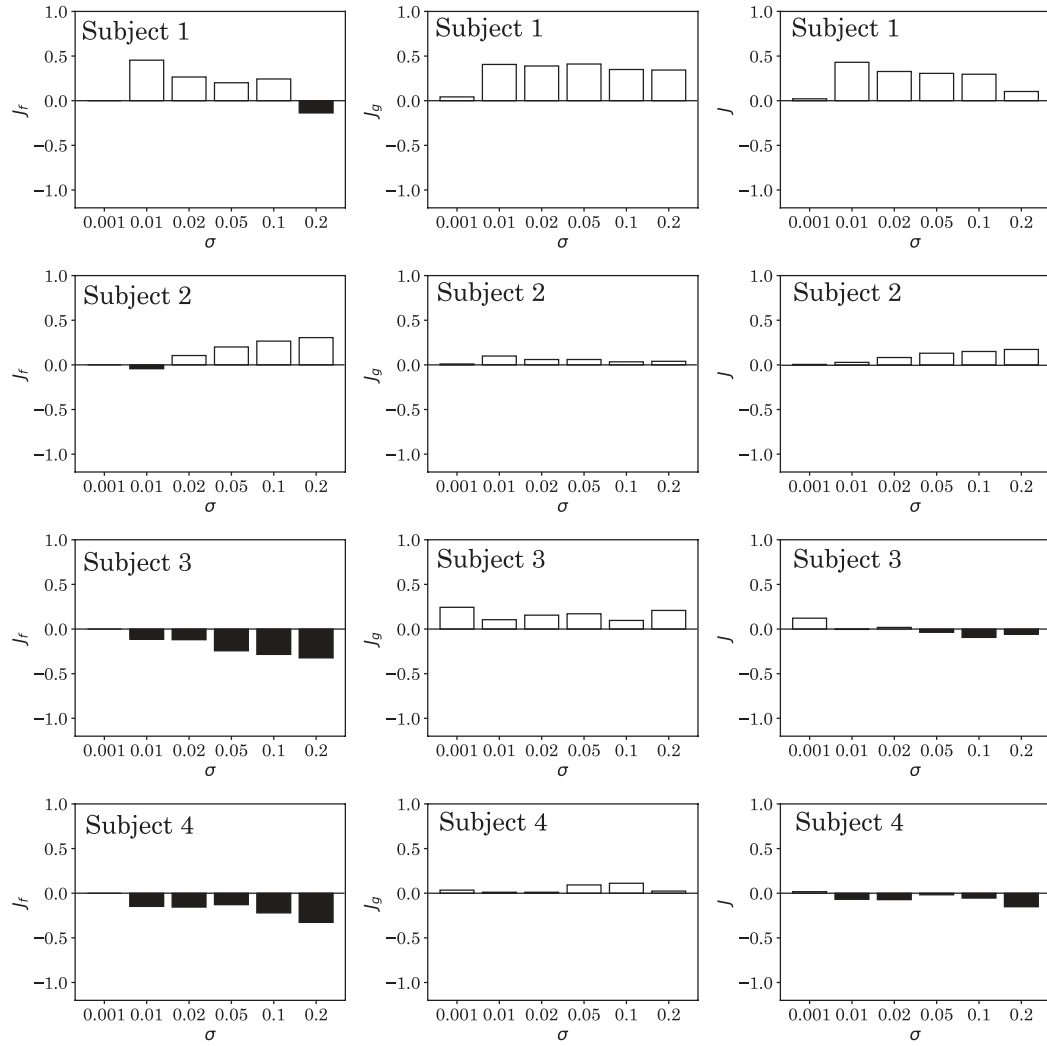
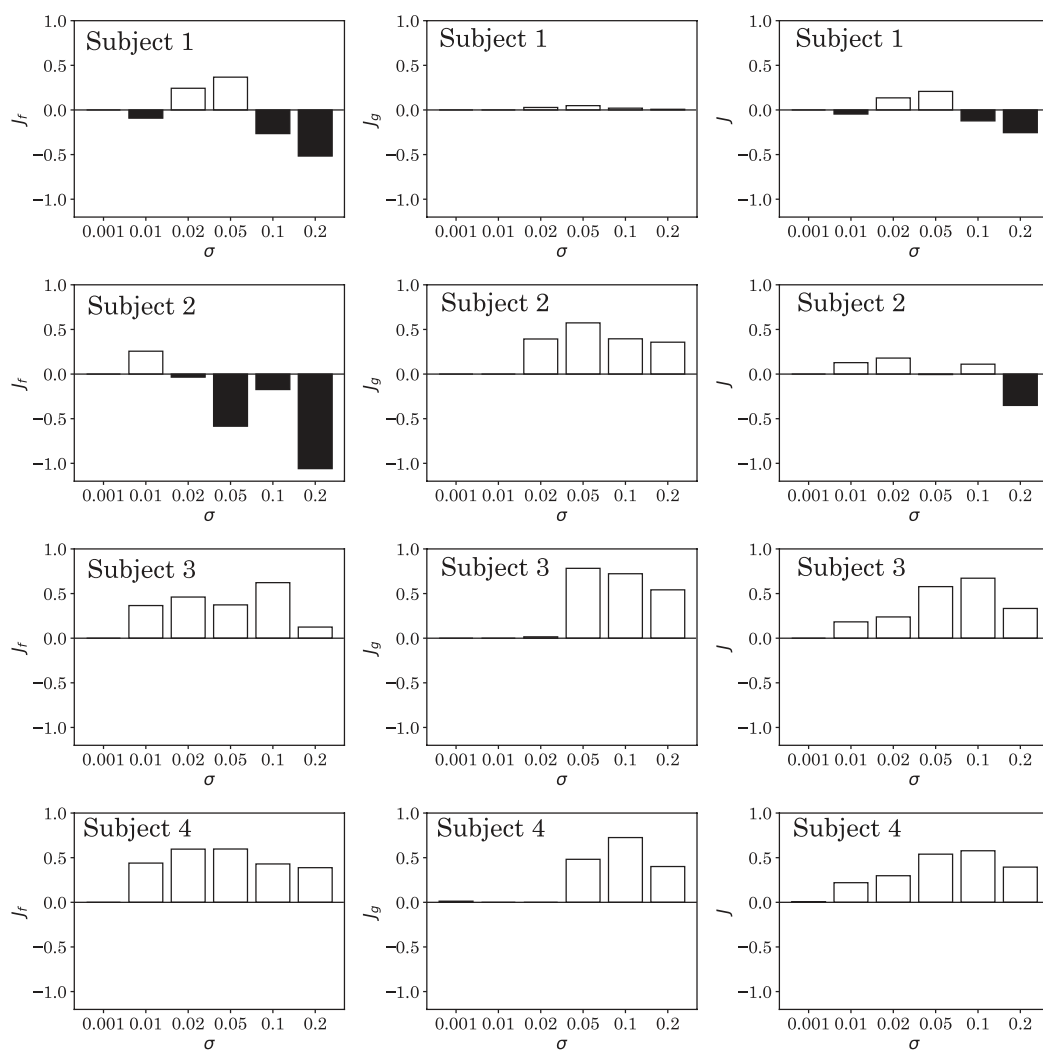


図 3.10: Evaluation value of Spreading Guidance force field σ (acceleration)

図 3.11: Evaluation value of Spreading Guidance force field σ (deceleration)

追従できなくなるため操作性は悪化するものと推測する。

今回の実験では作業時間 t_f は一定の値を設定して実験をおこなったが、作業に応じた適切な t_f の設定方法については、手先の初速から作業時間を予測する方法 [47] などの活用についても今後検討したい。加えて、操作者の加減速区間など特定の区間における誘導力の活用傾向に応じて、試行中に誘導力場の広がり σ を変更する設計も考えられるため、今後の課題としたい。

第4章 誘導力場の広がり最適化

4.1 最適な誘導力場の広がり推定

前節では実験設定を適用して実際に複数回の試行を行い、誘導力場の広がり σ に対する操作性評価値を算出した。実験結果から、操作性評価値 J はいずれの被験者についても σ が大きくなるにつれ大きくなり、ピークをとって減少する推移を得た。また、操作性評価値が最大となる σ は操作車によって異なる値となったことから、誘導力場の影響を受けた操作者の操作性には個人差があることもわかった。

そこで本節では、操作性評価実験によって得た実験結果から、 σ による操作性評価値を予測するために数理モデルを設計する。操作性評価値は σ が大きくなるにつれ大きくなり、ピークをとって減少する推移を得たことから、任意の σ で最大値を取る分布になるものと推測する。そこでワイブル分布の確率密度関数をベースにした関数をフィッティングすることとした。式 (4.1) にモデルを示す。

$$J^*(\sigma) = c \left(\frac{a}{b} \left(\frac{\sigma}{b} \right)^{a-1} \right) \exp \left(\left(-\frac{\sigma}{b} \right)^a \right) \quad (4.1)$$

ただし、式 (4.1) において a, b, c は定数とする。式 (4.1) に示した関数はパラメータ a, b, c を変更することにより、任意の σ で最大値をとる関数を得ることができる。

ここでは、式 (4.2) の評価関数を最小にするように非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法を用いてパラメータ a, b, c を決定することにより、式 (4.2) に示した $J^*(\sigma)$ が最大となる σ_{opt} を求める。

$$\sigma_{opt} = \arg \max \|J^*(\sigma)\| \quad (4.2)$$

4.1.1 実験結果から求める最適な誘導力場の広がり推定

実験的に求めた操作性評価値の平均値に対して、式 (4.1) のパラメータ a, b, c を求めてフィッティングした結果を図 4.1 に示す。また、その際に決定したパラメータについて表 4.1 に示す。

また、表 4.1 のパラメータが決定された際の決定係数は表 4.2 の通りである。

図 4.1 に示した通り、概ね式 (4.1) のモデルでフィッティングを行なうことができた。被験者 2 のについて一方で、図 4.1 に示したフィッティング結果については、すべての水準について試行が終了したあとにフィッティングを行った値である。実際の試行においては操作性評価値が試行ごとに一つずつ得られることとなるため、次の試行で適用する最適な誘導力場の広がり σ_{opt} を求めたい場合は、終了した試行で得られた評価値から次の試行で適用する σ_{opt} を試行ごとの逐次推定する必要がある。

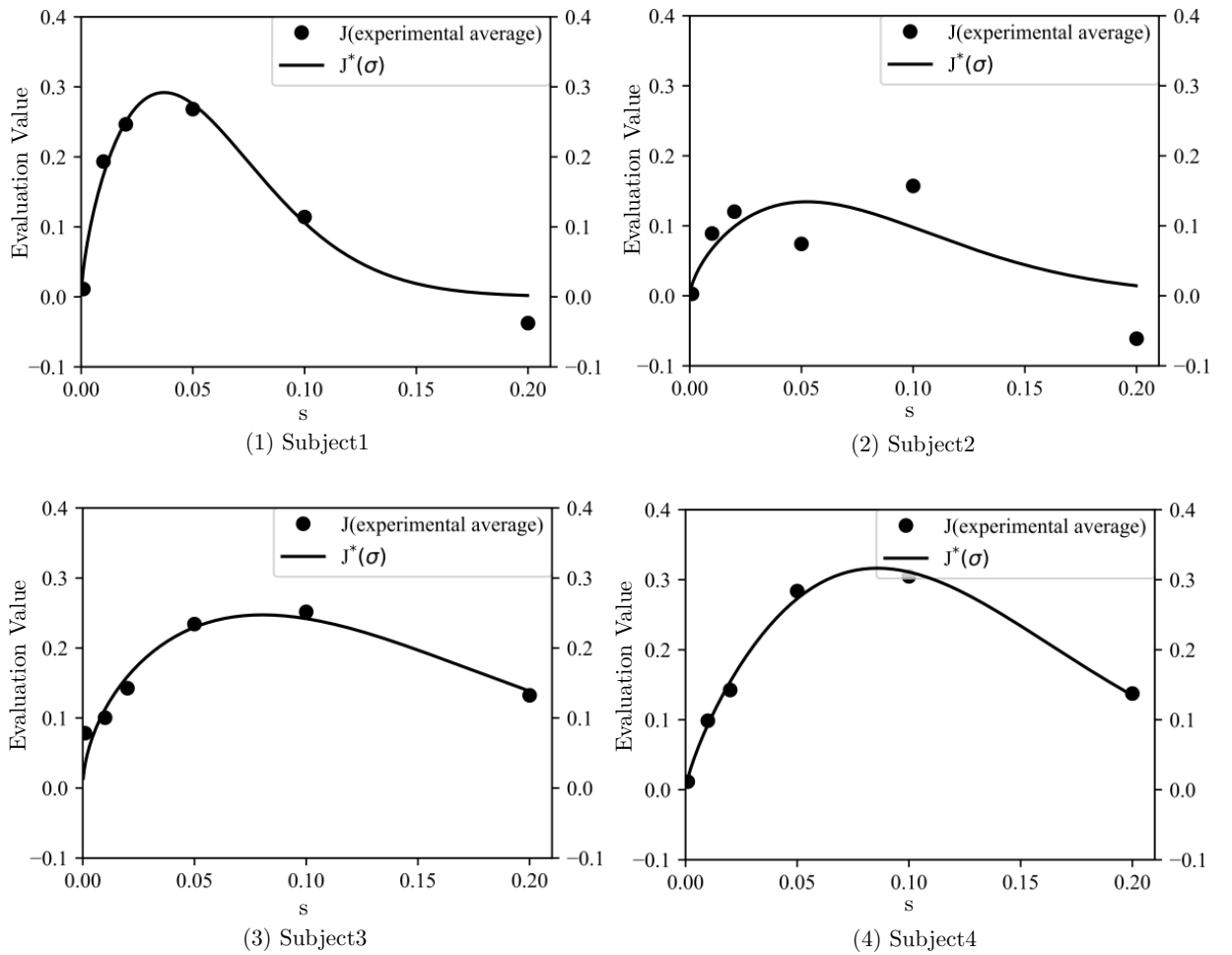


図 4.1: Evaluation value and the spread of guidance force field σ

表 4.1: Parameters of $J^*(\sigma)$

parameter	a	b	c
Subject1	1.65	0.0653	0.0246
Subject2	1.55	0.111	0.0195
Subject3	1.54	0.159	0.0525
Subject4	1.77	0.138	0.0546

表 4.2: Coefficients of determination R^2

	R^2
Subject1	0.981
Subject2	0.618
Subject3	0.895
Subject4	0.994

4.1.2 最適な誘導力場の広がり逐次推定

式 (4.1) に示したモデルのパラメータを試行ごとに逐次推定を行い、次の試行において最も操作者に適すると思われる誘導力場の広がり σ_{opt} を求めることとした。操作性評価実験におけるそれぞれの試行の結果から、操作性評価値 J をランダムにサンプリングし、 $J^*(\sigma)$ の逐次推定によってそれぞれの試行ごとに最適な誘導力場の広がりである σ_{opt} を求めた結果を図 4.2 から図 4.5 に示す。

図 4.2 から図 4.5 に示すように、 σ_{opt} は試行を重ねるごとに一定の値に収束する傾向を得ることができた。被験者 2 については他の被験者に比較して評価値の分散が大きいため σ_{opt} の逐次推定結果が、序盤に大きな値に発散し、収束も他の被験者よりも遅い結果を得た。また、ランダムサンプリングによる逐次推定においては十分に試行数が積み重ねられていない状態で σ_{opt} が大きな値に発散する場合が見られたことから、今後の課題としたい。

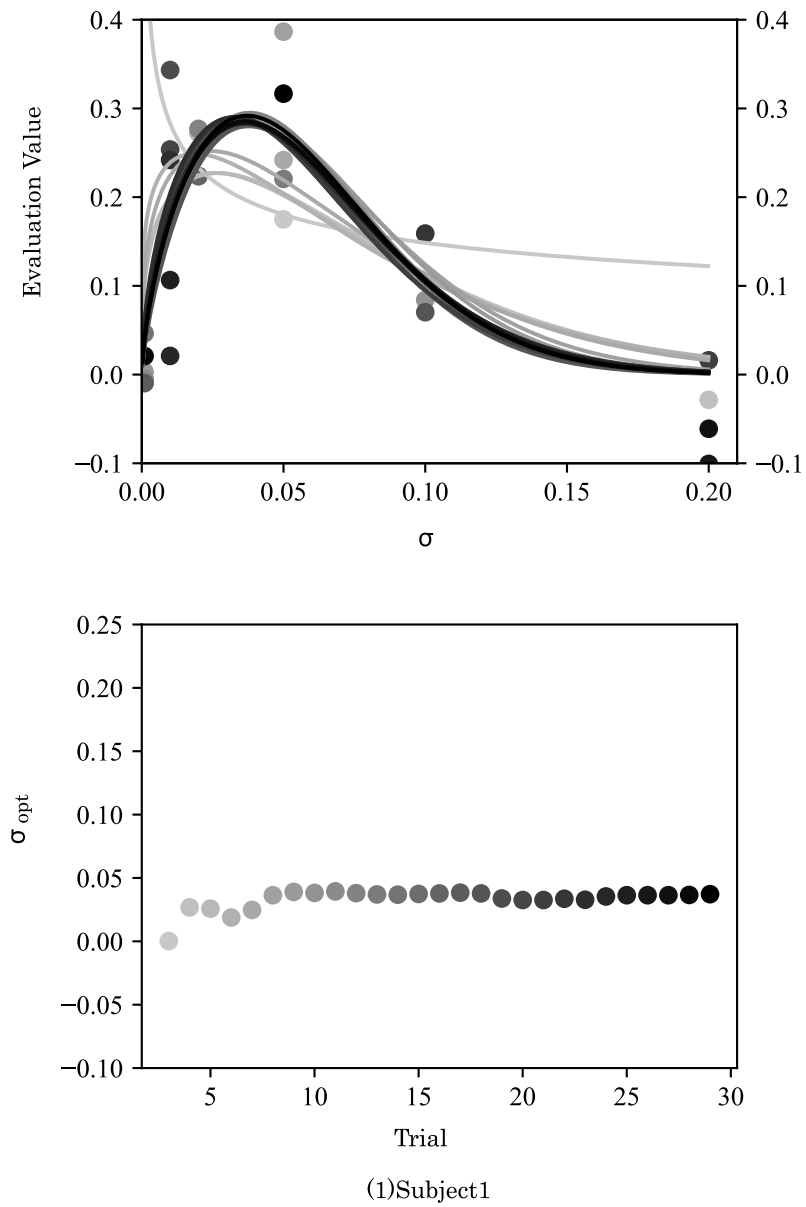
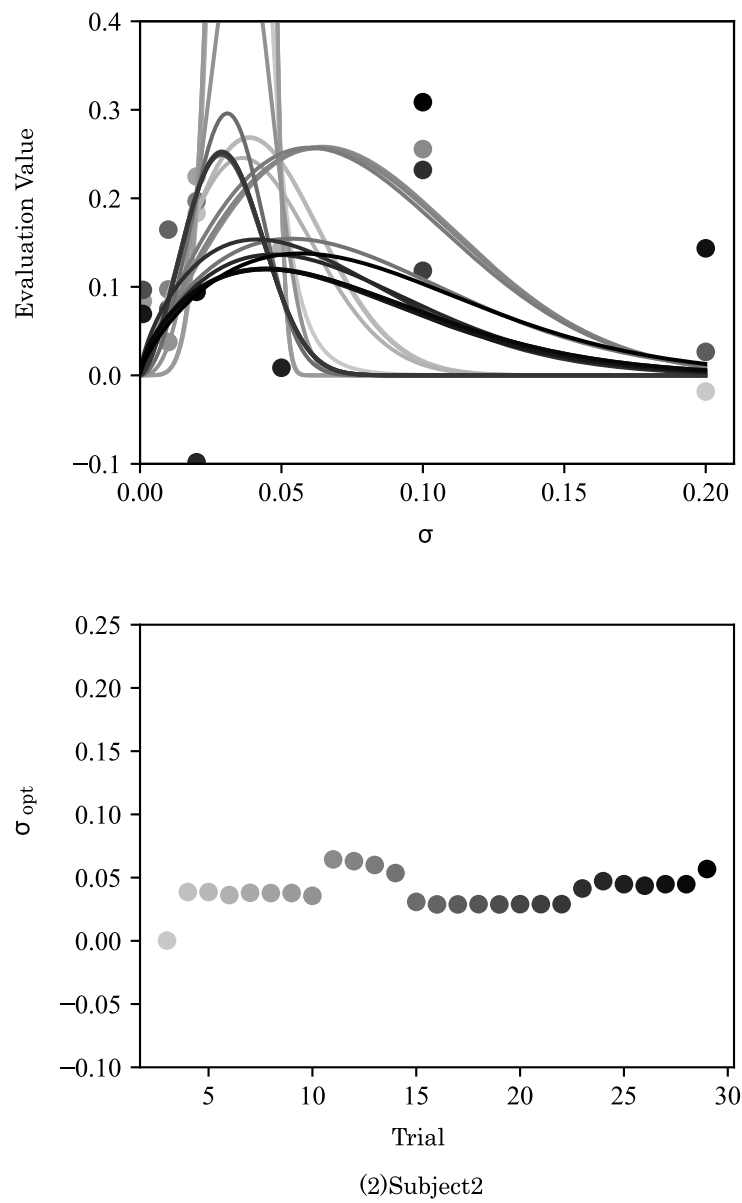


図 4.2: Sequential estimation of σ_{opt}

図 4.3: Sequential estimation of σ_{opt}

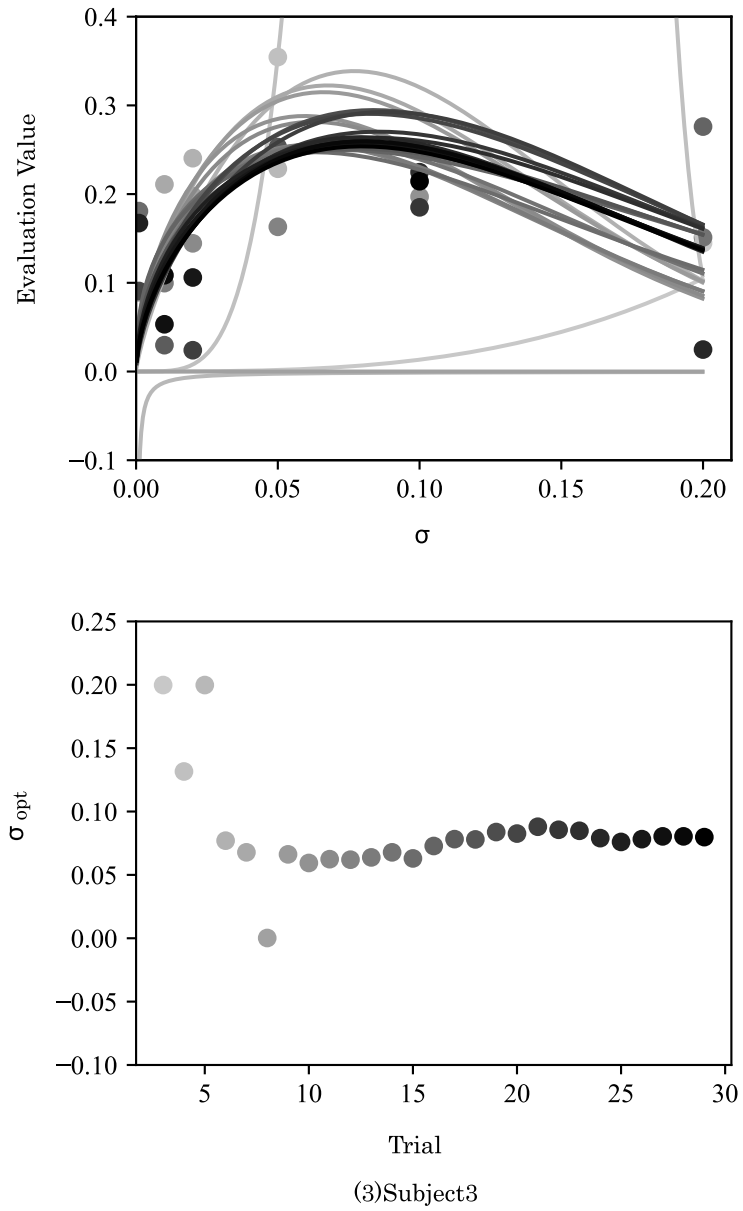
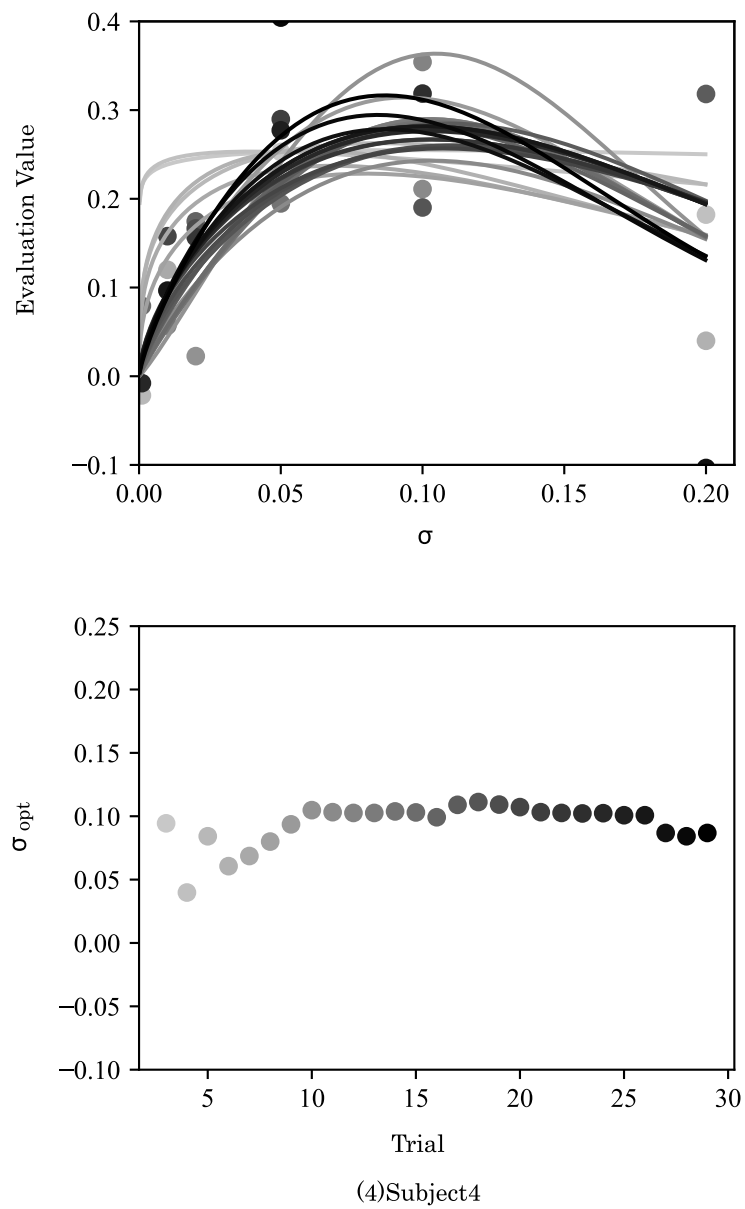


図 4.4: Sequential estimation of σ_{opt}

図 4.5: Sequential estimation of σ_{opt}

第5章 結論

本研究においては、PASによる繰り返しを前提とする作業について、操作者の負担軽減を目的としたPASの知能化をおこなった。本章では、ここまで述べた研究の内容とその成果について総括するとともに、今後の実用化に向け課題について整理する。

第一に操作者へのPASのハードウェアならびにソフトウェア面での設計をおこなった。産業用ロボットに対して6軸フォース・トルクセンサを実装し、PASとして動作するように実装を行うとともに、一般的な位置制御が可能なマニピュレータに対してセンサから入力される操作力を反映して制御する方法について設計をおこなった。第二に、PASによる繰り返し作業を前提とする場合に、操作者の負担軽減を目的とした誘導力による手先誘導を行うため、誘導力場の設計をおこなった。視覚としてPASが備えるセンサなどから入力される対象物位置を考慮し、エルミート曲線を用いた予測軌道の生成、ならびに予測軌道に向かう誘導力場の設計をおこなった。第三に、操作者の負担軽減を定量的に評価するための操作性評価値の定義を行い、第四に評価値を用いて操作性評価実験を行った。また、操作性評価実験においては操作性向上が認められ、誘導力場が負担軽減に寄与することを実験的に示した。最後に誘導力場の広がり操作性に与える影響を考察し、操作者個人に適した誘導力場を設計する方針案について示し、シミュレーションを行った。

なお、本技術の実用化に向けた課題としては下記の項目が挙げられる。

- 被験者ごとに適切な誘導力場の広がり推定ならびに設定
- 作業終了時刻を既知とした前提であったため、作業終了時刻の推定
- 作業開始時における誘導力場の広がり初期値と動的な変更に関する設計
- 操作性評価値の推定関数を決定するための試行回数の設定
- 操作者本人の感じた操作感と評価値に関する検証
- 予測軌道と操作者の意図する軌道に差異があった場合の誘導力場設計
- 操作者が意図しない大きな誘導力が発生した場合の安全設計

今後、実用化に向けて上記に関する設計と検討を加速していきたい。

参考文献

- [1] 総務省,「情報通信白書令和4年版」, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/r04.html> (2022)
- [2] 中村 久, 本田 朋寛,「産業用パワーアシストシステム」, 計測と制御 Vol.45(5), pp.445-448 (2006)
- [3] 城垣内 剛,「建設現場向けパワー増幅ロボットの開発-人間の力を増幅するロボットと、その開発経緯」, 建設機械, Vol.47(2), pp.67-74 (2011)
- [4] 小山 猛, 山藤 和男, 田中 孝之,「介護用装着型ヒューマン・アシスト装置に関する研究 (第1報) コンセプト, システム設計と実機の開発」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66(651), pp.3679-3684 (2000)
- [5] 三好 孝典, 鈴木 裕一, 寺嶋 一彦,「天井クレーンにおけるパワーアシストシステムの構築」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.22(2), pp.2427-2434 (2004)
- [6] 国土交通省,「建設施工における生産性の向上に資するパワーアシストスーツを募集します」, https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000296.html (2021)
- [7] 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の操作性向上」, 日本ロボット学会誌, Vol.70(696), pp.223-229 (2004)
- [8] 株式会社 山一精工,「アシストユニットメーカ 株式会社山一精工 【公式ホームページ】」, <https://yamaichi-seikou.com/>
- [9] ヤマハ発動機株式会社,「電動アシスト自転車 PAS/YPJ」, <http://www.yamaha-motor.co.jp/pas/>
- [10] ブリヂストンサイクル株式会社,「ブランド一覧」, <https://www.bscycle.co.jp/items/index.html>
- [11] ヤマハ発動機株式会社,「JWX-2 - 電動車椅子」, <https://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/lineup/jwx2/>
- [12] 国土交通省,「建設施工における苦渋作業の負担軽減にむけ～パワーアシストスーツ現場検証の事例を公表します～」, https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000343.html (2022)

- [13] 特許庁, 「平成 30 年度 特許出願技術動向調査－パワーアシストスーツ－」, https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/30_06slide.pdf(2019)
- [14] 首相官邸, 「ロボット革命実現会議 (第 3 回)」, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/dai3/gijisidai.html> (2014)
- [15] 田中 孝之, 「軽労化スーツ スマートスーツ」, 日本 AEM 学会誌 Vol.25(1), pp.17-23 (2017)
- [16] 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 (機械力学, 計測, 自動制御)」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68(666), pp.509-516 (2002)
- [17] 土井 達也, 山田 宏尚, 池本 敏久, 梶谷 浩, 「ハンドクレーン型パワーアシスト装置のシミュレーション」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.39(2), pp.28-33 (2008)
- [18] 城垣内剛, 「パワー増幅ロボットの建築現場への応用」, 建設の施工企画, Vol.719, pp.14-18 (2008)
- [19] 清水建設 (株), アクティブリンク (株), (株) エスシー・マシーナリ「重量鉄筋配筋作業支援ロボット (配筋アシストロボ) の開発」, 建設機械施工, Vol.69(9), pp.94-98 (2017)
- [20] 中小企業庁, 「2018 年版『中小企業白書』」, https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H30/PDF/h30_pdf_mokujityuu.htm (2018)
- [21] 厚生労働省, 「令和 4 年版 労働経済の分析」, <https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/21/21-2.html> (2022)
- [22] 厚生労働省, 「令和元年版 労働経済の分析」, <https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/19/19-2.html> (2019)
- [23] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation," 1984 American Control Conference, San Diego, CA, USA, 1984, pp. 304-313, doi: 10.23919/ACC.1984.4788393.(1984)
- [24] R. Ikeura and H. Inooka, "Variable impedance control of a robot for co-operation with a human," Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995, pp. 3097-3102 vol.3, doi: 10.1109/ROBOT.1995.525725.(1995)
- [25] 積際 徹, 洲上 康德, 神吉 厚之, 「人間とロボットの協調作業系におけるロボットのインピーダンス制御の安定性解析に関する一考察」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71(707), pp.2267-2272 (2005)

- [26] 辻内 伸好, 小泉 孝之, 北村 徹, 「1P1-A11 筋電信号による動作推定に基づくロボットハンドの操作」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.1P1-A11.1-1P1-A11.4, (2006)
- [27] 木口量夫, 林喜章, 古瀬泰徳, 「ツール及び動作に応じた認知アシストを行う上肢パワーアシストシステム」, 日本機械学会 IIP 部門講演会 (IIP2010) 講演論文集, pp.82-85 (2010)
- [28] 李 秀雄, 山海 嘉之, 「装着型下肢用パワーアシストシステムによる振り運動での仮想インピーダンス調整に関する研究」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71(705), pp.1686-1695 (2005)
- [29] 城垣内 剛, 「パワー増幅ロボットにおける操作者への過負荷を排除する機構設計」, パナソニック技報 Vol.55(4), pp.284-286 (2010)
- [30] 株式会社安川電機, 「安川電機の人協働ロボットで実現する自動化ソリューション」, <https://www.e-mechatronics.com/product/robot/special/hc10/>
- [31] ユニバーサルロボット, 「協働ロボットアーム | 協働ロボットによる自動化 | UR」, <https://www.universal-robots.com/ja/>
- [32] H. Konosu and Y. Yamada, "Skill-Assist: assisting device helping human workers in automobile modular component assembly," Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), Las Vegas, NV, USA, 2003, pp. 2514-2515 vol.3, doi: 10.1109/IROS.2003.1249247 (2003)
- [33] 鴻巣 仁司, 荒木 勇, 山田 陽滋, 「自動車組立作業支援装置スキルアシストの実用化」, 日本ロボット学会誌, Vol.22(4), pp.508-514 (2004)
- [34] Y. Yamada, H. Konosu, T. Morizono and Y. Umetani, "Proposal of Skill-Assist: a system of assisting human workers by reflecting their skills in positioning tasks," IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028), Tokyo, Japan, 1999, pp. 11-16 vol.4, doi: 10.1109/ICSMC.1999.812368.
- [35] 渋川 文哉, 田中 孝之, 「任意点操作可能なパワーアシストシステムの操作性改善のための操作点インピーダンス制御」, 日本機械学会論文集, Vol.80(816), pp.DR0238 (2014)
- [36] 日下 聖, 田中 孝之, 梶原 秀一, 「周期運動追従スキル向上のためのセミアクティブアシスト機構の補助力位相差制限法によるスキルアシスト効率制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.32(2) pp.198-206 (2014)
- [37] 原 進, 湯地 恒太, 吉浦 隆仁, 山田 陽滋, 「意図しない入力による搬送物への影響を考慮したパワーアシストシステムの制御系設計」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78(793), pp.3279-3283 (2012)

- [38] 奥富 正敏, 森 政弘, 「ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定」, 日本ロボット学会誌, Vol.1(3), pp.226-232 (1983)
- [39] 辻 敏夫, 千種 和幸, 金子 真, 「人工ポテンシャル場の変形を用いた移動ロボットの軌道生成法」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62(597), pp.1905-1911 (1996)
- [40] F. Müller, J. Jäkel and J. Suchy, "Tunnel-shaped potential force fields for improved hand-guiding of robotic arms," 2015 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzydroje, Poland, 2015, pp. 429-434, doi: 10.1109/MMAR.2015.7283914.(2015)
- [41] Junki Matsuda, Takayuki Tanaka, Shun'ichi Kaneko, Hidenori Takauji, Satoru Takahashi, "Visual Guided Power Assist System – Relation between maneuverability and measurement error of target object position", SCIS & ISIS 2008, pp. 1478-1482 (2008)
- [42] J. Matsuda and T. Tanaka, "A Proposal of Individualization of Guidance Force Field to Improve Maneuverability of Power Assist Systems," 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Sapporo, Japan, 2022, pp. 1231-1236, doi: 10.1109/AIM52237.2022.9863355.(2022)
- [43] 宇野 洋二, 「ヒトの動作の最適化モデル」, 日本ロボット学会誌, Vol.32(6), pp.525-529 (2014)
- [44] T.Flash and N.Hogan, "The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model", Journal of Neuroscience, Vol.5(7), pp.1688-1703 (1985)
- [45] 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」, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol.125(7), pp. 1133-1139 (2005)
- [46] 前田 雄介, 原 崇之, 新井 民夫, 「躍度最小モデルを用いた動作予測に基づく人間-ロボット協調作業 (機械力学, 計測, 自動制御)」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68(675), pp.3367-3372 (2002)
- [47] Norihiro Kobayashi, Takayuki Tanaka, "Control Method for Power Assisted Cart Using Walking Effect Prediction Aimed at Improvement of Load Reduction Ratio", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26(6), pp.780-789 (2014)

査読付き学会誌等

- 松田潤樹, 田中孝之, 「パワーアシストシステムにおける操作対象物の操作方向を考慮した軌道上への誘導力場による手先誘導効果の検証」(2022年5月 日本ロボット学会誌投稿)

査読付き国際会議プロシーディングス

- J. Matsuda, T. Tanaka, S. Kaneko, H. Takauji, S. Takahashi, "Visual Guided Power Assist System - Relation between maneuverability and measurement error of target object position", Scis & Isis, vol. 2008, pp. 1478 - 1482, 2008, doi: 10.14864/softscis.2008.0.1478.0.
- J. Matsuda, T. Tanaka, T. Kusaka, "Estimation of the optimal spread of a guidance force field for a power assist system", 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), 10月 2017, pp. 249 - 254. doi: 10.1109/IRIS.2017.8250130.(2017)
- J. Matsuda, T. Tanaka, "A Proposal of Individualization of Guidance Force Field to Improve Maneuverability of Power Assist Systems", 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 7月 2022, pp. 1231 - 1236. doi: 10.1109/AIM52237.2022.9863355.