



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ヒトの知覚・運動特性を考慮した任意点操作可能なパワーアシストシステム
Author(s)	渋谷, 文哉
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11313号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11313
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55658
Type	doctoral thesis
File Information	Fumiya_Shibukawa.pdf



博士論文

ヒトの知覚・運動特性を考慮した
任意点操作可能なパワーアシストシステム

渋川 文哉

2014 年 3 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。

渋川 文哉

審査委員： 主査 田中孝之 准教授
副査 金子俊一 教授
小野里雅彦 教授

ヒトの知覚・運動特性を考慮した 任意点操作可能なパワーアシストシステム*

渋川 文哉

概要

工場や倉庫での重量物運搬や組み立て作業においてエアバランサに代表されるマテリアルハンドリング装置等の実用的なパワーアシストシステム (PAS) が広く活用されている。これらの PAS を構成するマニピュレータ自体は広い作業領域を持つ。しかし、多くの PAS は操作インタフェースが先端部に固定されているため、実際の作業領域はより狭いユーザの可動域に制限される。その結果、ユーザは作業対象物に接近しなくてはならず、落下事故に巻き込まれるなどの危険が想定される。この解決策として従来は遠隔操作型入力装置として操縦桿やマスタ・スレーブシステムなどを用いることが一般的であった。しかし、これらの方法ではその操作方法に熟練する必要があり、フォースフィードバック等で操作性の向上を図る場合にもより多くのコストがかかる。

そこで本研究では、力の増幅だけでなく作業領域も拡大し、且つ直感的に操作可能な PAS の実現を目的とする。具体的には、PAS 上の任意点から PAS 先端部を操作可能にする Multi-portal Human Interface(M-HI) の研究開発を行った。M-HI とは、PAS を任意点から操作することで、ユーザ自身の作業領域を超えた普段手の届かない範囲において、あたかも自身の腕が延長したかのように思い通り作業可能とするためのシステムである。

これまでの研究から PAS 中間関節位置から先端部を操作可能なことを確認している。しかし、その際に操作性が低下することが実験的に明らかとなった。これには多くの要因が考えられるが、本研究ではヒトの特性及び、人間機械協調の観点から M-HI 適用 PAS の操作性を改善した。

ユーザが PAS を操作する際、作業対象物と PAS 先端部を目視により確認しながら操作するが、ヒトの運動特性は視覚に大きく影響されることがわかっている。しかし、今までユーザの視覚が PAS 操作に及ぼす影響についての研究事例は報告されていない。そこで、PAS 操作におけるユーザの視覚と操作力の関係性について解析・モデル化した。この関係を考慮し PAS への操作入力を安定化する手法を提案し、実験により本手法の有効性を確認した。

PAS の基本的な制御則として PAS 先端部のインピーダンス制御を採用した。M-HI を用いて先端部以外の点から操作する場合、先端部と操作点の動作は一般に一致しないため、操作点のインピーダンスは、先端部に設定した所望のインピーダンスと異なり操作性が低下すると考えられる。そこで、操作点のインピーダンスと操作性の関係を明らかにした。さらに、操作点でのインピーダンスが先端部の設定値に近い値になるよう、操作点の運動

*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-DT79115038, 2014 年 3 月 25 日。

を修正し操作性を向上させた．また，PAS 操作点と先端部の運動が異なることで，操作点においてユーザの操作力と PAS が干渉する場合がある．PAS とユーザの干渉力が操作性へ及ぼす影響を実験的に明らかにした．操作点の運動と操作力の干渉を逐次軽減する手法を提案した．本手法の効果を実機及びシミュレーションにて確認し有効性を示した．

キーワード: パワーアシストシステム, ヒューマン・ロボットインターフェース

Power Assist System Operable from Arbitrary Operational Point Considering on Human Cognition and Motor Function[†]

Fumiya Shibukawa

Abstract

The practical power assist systems (PAS) such as material handling equipments represented by balancers are utilized widely in heavy weight transportation in factories or warehouses now. These manipulators composing a PAS have large workspace. However, most PAS has an input interface near the end-effector of the manipulator, actual workspace is limited by user's motion space. As a result, the users have to be close to the end-effector and it has a risk for example falling accident. As a solution of that, using control stick or master-slave system are general. However, these solutions require to acquaint how to use each control method. Furthermore, to apply maneuverability to improve method such as force feedback is required expensive costs.

In this study, the goals are not only amplifying the operational force, but also extending the workspace and keeping intuitive maneuverability. Concretely, Multi-portal Human Interface (M-HI) as an innovative human interface for power assist systems has been researched and developed. The M-HI allows users to apply the operational force anywhere on the power assist system. Because of that, the workspace of the power assist system is extended with their end-effector can be controlled as user think.

Previous research shows that controlling end-effector from each intermediate joint of PAS is able. However, it is confirmed that the maneuverability decrease in that situation. Many kinds of things are thinkable as the causes of that phenomenon. In this study, maneuverability improves method focused on human characteristics and human - machine system are proposed.

When the user operates PAS, the user confirms end-effector and target object by them eyes. It is reported that human motion are affected by their visual information. However, the effect to PAS maneuverability caused by user's visuospatial recognition has not been reported. The relation between user's operational force and user's line of sight are analyzed in terms of human vision. The operational force stabilization methods are proposed considering these relationships.

In this study, impedance control of PAS's end - effector is adopted as a fundamental control method. While the PAS is controlled with M-HI, motions of end - effector and operational point are different each other. Because of that, the impedance parameters of operational point are different from desired values on end - effector position. This phenomenon decreases the maneuverability of the PAS with M-HI. The relationship between maneuverability and the impedance

[†]Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT79115038, March 25, 2014.

parameter difference of operational point is confirmed experimentally. Furthermore, the modification method to make the impedance parameters closer to desired values is proposed. The proposed method improves the maneuverability of the PAS with M-HI. The difference of the motions of end-effector and operational point also cause the interference force between the user and PAS on the operational point. The effect of the interference force to the maneuverability of the PAS are confirmed. The the interference force reduction method is proposed and the maneuverability improves effect are examined by simulation and experiment.

Keywords: Power assist system, Human-robot interface

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	2
1.3	本研究の目的	4
1.4	研究の概要	6
1.5	本論文の構成	6
第2章	任意点操作可能な パワーアシストシステム	9
2.1	マルチポータル・ヒューマンインタフェース	9
2.1.1	手先操作力推定	10
2.1.2	実験環境	13
2.2	パワーアシストシステムの増力比と 手先変位拡大率の関係	13
2.2.1	M-HI 適用 PAS の力の増力比 α による PAS 先端部動作拡大効果の確 認実験	15
2.2.2	M-HI 適用 PAS の性能評価実験	18
2.3	M-HI の 3 次元空間適用に関する考察	19
2.4	第2章のまとめ	23
第3章	視空間認識の分解能を考慮した パワーアシストシステムの操作力安定化	25
3.1	PAS における安定な制御	25
3.2	ユーザの視線方向と運動特性の関係	26
3.2.1	実験環境	28
3.2.2	実験条件	29
3.2.3	実験結果	29
3.2.4	視線を考慮した操作力方向のばらつきの解析	33
3.3	ファジィ回帰分析を用いた 視空間認識考慮型操作力安定化法	33
3.4	F-FS-VS による操作力安定化性能評価	36
3.4.1	操作力安定化性能評価実験	36
3.4.2	F-FS-VS における視線方向誤差の影響	38
3.5	PAS 操作安定性評価シミュレーション	39
3.6	3 リンク PAS における F-FS-VS の評価	42

3.6.1	操作力方向特性計測実験	42
3.6.2	操作力安定化性能評価シミュレーション	45
3.7	視線と操作力方向の安定性における 個人差の考察	45
3.7.1	身体的特徴における個人差の影響	45
3.7.2	視空間認識特性および運動特性の個人差の確認実験	45
3.8	第 3 章のまとめ	48
第 4 章	操作点のインピーダンス特性に基づく 操作性改善	51
4.1	3 自由度 PAS の先端部インピーダンス制御	51
4.1.1	実験環境	51
4.1.2	実験条件	52
4.2	操作点インピーダンス	53
4.2.1	M-HI 適用 PAS の操作性評価	53
4.2.2	操作点インピーダンスの算出	54
4.2.3	操作点インピーダンスと操作性の関係	56
4.3	操作点インピーダンス修正	59
4.3.1	操作点インピーダンス修正	59
4.3.2	操作点インピーダンス修正量の最適化	59
4.4	操作点インピーダンス修正評価実験	62
4.5	第 4 章のまとめ	67
第 5 章	操作点における力の干渉を考慮した 操作点運動協調化	69
5.1	3 リンク PAS への M-HI の適用と干渉力問題	69
5.1.1	M-HI 適用 PAS の構成と制御	70
5.1.2	2 次元 3 自由度 PAS の任意操作点における運動拘束	72
5.1.3	操作点干渉力と操作性の関係	73
5.2	操作点運動協調化 (OPMH)	76
5.2.1	操作点運動協調化アルゴリズム	76
5.2.2	OPMH 適用 PAS の動作確認	78
5.2.3	OPMH 適用 PAS の目標位置収束性の考察	81
5.3	OPMH 操作性評価シミュレーション	81
5.3.1	操作点干渉力の軽減	81
5.3.2	先端部位置誤差の最適化	82
5.3.3	操作点アシスト比の補償効果	83
5.4	実機による OPMH 評価実験	84
5.4.1	直線経路追従実験	84
5.4.2	調整係数 β による操作点干渉力の軽減率の考察	84
5.5	第 5 章のまとめ	85

第 6 章 結論	87
6.1 まとめ	87
6.2 今後の展望	88
参考文献	91
謝辞	97
研究業績目録	99

目 次

2.1	Multi-link manipulator model of PAS-M-HI allows for control to be exercised from anywhere in PAS.	11
2.2	Definition of each parameters of M-HI	12
2.3	Impedance control for an experimental 3 link PAS	12
2.4	Examples of workingspace of PAS with M-HI.	14
2.5	Examples of PAS's posture during a motion by amplification ratio α	16
2.6	Examples of P_3 position during a motion by amplification ratio α	17
2.7	End-effector position orbit of PAS with M-HI by amplification ratio α	17
2.8	Fundamental maneuverability experiments of the PAS with M-HI.	18
2.9	Experimental results of PAS with M-HI by amplification ratio α	19
2.10	Available DOF of the PAS with M-HI.	21
3.1	Experimental PAS device and force sensor.	26
3.2	A PAS model and definitions for the experimental parameters.	27
3.3	Examples of experimental results of operational force.	30
3.4	Force direction variance as PAS with cobweb chart.	31
3.5	Force direction variance as PAS with cobweb chart.	32
3.6	σ_{F_h} as analyzed on the basis of θ_{F_s}	34
3.7	Confidence intervals by fuzzy and linear interval regression analysis and membership functions.	35
3.8	Comparison of estimation error with θ_{F_s} between F-FS-VS and direct operational force.	37
3.9	Comparison of standard deviation of θ_{F_s} between F-FS-VS and direct operational force.	37
3.10	Analysis of $\sigma_{F_h}^*$ caused by line of sight error.	38
3.11	Block diagram of stabilized PAS with F-FS-VS.	40
3.12	Position of target in simulation.	40
3.13	Approaching path to target A.	41
3.14	Approaching path to target B.	41
3.15	Approaching path to target C.	41
3.16	Path coincidence of end-effector orbit.	42
3.17	Experimental PAS postures.	43
3.18	Operational force characteristic 3 link PAS.	44
3.19	Indivisual reference operational force characteristic 3 link PAS.	47

4.1	Power assist system using impedance control with and without Multi-portal Human Interface	52
4.2	Target paths of end-effector tracking experiment	53
4.3	Experimental result of approach time with applying M-HI	54
4.4	Operational point impedance model at P_2	55
4.5	Examples of transition of impedance parameter value	56
4.6	Examples of transition of impedance parameter value	56
4.7	Examples of transition of impedance parameter value	58
4.8	Impedance modification on operational point	59
4.9	Transitions of evaluation criteria for optimization of impedance modification . .	61
4.10	Evaluation function for optimization of impedance modification	62
4.11	Experimental result by impedance modification parameter β	63
4.12	Experimental result of impedance modification parameter β transition	64
4.13	Experimental result of motion error between P_2 from P_3	65
4.14	Average of experimental results of motion error between P_2 from P_3	66
5.1	An example that PAS with M-HI disturbs user's motion.	70
5.2	The experimental PAS and operational force input device.	71
5.3	PAS control method using Impedance control.	71
5.4	Experimental settings of target path and an example of tracking error of end effector orbit ε_{ri}	72
5.5	Experimental results of operational accuracy of PAS applied M-HI.	73
5.6	Relation between average interference force $ \mathbf{F}_a $ and control accuracy ε_{ri}	73
5.7	Block diagram of operational point motion harmonization.	75
5.8	A concept of the interference force reduction by OPMH.	77
5.9	Definition of end-effector motion error.	78
5.10	An example of β optimization during OPMH.	79
5.11	Motion examples of each joint orbit $\beta = 0, \beta = 1$ and β optimized.	80
5.12	Experimental results of average interference force.	82
5.13	Experimental results of average end-effector motion error.	82
5.14	Definition of operational point assist ratio.	83
5.15	Assist ratio analysis.	83
5.16	Actual PAS experimental results of interference force $ \overline{\mathbf{F}}_a $	85
5.17	Actual PAS experimental results of end-effector motion error ε_r	85
5.18	$ \mathbf{F}_a $ reduction ratio analysis by β	86

表 目 次

1.1	Classification of Operation Method of Human - Machine System 1	4
1.2	Classification of Operation Method of Human - Machine System 2	4
3.1	Specifications of PAS	28
3.2	Experimental parameters	28
3.3	Experimental posture combinations of PAS	28
3.4	Experimental results of estimation comparing F-FS-VS and direct operational force	38
3.5	Experimental results of path coincidence	42
3.6	Experimental results of estimation using 3 link power assist system	45

第1章 序論

1.1 研究背景

多リンクマニピュレータを用いたパワーアシストシステム（PAS）は現在、エアバランサやマテリアル・ハンドリング装置等として工場や倉庫で広く活用されている。PASは精密な操作をユーザが、作業対象物の重量を機械がそれぞれ担当することで人間だけでは難しい重量物の取扱いを容易にしている。このようなPASの多くはマニピュレータ先端部に取り付けられたセンサや操縦桿などの操作インタフェースを用いて操作する仕組みとなっている。しかし、その構造上ユーザは作業対象である重量物に接近する必要があり落下事故等に巻き込まれる危険を伴う [1]。そのため、重量物を取り扱うための支援装置は精密な操作性を維持できれば、作業対象物へはユーザが直接近づく必要が無いものが望ましい。

また、原子力発電所等で用いられる極限作業ロボットマニピュレータ [2,3] や、国際宇宙ステーション（ISS）やスペースシャトルに搭載されているカナダアーム [4] をはじめとする宇宙用大型マニピュレータなど離れた位置から作業対象物を思い通り操作する技術は以前から研究開発されており、社会的に求められている。これまで遠隔操作型の入力装置としては、操縦桿やマスタ・スレーブシステムなどを用いることが一般的であった。しかし、これらの方法ではその操作方法に熟練する必要があり、フォースフィードバック等で操作性の向上を図るとしてもより多くのコストがかかる。

このような、装置を開発する上でPASという道具を使うユーザの身体性について考える。ここで、身体性に関してはすでにいくつかの定義や議論がなされているが、浅田らの言葉を引用すると「行動体と環境との相互作用を身体が規定すること、およびその内容、環境相互作用に構造を与え、認知や行動を形成する基盤となる。」としている [5]。つまり自己と外界の間に存在し、外環境に対して影響を与える物質及びその行動の基が身体性である。ここで自己を人間とすると、外界に影響を与える物質は身体であり、それらをつなぐ行動意志や環境把握機能が身体性であると言える。人間は生まれてから自己の身体を思い通り操りとりまく環境に対応・影響していくために多くの試行錯誤・学習を経てその身体性を獲得していく [6]。ここで、身体に接する外界あるいは外界と身体との境界にある「道具」を身体の延長と考えると、道具に対しても身体性を考えることができる。

身体性の獲得に関しては様々な研究が進められており、特にロボットを用いてその認知発達特性を明らかにすることを目的とした、認知発達ロボティクスの分野において、浅田らはミラーニューロンシステムを用いて身体性と社会性の関係へのアプローチを提案している [7]。身体性を獲得していくことは脳内で身体及びそれを取りまく環境を構築することと考えられており、その中でも皮膚感覚による触覚刺激が脳内環境構築は非常に重要であることが指摘されている [8]。また道具を使用する際は、訓練によって身体性をその道具を含めた作業領域に拡大することが Cardinali らによって確かめられている [9]。さらに

谷田らはバーチャルリアリティ（VR）技術を用いて、視認識空間と実空間の関係学習を行い、その課程における脳活動を明らかにした [10].

一方スポーツ等において、例えばテニスのラケットや剣道の竹刀など、本人の鍛錬によって、ヒト作業領域を超えた位置で効果を発揮し、さらに感覚を受け取ることができるようになることが確認されている [11, 12]. このことから、人間は道具を用いて自身の作業領域を拡大可能であり、訓練によってその拡大した作業領域の中で自由に作業することができる。機械の持つ作業領域及び出力は、人間のそれらと比べて非常に大きく設計可能であるため、ヒトの鋭敏な感覚と柔軟な行動判断を用いて、広作業領域・高出力の機器を操作する仕組みは合理的である。これまで人間は、道具を思い通り操るために訓練する、あるいはより使い易いように道具を改良してきた。同様に、人間-機械系の操作システムにおいてヒトの特性を積極的に利用し、より直感的に操作するための技術開発は極めて重要である。

1.2 関連研究

本研究では、人間機械系の特に操作インタフェースを含む操作方法について、新たな操作手法の提案及び、提案手法における操作性改善を行う。これまで研究・開発されている装置の人間機械系の操作に関わる特徴をまとめる。以下に示す5項目の指標を基に分類し、それぞれの長所・短所及び操作インタフェース例を挙げ Table 1.2 にまとめる。

1. 時間特性：人間-機械間においてユーザと機械の動作が時間的に同期しているかどうかを示す。
2. 空間特性：機械の作用点に対するユーザの位置を、距離を基準として遠隔型か臨場型かを分類する。
3. 入出力方向：ユーザの入力に対する機械の出力方向が一致しているかどうかを示す。
4. 作用方向：PAS とユーザの間に相互作用が働く系かどうかを示す。
5. 作業領域：作業領域を決定づける要素が人依存か機械依存かを示す。

これらの指標から、人間-機械系を取り扱う装置・システムの操作方法の特徴を分類し各関連技術を整理する。

まず、人間機械協調型のシステムとして、作業対象物をユーザ及びロボットで共同搬送するシステムがある [13, 14]. このようなシステムの利点として、人間及びロボットが上手く協調していれば、人間の巧みさや臨機応変さを損なうことなくロボットが支える分だけ人への負担を減らすことが可能になる。しかし一方で、モデル化の難しい人間の行動や意図推定のためのシステムの安定性を確保するのは困難である。

次に、本研究の動機である、パワーアシストシステムがある [15, 16]. 現在 PAS として研究開発されている機器は多岐にわたり、装着型・非装着型など様々な種類があるが、それらに共通する事項として、先の共同搬送システムに比べユーザとロボットの関係の入出力方向が一致しており、直感的に操作可能である。PAS や先の共同搬送システムに共通して、ユーザが作業対象物に直接あるいは極めて近い物理的接触を必要とするため、系全体の有効な作業領域はユーザである人の作業領域に制限される。Kazerooni の Hydraulic Human

Power Extender [17] では、操作点の先に自由度を持ち、ユーザの可動範囲よりも広い作業空間を持つが、作業空間を拡大する自由度としては、1 自由度しか無いため、操作点の運動に大きく拘束される。また、力の増幅を目的としているため拡大された作業領域の活用には検討していない。

これらの人間中心の操作手法に対して、操縦桿型の操作システムはより古くからあらゆる機器の制御に用いられてきた。これは重機や建設機械の操縦桿はもちろんのこと、より応用的な機器としてテムザックの実用型レスキューロボット援竜 [18,19] や日立建機の ASTACO [20,21] がある。

また、テレオペレーション技術として進化した、スペースシャトルや国際宇宙ステーションで用いられる大型マニピュレータ [22] や原発などの極限作業用ロボットマニピュレータ [2,3] など操縦桿、ジョイスティック等の装置を用いて操作されている。このようなシステムは、作業領域における作用点の運動が、ユーザの可動領域の制限を受けない。しかし、これらのシステムを思い通りに操作するためには、長時間の訓練を必要とし、また操作インタフェース側に直感的な操作感を負荷するためのビジュアルフィードバックやフォースフィードバックの機構を付加する工夫も行われているが、より高コストになることは避けられない。この操作システムをより高度化し、操作インタフェースそのものを作業ロボットアームと同様もしくはそのミニチュアや簡易版を用いることで直感的な操作性を実現するマスタースレーブシステムがある [23,24]。しかしやはり高コスト化してしまう。

高機能なマスタースレーブシステムの代表として ZEUS[®] [25] や da Vinci[™] [26,27] 等の手術用ロボットが臨床応用されている。今西らは、手術用ロボットマニピュレータの操作支援のための力覚ナビゲーション手法を提案しており、パワーアシストシステムとは逆のスレーブ側のより細かな動きを感知し、手術環境から受けるスレーブロボットへの反力をマスタロボットへの的確に伝えることで操作性を向上させている [28]。

最後に産業用ロボットアームの操作法について分類すると、上記までの人間機械系システムは、ユーザの動作や入力に対して、ある程度の遅延があるにしても、同期させる制御手法なのに対し、広範囲・高出力でありながら、簡易で安価な操作指令装置を利用できる。しかし、操作命令に対しての即時な応答性はその設計に要求されておらず、対象とする作業も限定的な条件で且つ事前に教示する必要がある [29]。

Table 1.1: Classification of Operation Method of Human - Machine System 1

システム	時間的特性	空間的特性	入出力方向	作用方向
人間-機械 協調搬送	同期	臨場	不一致	双方向
PAS	同期	臨場	一致	双方向
極限作業 マニピュレータ	同期	遠隔	不一致	単方向
宇宙用 マニピュレータ	同期	遠隔	不一致	単方向
重機・建機	同期	遠隔	不一致	単方向
マスター スレーブ	同期	遠隔	一致	単方向・双方向
手術用ロボット マニピュレータ	同期	遠隔	一致	双方向
産業用 ロボット	非同期	遠隔・臨場	不一致	単方向
M-HI	同期	遠隔・臨場	不一致	単方向・双方向

Table 1.2: Classification of Operation Method of Human - Machine System 2

システム	作業領域	長所	短所	操作インタフェース
人間-機械 協調搬送	人依存	臨機応変	複雑	作業対象物
PAS	人依存	直感的	人依存	各種センサ
極限作業 マニピュレータ	機械依存	広範囲・高出力	要熟練	操縦桿
宇宙用 マニピュレータ	機械依存	広範囲・高出力	要熟練	操縦桿
重機・建機	機械依存	広範囲・高出力	要熟練	操縦桿
マスター スレーブ	機械依存	広範囲・高出力	要熟練 高コスト	マスタロボット
手術用ロボット マニピュレータ	機械依存	広範囲・高出力	要熟練 高コスト	マスタロボット
産業用 ロボット	機械依存	広範囲 高出力	要教示	教示用ペンダント
M-HI	機械依存	広範囲・直感的	精度低下	力センサ

1.3 本研究の目的

従来の人間機械系の操作システムにおいて、直感的かつ高出力であるシステムを実現することは非常に難しく、両立するための操縦システムの実現には多大なコスト、あるいは

長時間の訓練時間を必要とした。そこで本研究では、マジックハンドや高枝切り鋏のような、あたかもユーザの腕が延長したかのような、直感的で且つ誰でも扱える操作システムの開発を目指す。上記の要件をまとめ、本研究の目的を以下のように設定する。

1. PAS 任意操作点から、PAS 先端部を操作可能にする。
2. あたかも PAS 先端部から入力し、操作しているような操作感を実現する。

まず目的1に対して、PAS 上の任意点から PAS 先端部を操作可能にする Multi-portal Human Interface(M-HI)の研究開発を行った。M-HI とは、PAS を任意点から操作することで、ユーザ自身の作業領域を超えた普段手の届かない範囲において、あたかも自身の腕が延長したかのように思い通り作業可能とするためのシステムである。本論文においては、PAS を構成するマニピュレータ上の任意点に操作インタフェースとしてのフォーストルクセンサを設け、ユーザはそこに操作力を入力する。

先の人間機械系の操作法分類に基づく、M-HI はユーザの操作入力に対し時間的に同期し、広範囲・高出力の作業を取り扱うことができる。一方で人間機械間の入出力方向が一致しないため、直感的な操作性を損なうことが考えられる。実際に、これまでの研究から PAS 中間関節位置から先端部を操作可能なことを確認している。しかし、その際に操作性が低下することが実験的に明らかとなった。この操作性低下には多くの要因が考えられるが、目的2を達成するためにはこの問題を解決する必要がある。そこで、本研究ではヒトの特性及び、人間機械協調の観点から M-HI 適用 PAS の操作性を改善する。理想とする M-HI 実現のための技術課題を以下に挙げる。

1. 操作点に依らない PAS 操作力の安定化
2. 任意操作点における力覚フィードバック
3. 操作点での人間-機械協調

1点目は、PAS を操作する際のユーザの入力は操作点の変化によって様々な影響を受けることが考えられる。例えば、ユーザが作業時に確認する PAS 先端部及び作業対象物の見え方が、操作点により異なる。人の運動は、その人自身の視覚に大きく影響されることがわかっており、PAS 任意点から操作する場合に、本人は先端部操作時と同様に操作力を入力しているつもりでも異なる操作力を入力してしまうことが考えられる。

同様に、操作点が変化することにより、ユーザが正しく PAS 先端部や作業対象物の遠近感を認識できなければ、位置だけでなく速度においても誤認識し、正しい操作力を入力できないことが考えられる。

さらに、ユーザは人間である以上、PAS の操作習熟には個人差があり、求められる作業に対して的確な入力を行うためには、ユーザの慣れの影響も大きく現れると考えられる。

これらの影響を考慮し操作点に依らない安定な操作力を実現することで、任意操作点においても安全で思い通り操作可能な PAS 操作方法を提案する。

2点目は、PAS としての実際の運用を考えた場合、力の増幅及び作業領域の拡大を施した場合でも、PAS 先端部が周囲環境から受ける影響がユーザが知覚可能となることが望ま

しい。しかし、操作点の自由度はPAS先端部よりも、減少するため、完全なバイラテラル系を構築することは難しい。そこで本研究では先端部及び操作点のインピーダンスに着目し、PAS先端部と操作点の運動をインピーダンスをなるべく近くなるよう制御することで操作性を向上させる。

3点目は、ユーザがPASを思い通りに操作するためには、PAS先端部だけでなくその操作インタフェースである操作点自体もユーザに逆らうこと無く動作することが望ましい。しかし、M-HIを適用した場合のPASの操作点はその自由度の拘束からユーザの入力と異なる方向に動作するため、その動作方向によっては、ユーザの操作力と大きく干渉する場合がある。これにより操作性が大きく損なわれることが考えられる。そのため操作点におけるユーザとPASの干渉を軽減する仕組みを導入することで操作性を向上させる。

1.4 研究の概要

PASにおける任意点からの直感的制御は今まで成された例がなく有意義である。M-HIは従来のPASよりも大きな作業領域を持ち、操作者の力を増幅させるだけでなくリーチも拡大する全く新しいPASのインタフェースシステムである。また、PASの動作制御において操作者の知覚特性と運動特性の両方を考慮し、特に操作者の視空間認識を考慮したPASは他に類を見ない。

本研究の実用化により、重量物運搬作業等においてPASの利点である直感的な操作感を維持しつつ、より安全に作業を遂行可能にすることが期待できる。M-HIはフォーストルクセンサ等の操作入力装置の位置さえ変更できれば、他に特別な装置を用いることなく用意に適用可能である。また、提案したヒトの視線と操作力方向の安定性モデルや、干渉力を用いた操作性評価指標は既存のPASにも適用可能である。

1.5 本論文の構成

第1章 本研究の背景、目的、および概要について述べた。また、提案技術の関連研究としてテレオペレーションシステムとヒューマンインタフェースについてまとめ、本研究の優位性、新規性を述べる。

第2章 本研究の対象である任意点操作可能なPASを実現するマルチポータル・ヒューマンインタフェース(M-HI: Multi-portal Human Interface)について述べる。PASを先端部でなく任意点から操作することにより作業領域拡張という利点があるが、一方で操作点が増えることによる操作性低下の問題が発生する。ここでは、任意点操作による利点と不利点をまとめ直観的な操作を実現するための課題を示す。また、本章では対象とするパワーアシストシステム及び提案するM-HIのシステム構成を示す。M-HI適用PASは任意点に取り付けたフォーストルクセンサへの操作力を入力とし、PAS先端部に α 倍に増幅した操作力を出力する。さらに、実験装置及び実験環境についても併せて説明する。

第3章 操作者のPASへの入力を安定化する手法を述べる。操作者がPASを操作する際作業対象物とPAS先端部を目視により確認しながら操作するが、ヒトの運動特性は視

覚に大きく影響されることがわかっている。PAS 操作における操作者の視覚的な変化と操作力の関係性について解析した結果、操作者の視線方向と操作力方向が直交するような場合操作力方向のばらつきが大きくなることがわかった。この関係をモデル化し操作力を安定化する、ファジィ回帰分析に基づく視空間認識考慮型操作力安定化法 (F-FS-VS : Fuzzy regression analysis based Force Stabilization considering VisuoSpatial recognition) を提案する。実機及びシミュレーションにより評価した有効性を示す。

第4章 PAS 先端部をインピーダンス制御した時、PAS 先端部から操作する場合は、操作者は設定した所望のインピーダンスで動作する先端部の動作を感じながら操作できるが、M-HI により任意点から操作する場合、操作者は設定したインピーダンスと異なるインピーダンスを感じながら操作することになるため操作性が低下する。操作点の運動を先端部と同様のインピーダンスモデルで表した場合の各インピーダンス値を操作点インピーダンスと定義し、操作性への影響を評価した。さらに先端部と異なる操作点インピーダンスを修正し、操作性を向上させる。

第5章 PAS 先端部を制御する際に M-HI を用いて任意点から操作する場合、操作点の挙動と PAS 先端部の挙動は一般には一致しない。そのため、操作性が低下することが考えられる。操作点の運動方向と操作力の方向のずれによる力を操作点干渉力と定義し、それが操作性へ及ぼす影響を評価した。操作点干渉力と操作性の関係からそれぞれの最適化を行う操作点運動協調化 (OPMH : Operational Point Motion Harmonization) を提案した。OPMH を適用した PAS 実機を用いてその有効性を評価する。

第6章 研究の内容に関してまとめるとともに、提案した手法の今後の展開について述べる。

第2章 任意点操作可能な パワーアシストシステム

本章では、本研究の対象である任意点操作可能な PAS を実現するマルチポータル・ヒューマンインタフェース (M-HI : Multi-portal Human Interface) について述べる。PAS を先端部でなく任意点から操作することにより作業領域拡張という利点があるが、一方で操作点が増えることによる操作性低下の問題が発生する。ここでは、任意点操作による利点と不利点をまとめ直観的な操作を実現するための課題を示す。また、本章では対象とするパワーアシストシステム及び提案する M-HI のシステム構成を示す。実験装置及び実験環境についても併せて説明する。任意の自由度のマニピュレータに M-HI を適用する際、利用可能な自由度について検討する。M-HI 適用 PAS は任意点に取り付けたフォーストルクセンサへの操作力を入力とし、PAS 先端部に α 倍に増幅した操作力を出力する。増力比 α と作業領域拡大率の関係を検討し、M-HI 適用による PAS 制御への制限、適用可能領域をまとめる。

2.1 マルチポータル・ヒューマンインタフェース

本研究では、力の増幅だけでなく作業領域も拡大し、且つ直感的に操作可能な PAS の実現を目的とする。具体的には、PAS 上の任意点から PAS 先端部を操作可能にする Multi-portal Human Interface(M-HI) の研究開発を行った。M-HI とは、PAS を任意点から操作することで、ユーザ自身の作業領域を超えた普段手の届かない範囲において、あたかも自身の腕が延長したかのように思い通り作業可能とするためのシステムである。例えば Fig.2.1 に示すような多リンクマニピュレータを用いた PAS を操作する場合、従来では Fig.2.1(a) のように先端部を把持して操作することが一般的であった。本提案手法である M-HI を用いることで Fig.2.1(b),(c) のように PAS 上の任意の点から、PAS 先端部を思い通り操作可能とすることを目的とする。

Fig.2.2 に示すとおり、操作者は PAS の任意の位置 $\mathbf{P}_n$ (マニピュレータ n リンク目) から操作力を入力できる。ここで、HI 位置 $\mathbf{P}_n$ は各リンク座標原点にて示している。また、マニピュレータ手先位置を $\mathbf{P}_h$ 、 $\mathbf{P}_h$ および n リンク目への操作力を $\mathbf{F}_h, \mathbf{F}_n$ とする。マニピュレータは操作力 $\mathbf{F}_n$ もしくは、 $\mathbf{F}_h$ を増幅し、 $\mathbf{F}_\alpha$ として出力する。M-HI は、 $\mathbf{F}_n$ から従来多く見られたエンドエフェクタ付近からの操作力 $\mathbf{F}_h$ を推定する。そして PAS 全体ではその推定手先操作力を増幅し出力する。

2.1.1 手先操作力推定

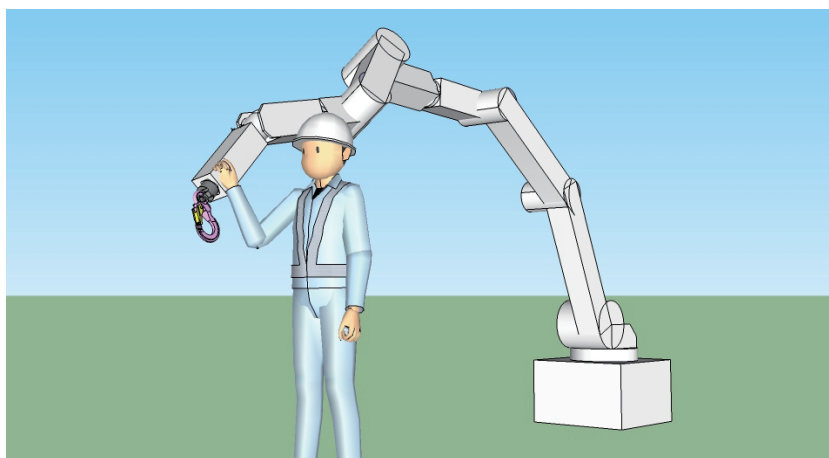
M-HI の入出力の関係を式 (2.1) のように M-HI 関数 $\mathbf{f}_M$ として定義する.

$$\mathbf{F}_h^* = \mathbf{f}_M(\mathbf{F}_n) \quad (2.1)$$

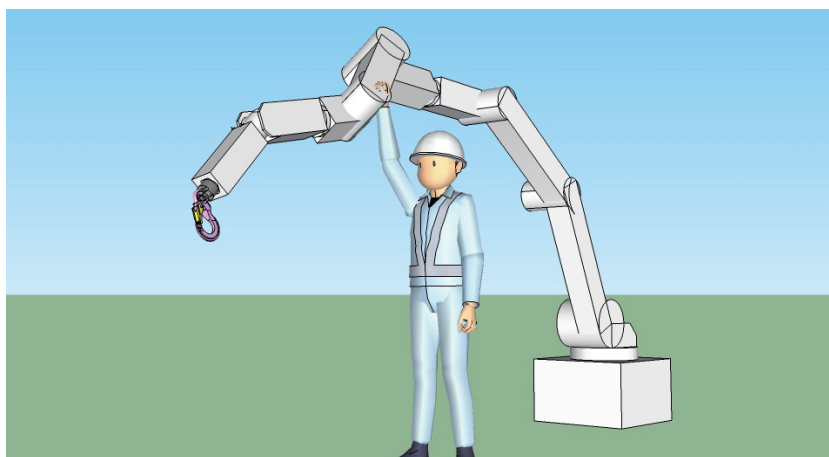
ここで $\mathbf{F}_h^*$ は推定手先操作力を表す. M-HI は PAS のあらゆる部分からの操作入力 $\mathbf{F}_n$ から $\mathbf{F}_h^*$ を推定する. M-HI の前提としてユーザはあたかも先端部から操作しているつもりで操作力を入力するとしている. 推定器 $\mathbf{f}_M$ の振る舞いを決定付ける要素には様々なものが考えられるが, ここでは力の大きさは操作点に依らずほぼ一定になると考え, 主にロボットとヒトの姿勢および位置関係 θ_r, θ_h と, 操作力の方向を決定づける視線 θ_s の影響を大きく受け推定器そのものが逐次変化する $\mathbf{g}_M$ を用いて次式のように設計する.

$$\mathbf{f}_M = \mathbf{g}_M(\theta_r, \theta_h, \theta_s) \quad (2.2)$$

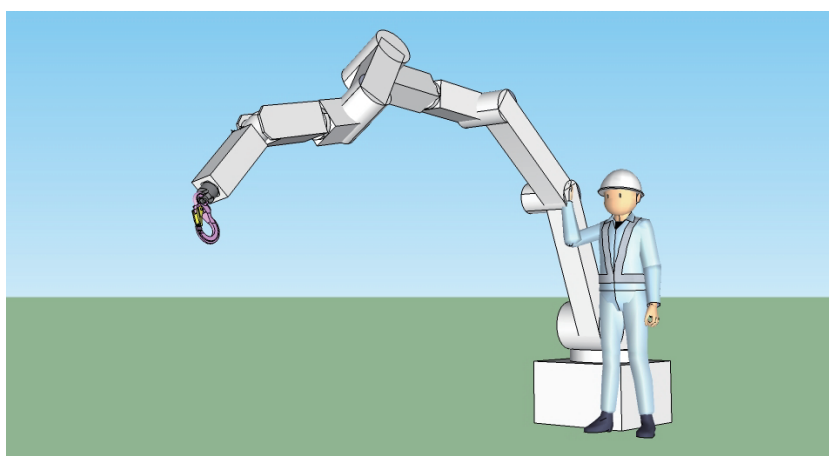
またこの関数は, 手先操作力を推定するため入力に手先操作力自身を用いた場合は入力そのものを出力する.



(a) From end- effector position



(b) From a intermediate joint position



(c) From another intermediate joint position

Fig. 2.1: Multi-link manipulator model of PAS-M-HI allows for control to be exercised from anywhere in PAS.

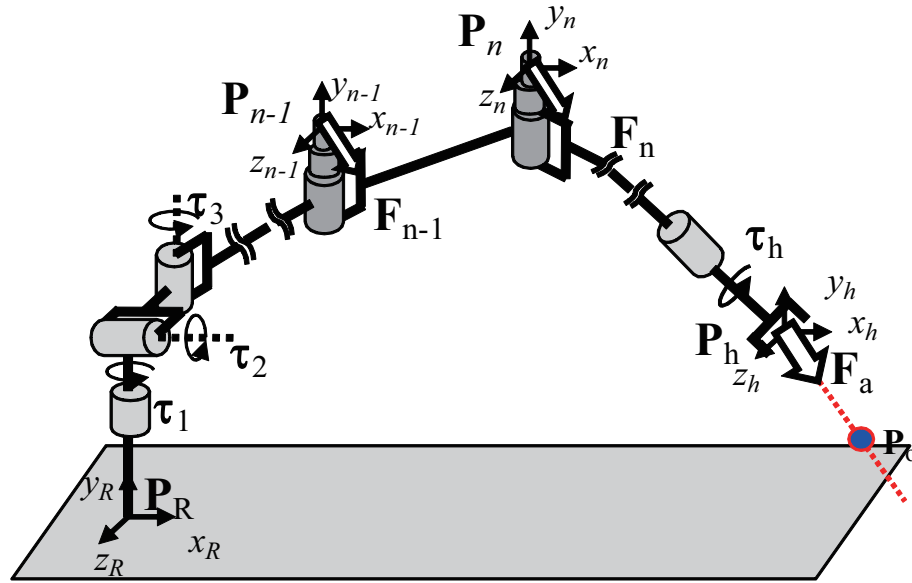


Fig. 2.2: Definition of each parameters of M-HI

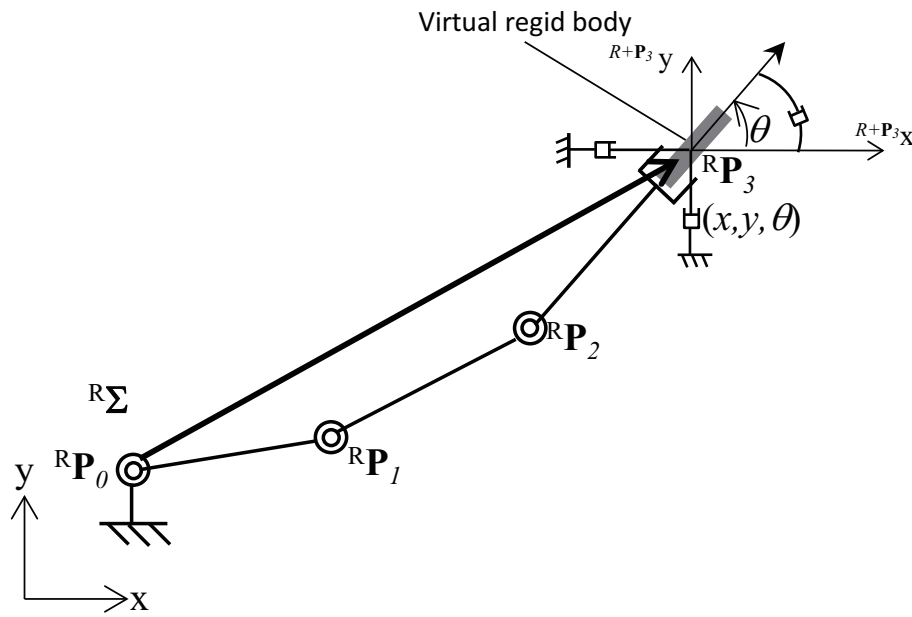


Fig. 2.3: Impedance control for an experimental 3 link PAS

2.1.2 実験環境

本研究における PAS 実機による実験では矢状面上を可動する 3 リンク 3 自由度マニピュレータを用いて M-HI を適用した PAS を構成する. マニピュレータ先端部及び P_2 点にフォース・トルクセンサを取り付け, それぞれから操作力を入力して, PAS 先端部を操作する.

今回使用する 3 リンク PAS の先端部インピーダンス制御のモデルを **Fig. 2.3** に示す. 本実験では, **Fig. 2.3** のように PAS 先端部に設定した仮想剛体の挙動を, センサにより取得した操作力から逐次計算することで操作者の操作力を PAS 先端部に再現する. その手先力を次式に基づくインピーダンス制御を用いて空間に固定された仮想剛体の挙動を計算することで制御する.

$$\mathbf{M}_3 \ddot{\mathbf{r}}_{p_3} + \mathbf{C}_3 \dot{\mathbf{r}}_{p_3} = \alpha \mathbf{F}_h \quad (2.3)$$

$$\mathbf{M}_3 = \text{diag}(m_{3x}, m_{3y}, m_{3\theta}) \quad (2.4)$$

$$\mathbf{C}_3 = \text{diag}(m_{3x}, m_{3y}, m_{3\theta}) \quad (2.5)$$

操作者は操作点に取り付けられたフォース・トルクセンサに, トルクを含む操作力 $\mathbf{F}_h = [F_x, F_y, \tau]^T$ を入力し, PAS 先端部の挙動は式 (2.3) によって与えられる仮想剛体の位置および姿勢 $\mathbf{r}_{p_3}[x, y, \theta]^T$ を逐次算出することで得る. ここで, 式 (2.3) において $\mathbf{F}_h$ は操作力で, α は増力比, $\mathbf{M}$ は慣性係数行列, $\mathbf{r}$ は仮想剛体の位置及び姿勢, $\mathbf{C}$ は粘性係数行列をそれぞれ表す. 本実験では, 慣性係数および粘性係数の値はそれぞれ, $m_{3x}, m_{3y}, m_{3\theta} = 1.8$, $c_{3x}, c_{3y}, c_{3z} = 30.0$, 増力比 $\alpha = 1.0$ とする.

2.2 パワーアシストシステムの増力比と 手先変位拡大率の関係

前節にて, インピーダンス制御による, シリアルリンクマニピュレータを用いたパワーアシストシステムの構築を行った. ここで, 例えば増力比 α を大きくすると, PAS 先端部の発揮力の増幅率が大きくなり, 結果として PAS 先端部の運動も拡大される. M-HI を適用した PAS において, その作業領域がどれだけ拡張されるかは極めて重要である. そこで, M-HI の適用により拡大された作業領域を, 矢状面上に拘束した 3 リンク 3 自由度マニピュレータを用いた PAS の 2 次元空間内での作業領域を例に **Fig.2.4** に示す.

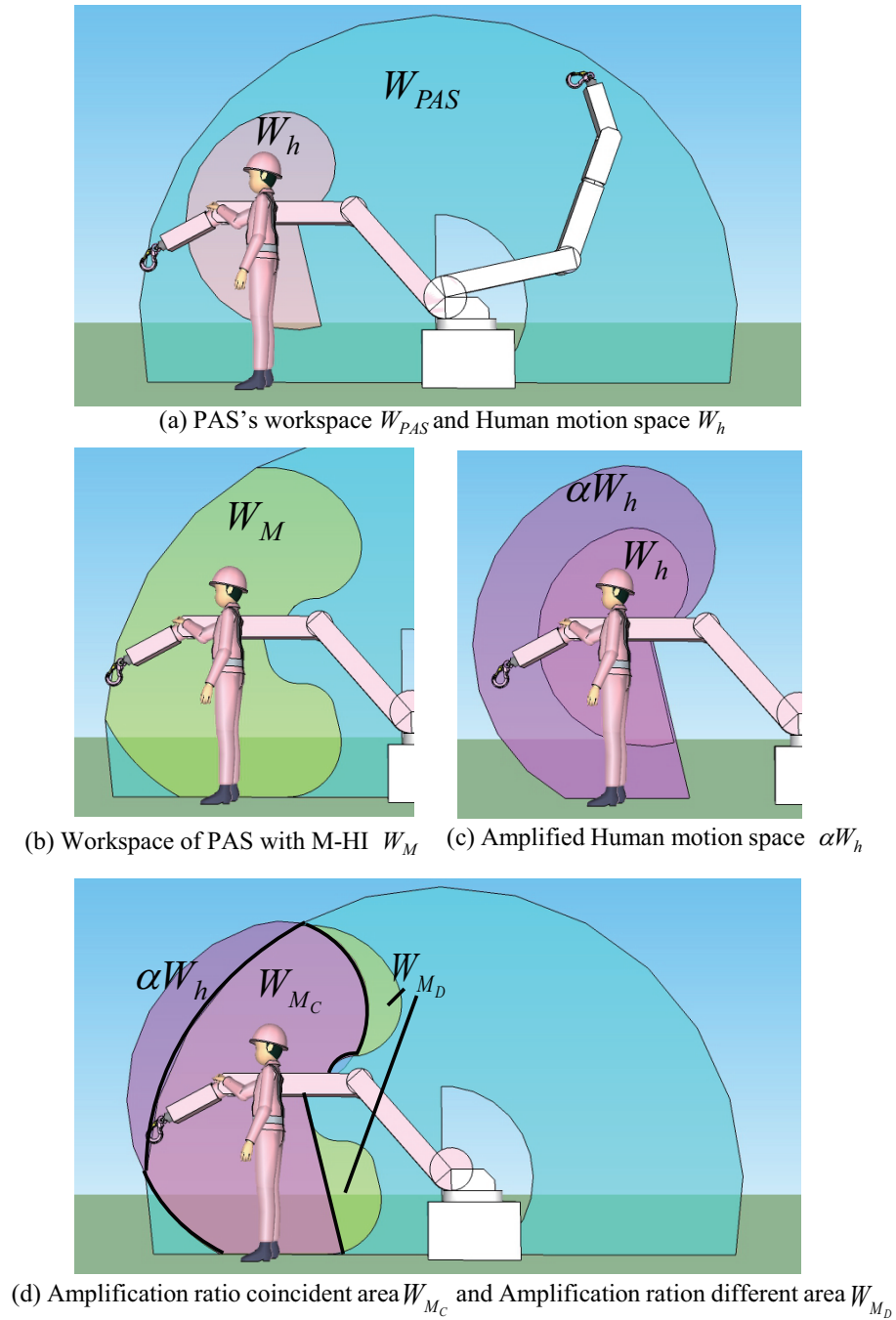


Fig. 2.4: Examples of workspace of PAS with M-HI.

1. W_{PAS} : PAS 自体の作業領域

W_{PAS} は、PAS を構成するマニピュレータの先端部作業領域を示しており、人が先端部を把持して操作する場合でなければ、本来ロボットアームはこれだけの領域を活用することができる。

2. W_h : ユーザの可動域

W_h は、ユーザの可動範囲を示しており、人が PAS 先端部を把持して操作する場合、PAS として有効な作業領域はこの領域内に制限されてしまう。

3. αW_h : α 倍に増幅したユーザの可動域

αW_h は、ユーザの作業領域を α 倍したものであり、PAS 増力比と作業領域拡大比率と一致すると仮定した場合、理論上これだけの作業領域を持つ。

4. W_M : M-HI 適用 PAS の作業領域

W_M は、M-HI を適用し、増力比を α と設定した場合に PAS が利用可能な領域である。

5. W_{M_C} : W_M 内で、増力比と拡大率が一致可能な領域

W_{M_C} は、 $W_M \cap \alpha W_h$ で表される、増力比と拡大率を一致可能な領域である。

6. W_{M_D} : W_M 内で、増力比と拡大率が一致不可能な領域

W_{M_D} は、 $W_M \cap \alpha \bar{W}_h$ で表される、操作点の構造的な拘束により、増力比と拡大率を一致不可能な領域である。

本研究では、まず基本的な M-HI の構築と性能の確認のため、実験環境における作業領域を W_{M_C} の領域内に限定し評価する。

2.2.1 M-HI 適用 PAS の力の増力比 α による PAS 先端部動作拡大効果の確認実験

前節において、3リンク PAS を例に M-HI によって作業領域が拡大可能となる領域を示した。ここではその領域内において実際に作業領域がどの程度拡大されるのかを確認する。式 2.3 によって定義した、インピーダンス制御則において、増力比 α を変化させた場合に、静的な条件において動作が空間的に α だけ拡大されることを確認する。 $\alpha = 1.0$ 及び $\alpha = 2.0$ に設定した場合の 3 リンク PAS を下向きに動作させる。0.05 秒毎の PAS の各姿勢及び先端部の軌跡をシミュレーションにより求め、Fig.2.5 に示す。

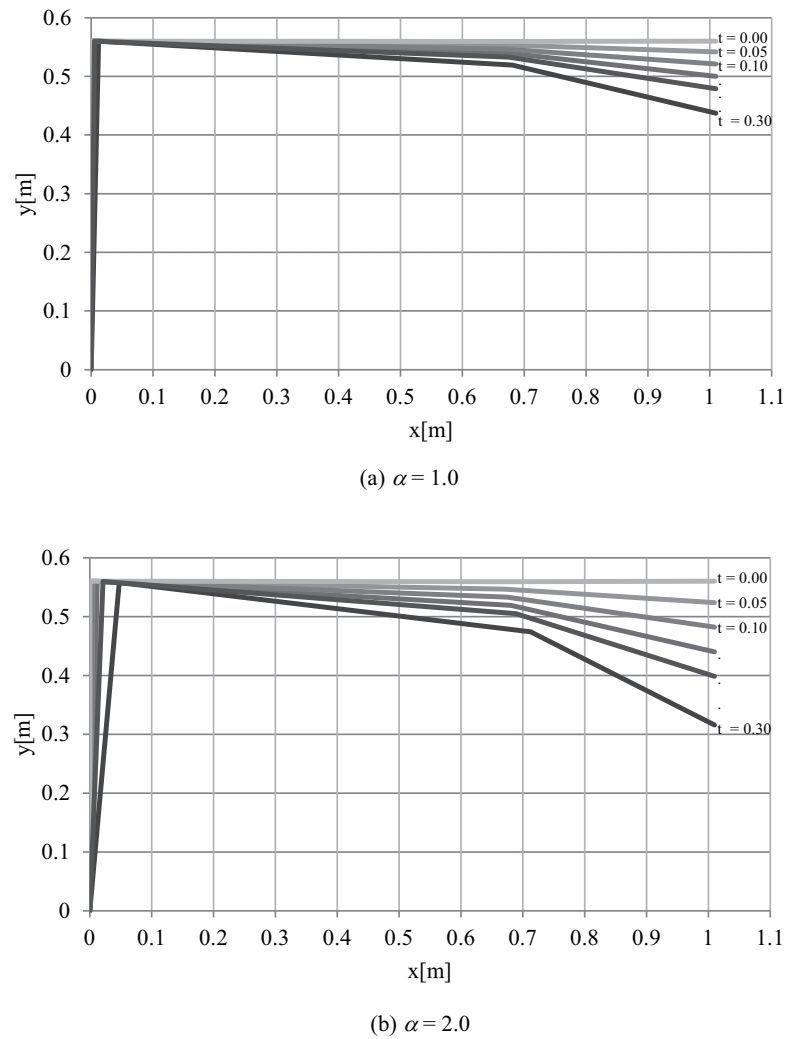


Fig. 2.5: Examples of PAS's posture during a motion by amplification ratio α .

Fig.2.5 より、各時刻において $\alpha = 2.0$ の場合、 $\alpha = 1.0$ に比べて先端部距離にして 2 倍動作していることを確認できる。また、**Fig.2.6** に先端部 y 軸方向の変位の時間変化を示す。**Fig.2.6** より、各時刻において $\alpha = 2.0$ の場合、 $\alpha = 1.0$ に比べて先端部距離にして 2 倍動作していることを確認できる。

次に、第一リンク端 P_1 から操作した場合の性能を確認する。ユーザは P_1 をその動作方向であるリンクと直行する方向に操作力を加える。 $\alpha = 1.0$ の場合先端部は第一リンク長を半径とする円弧を描く。ここで $\alpha = 2.0$ としたときに、PAS 先端部挙動が拡大されることを確認する。

結果を **Fig.2.7** に示す。**Fig.2.7** より、PAS 先端部の運動が α によって拡大されていることが確認できる。

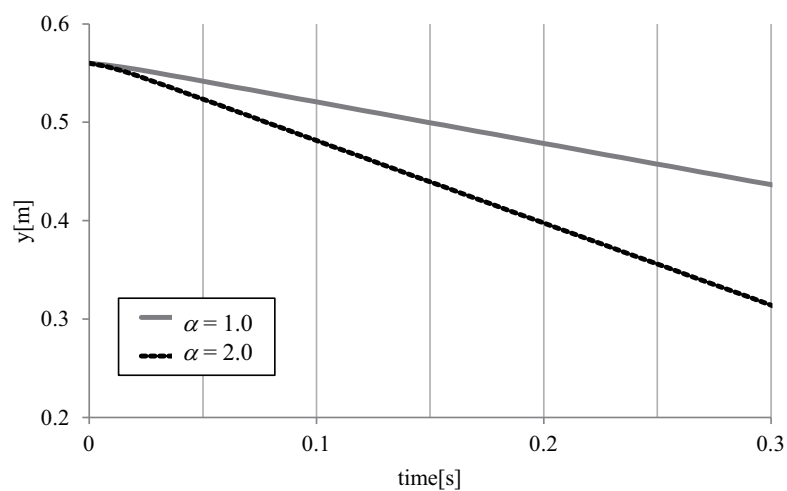


Fig. 2.6: Examples of P_3 position during a motion by amplification ratio α .

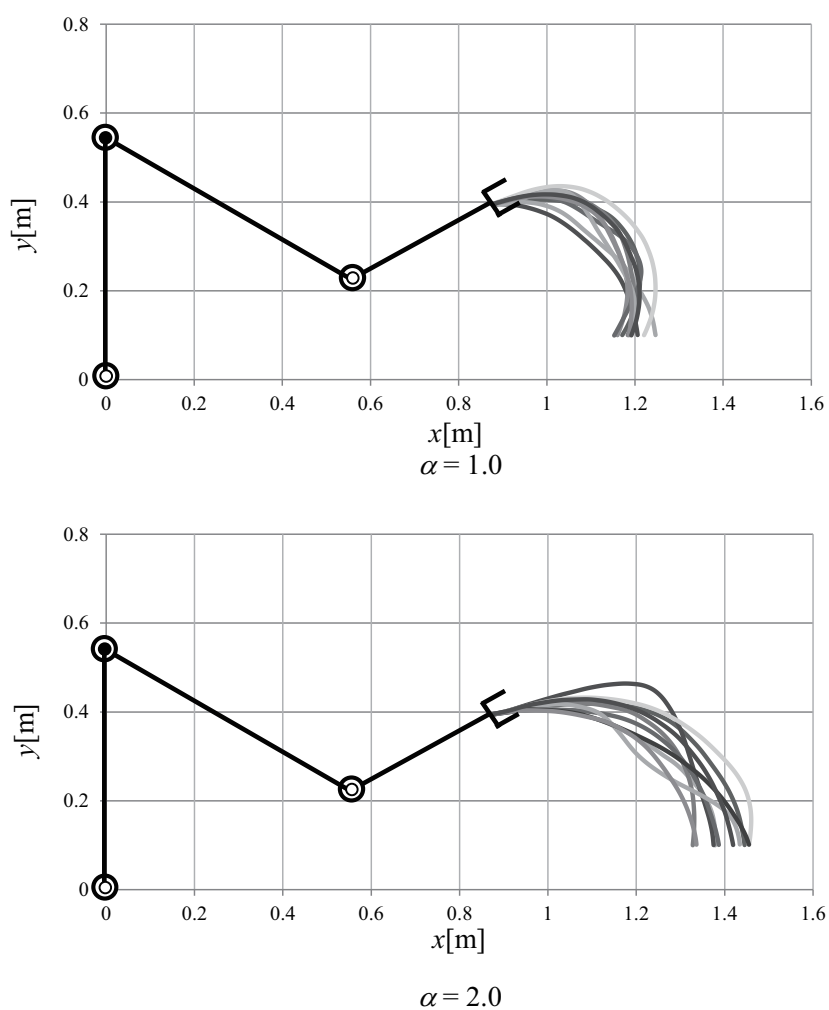


Fig. 2.7: End-effector position orbit of PAS with M-HI by amplification ratio α .

2.2.2 M-HI 適用 PAS の性能評価実験

M-HI では、操作者が任意の操作点から入力した操作力 $\mathbf{F}_h$ を元に PAS 先端部に入力した場合の操作力 $\mathbf{F}_h^*$ を推定する [30]. 今回は提案する自律的な PAS 制御の評価を明確化するため次式に示すように、PAS ベース座標系から見た $\mathbf{F}_h$ と $\mathbf{F}_h^*$ は等しいものと仮定する.

$$\mathbf{F}_h^* = \mathbf{F}_h \quad (2.6)$$

この $\mathbf{F}_h^*$ を PAS の入力に使用することにより、PAS 自体の制御系に変更を加えずに PAS 中間関節からの操作が可能となる.

ユーザは **Fig.2.8** に示す目標経路を追従するように、PAS 先端部を操作する. 各目標経路は 0.25m であり、ユーザは各施行を 10 回ずつ行った. 追従誤差及び、目標到達時間から、増力比 α と操作性についての関係を確認する.

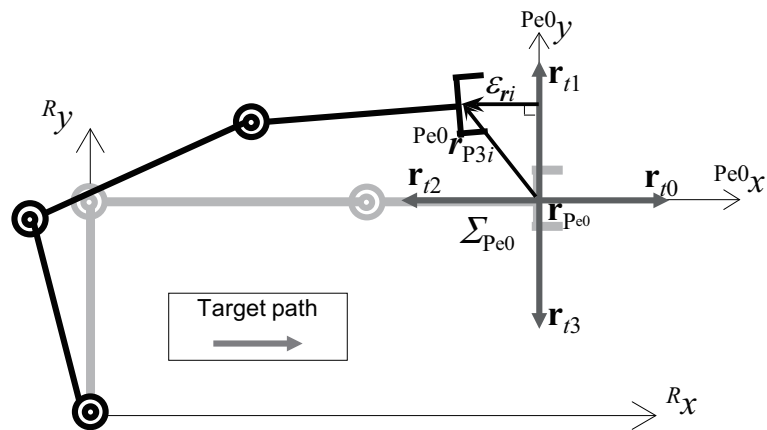


Fig. 2.8: Fundamental maneuverability experiments of the PAS with M-HI.

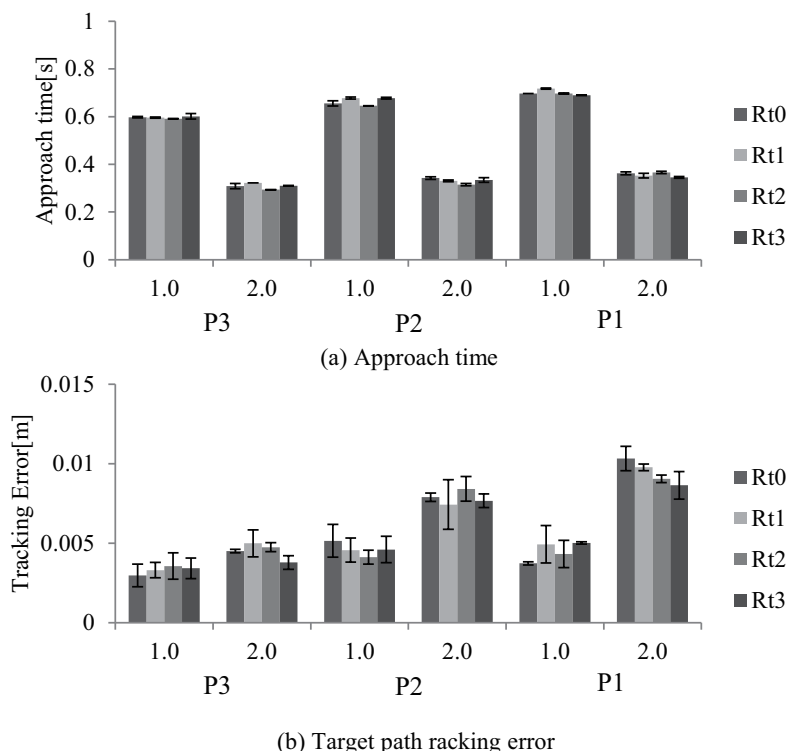


Fig. 2.9: Experimental results of PAS with M-HI by amplification ratio α .

結果を **Fig. 2.9** に示す. 結果 (a) より, 増幅比 α を増やし PAS 先端部発揮力が増加したことにより, 速度が上昇し, 目標位置到達時間が小さくなっていることが確認できる. しかし (b) より, 例え同じ増幅比でも, 操作点により目標経路追従誤差が異なり, 特に PAS 先端部である P_3 よりも, M-HI 適用 P_2, P_1 操作時に誤差が増えており, 操作性が低下してしまっていることが確認できる.

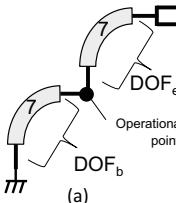
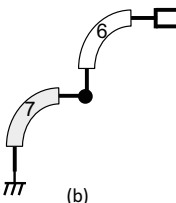
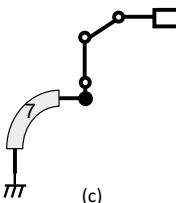
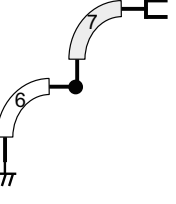
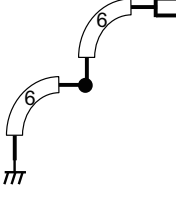
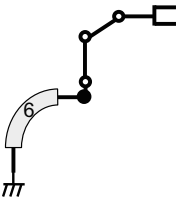
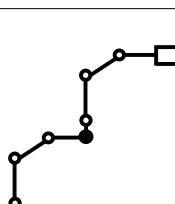
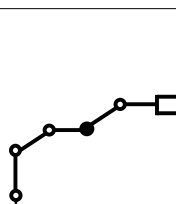
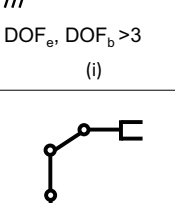
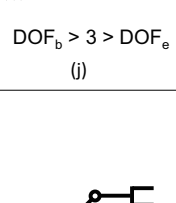
先の実験条件では併進方向において増力比と拡大率が一致するが本実験条件では保証されない. しかし, 増力比と拡大率が一致せず操作性は低下するものの, 任意点から PAS 先端部が操作可能であることを確認した.

2.3 M-HI の3次元空間適用に関する考察

本章では, M-HI の基本的な概念および設計を示し, また増力比と作業領域拡大率について考察した. 本論文では, M-HI の基本的な性能確認および単純化のため PAS の運動空間を2次元の矢状面上に拘束している. しかし実作業に適用する上では, 3次元空間上でのどのような拘束が予測されるかを確認する必要がある. ここでは, M-HI を適用した多リンクマニピュレータに対して, 操作点の設け方によって変化する特性を自由度の観点から考察する. M-HI を適用したマニピュレータのベースから操作点までの自由度を DOF_b , 操作点から先端部までの自由度を DOF_e とする. 3次元空間上での剛体の運動自由度は最大

で6自由度であり，マニピュレータにおいても6自由度以上あれば冗長であり，その手先位置と姿勢に関して無数の組み合わせが考えられる．例えば，人間の腕は空間に対して冗長自由度を持ち，その冗長性を有効に活用し最適な運動を行うことができる．杉本らはロボットマニピュレータを用いてこの冗長特性を解析し，運動学的冗長性及び駆動冗長性を有効活用し手先発揮力や加速度の最適化手法を提案している [31]．

M-HI の適用においても自由度が高ければ高いほど有利であり，自由度が冗長であれば先端部での操作力の増幅と操作点での操作感の再現を自由に行うことができる．**Fig. 2.10** に操作点自由度と先端部自由度の関係をまとめる．

自由度		操作点—先端部 (DOF _e)		
		> 6 (冗長駆動系) PAS発揮力の増幅次元の増加	6	6 > (劣駆動系) 発揮力の増幅次元の減少
ベース—操作点 (DOF _b)	> 6 (冗長駆動系) 操作感の再現性の増加	 (a)	 (b)	 (c)
	6	 (d)	 (e)	 (f)
	6 > (劣駆動系) 操作感の再現性が低下	 (g)	 (h)	 (i)
				 (j)
				 (k)
				 (l)

 Over 6 DOF joint

 6 DOF joint

 1 DOF joint

 Operational point

Fig. 2.10: Available DOF of the PAS with M-HI.

Fig. 2.10 では、横方向に操作点から先端部までの自由度 DOF_e が3次元空間の最大の運動学的自由度6と比較している。 DOF_e は先端部の操作点の運動からは独立した自由度であり、この自由度の冗長性が操作点の運動に関わらず力の増力比と範囲の拡大率を制御可

能かどうかを示している。同様に縦方向では、ベースから操作点までの自由度 DOF_b についてまとめている。 DOF_b は操作点の自由度であり、これが 6 自由度より大きければ操作点において任意の運動を実現可能である。つまり DOF_b は操作感に対する優位性を示す指標となりうると考えられる。

- (a) DOF_e および DOF_b がいずれも 6 より大きい場合である。操作点の運動を任意に決められ、さらに先端部の発揮力も任意の倍率に設定できる。
- (b) DOF_e が 6, DOF_b が 6 より大きい場合である。(a) と同様に操作点の運動を任意に決められ、さらに先端部の発揮力も任意の倍率に設定できる。しかし、 DOF_e が 6 ちょうどであるため、増力比においては (a) の構成のほうがより優位である。
- (c) DOF_b が 6 より大きく DOF_e が 6 より小さい場合である。操作点の運動は冗長駆動系となり任意の操作感を再現しうるが、そこから先の自由度が劣駆動系となるため先端部の運動が操作点に拘束され、必ずしも任意の倍率に設定できない。
- (d) DOF_e が 6 より大きく、 DOF_b が 6 の場合である。(a),(b) と同様に操作点の運動を任意に決められ、さらに先端部の発揮力も任意の倍率に設定できる。しかし、 DOF_b が 6 ちょうどであるため、操作感の再現率においては (a) の構成のほうがより優位である。
- (e) DOF_e と DOF_b とともに 6 の場合である。(a),(b),(d) と同様に操作点の運動を任意に決められ、さらに先端部の発揮力も任意の倍率に設定できるが、(a),(b),(d) のほうが、操作感の再現および増力比について優位である。
- (f) DOF_b が 6 であり DOF_e が 6 より小さい場合である。(c) 同様、操作点の運動は冗長駆動系となり任意の操作感を再現しうるが、そこから先の自由度が劣駆動系となるため先端部の運動が操作点に拘束され、必ずしも任意の倍率に設定できない。
- (g) DOF_b が 6 より小さく DOF_e が 6 より大きい場合である。操作点から先の自由度が冗長駆動系となり操作点の運動によらず任意の発揮力倍率を設定できる。しかし、操作点の自由度が劣駆動系となるため、操作点倍率に対し正確な操作感提示のための運動を設定できない。
- (h) DOF_b が 6 より小さく DOF_e が 6 の場合である。(g) と同様に先端部に任意の発揮力倍率を設定可能だが冗長ではないため、操作点の運動に対する兼ね合いを十分に考慮する必要がある。しかし、操作点の自由度が劣駆動系となるため、操作点倍率に対し正確な操作感提示のための運動を設定できない。
- (i) DOF_e および DOF_b が共に劣駆動系であるが、3 自由度より多い場合を考える。このとき操作点及び先端部の姿勢もしくは位置のどちらかにおいては任意に決めることができ、並進力あるいは位置決めのみに関しては倍率を任意に設定できる。
- (j) DOF_e および DOF_b が共に劣駆動系であるが、 DOF_b のみ 3 自由度より多い場合を考える。このとき操作点の姿勢もしくは位置のどちらかにおいては任意に決めることができ、操作点での力覚提示において、並進もしくは回転において任意設定可能である。

- (k) DOF_e および DOF_b が共に劣駆動系であるが、 DOF_e のみ3自由度より多い場合を考える。このとき先端部の姿勢もしくは位置のどちらかにおいては任意に決めることができ、先端部の発揮力について倍率を任意に設定可能である。
- (l) DOF_e および DOF_b が共に劣駆動系でかつどちらも3自由度よりも少ない多い場合を考える。このとき操作点及び先端部の姿勢もしくは位置のどちらも任意に決めることは出来ないため、用途において機能を制限し使える自由度の中で最大の効果を発揮するよう調整する必要がある。

実際のマニピュレータは有限の自由度を持ち、冗長性を持つにしても操作点両側に6自由度以上持つということはあまり考えられない。そのため(a)-(h)までの状況に比べ(i)-(l)の状況の方がより現実的である。本論文では、矢状面上に固定した計3自由度のマニピュレータを用いるため、(l)の極めて自由度の少ない状況でそれでも思い通り操作できるよう自由度の拘束から生じる操作性の低下問題に取り組む。この状況が自由度にかんしていうと最低の環境であり、この状況下でのM-HIの性能を保証できれば、今後より自由度の高い(i)-(k)や、(a)-(h)の状況において直感的な操作インタフェースとして改良の余地があると言える。

2.4 第2章のまとめ

本章では、我々の提案するM-HIの概念の提案及び、基本的な実装における性能評価を行った。矢状面上を動作する3自由度PASに対しM-HIを適用した場合、第一リンク端 P_1 から操作した場合で先端部操作時の作業領域と比べて約5倍、中間点操作時でも約2倍の作業領域の拡大を実現した。

また操作性評価に関しては、第1章にて示した、目標及び技術課題に対する前提条件を以下に示す。

目的1に関しては、M-HIにおいて拡大した作業領域での、PAS性能について検証する必要があるが、今回は基本的な性能の評価のため、 W_{MC} 領域においてのみ操作性評価を行った。

また、M-HIを任意リンク数のマニピュレータへ適用する場合に、操作点をどこに設けるかによってどのような拘束が予測されるかを検討した。本論文では、自由的には考えられる最もシビアな状況を想定しているが、同時に適用するマニピュレータへの要求は最も少ないことを意味している。本論文のような運動学的自由度の制限が非常に大きな状況でもM-HIの有効性を示すことにより、実際により多自由度のハードウェアに対して適用する際にはよりよい性能を期待できる。

次章以降では目的2の各技術課題について1つ1つ解決策を提案する。課題1については、PAS先端部及び作業対象物に対するユーザの視空間認識特性を考慮して、操作力の安定化を行う。

速度認識に関しては、操作点変更によるユーザの立ち位置が変わることにより、実験中のPAS操作においては、安全性の面も考慮し十分に速度が遅いものとし、ユーザ立ち位置における速度認識の変化は十分に小さいものとする。

慣れの影響に関しては，本研究では基本的な理論の確認のため被験者を限定し，十分に取り扱いに慣れているという条件を設定することで，被験者間のばらつきの影響を抑え，再現性を確保する．

課題 2,3 については，最終的に PAS 先端部を用いて作業する際に先端部及び操作点の外界との相互作用について検討する必要があるが，本研究では，その前段階として先端部を思い通りに操作可能かどうかについて検証するため，実験における操作は全て無負荷状態の PAS 先端部運動を用いて評価する．

第3章 視空間認識の分解能を考慮した パワーアシストシステムの 操作力安定化

本章では、操作者の PAS への入力を安定化する手法を述べる。操作者が PAS を操作する際作業対象物と PAS 先端部を目視により確認しながら操作するが、ヒトの運動特性は視覚に大きく影響されることがわかっている。PAS 操作における操作者の視覚的な変化と操作力の関係性について解析した結果、操作者の視線方向と操作力方向が直交するような場合操作力方向のばらつきが大きくなることがわかった。この関係をモデル化し操作力を安定化する、ファジィ回帰分析に基づく視空間認識考慮型操作力安定化法 (F-FS-VS : Fuzzy regression analysis based Force Stabilization considering VisuoSpatial recognition) を提案する。実機及びシミュレーションにより評価した有効性を示す。

3.1 PAS における安定な制御

多くの PAS はユーザの操作力をセンサで感知し、ユーザの意図した力を増幅することで作業効率化や負担軽減を行う。しかしながら、ユーザの安全性を確保しつつ、補助性能を向上するためには、まず PAS を安定に制御する必要がある。それを実現するための手法として、大きく制御技術とセンサ技術の 2 つの要素から研究されている。

前者の制御技術に関するものとして、PAS を構成する機械系を安定に制御する方法がある。例えば、三好らは天井クレーンを用いた PAS [15] において制御対象の力学的特性に最適化した制御を行うことで、その操作性と安全性を向上させている。他にも Kazerooni ら [32] や、金岡ら [33] 等、多くの安定化制御が提案されている。後者のセンサ技術に関するものとして、安定した操作力の計測・処理方法がある。計測ノイズの低減方策は当然のことであるが、PAS におけるノイズの扱いはユーザへの動作の妨害を引き起こし、危険につながる可能性があるため、特に慎重を要する。これらを防ぐためにはセンサ入力に対するフィルタリング (例えば、関ら [34]) やノイズの少ない高価なセンサを使用しなければならない。

ところで、PAS の挙動はユーザである人間の運動と直結しており、安全な PAS を構築するためには、人間の運動特性をまず明らかにし、その特性を考慮して PAS の安定出力を生成していくことが有効と考える。人間の運動は様々な要因、例えば人の姿勢や視線の影響を受けることが過去の研究から確認されている。例えば、大野ら [35–37] は視線の変化が人間の運動に影響を及ぼすことを明らかにしており、

また、武居ら [38, 39] はロボットアームを用いた人間機械系の操作特性として、操作力方向に応じて手ぶれの度合いが変化することを確認し、実験的に手ぶれ補正アルゴリズム

を開発している．しかし，手ぶれの要因については述べられていない．

そこで，本研究は手ぶれ等の操作力を不安定にする要因について，PAS 操作時において，ユーザが PAS 先端部と作業対象物を見比べながら操作することを鑑み，ユーザの視線方向が及ぼす影響について，定量的に検討する．その解析結果から，ユーザの視線方向と運動特性の関係を考慮して PAS 操作入力 of 安定化を試みる．そのために，我々はユーザの視線の変化を逐次反映した視空間認識考慮型操作力安定化法 (Force Stabilization considering VisuoSpatial recognition: FS-VS) を提案する．特に，ここではファジィ回帰分析に基づいた FS-VS として，F-FS-VS(Fuzzy regression analysis based FS-VS) を提案する．

3.2 ユーザの視線方向と運動特性の関係

人間の運動へ影響を与える要素としては様々な要因が挙げられる．例えば，視線が運動に影響を及ぼしたり [40, 41]，上体姿勢が発揮力に影響する [42–44] ことが知られている．また，空間知覚特性，特に奥行き方向には，距離に応じて空間分解能が疎になることが知られており [45–50]，PAS のようにユーザと協調して動作する人間機械系の制御においては，ユーザの視線と操作方向を考慮することが重要であると考えられる．

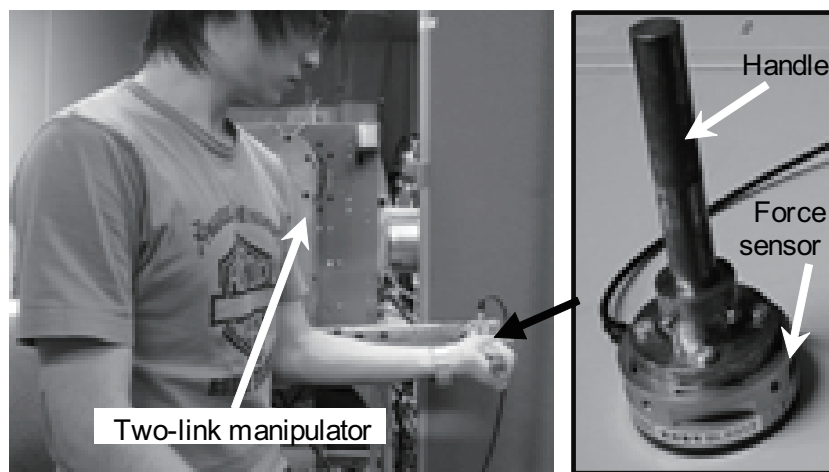


Fig. 3.1: Experimental PAS device and force sensor.

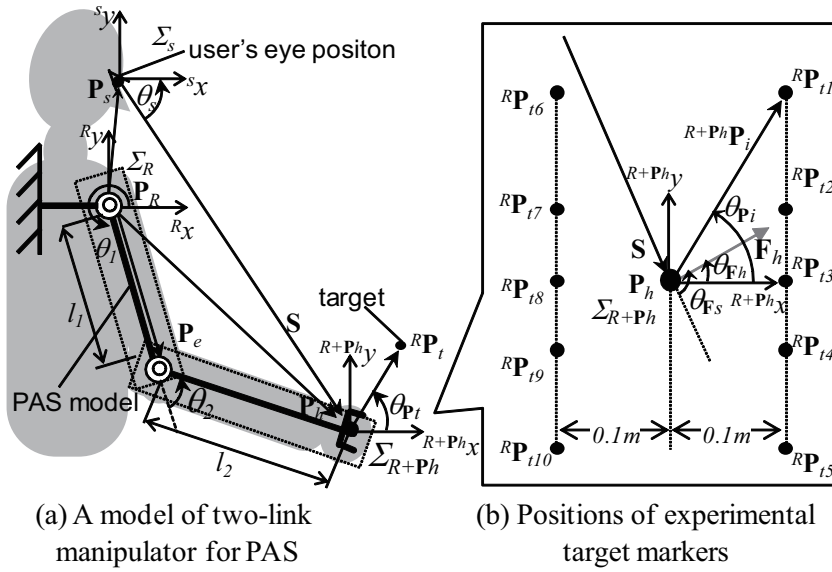


Fig. 3.2: A PAS model and definitions for the experimental parameters.

Table 3.1: Specifications of PAS

Manipulator	Part	Upper arm	Front arm
	Weight [kg]	5.1	3.4
	Length [m]	0.3	0.35
Actuator	Position	Shoulder	Elbow
	Torque rating [N·m]	1.274	0.637
	Rated revolution [rpm]	3000	3000
Force sensor	Load limitation [kgf]	10.0	-
	Accuracy [%]	±1.0	-
	Resolution [gf]	10.0	-

Table 3.2: Experimental parameters

Parameters	Definition	Initial value
θ_1	1st link angle	$-90deg$
θ_2	2nd link angle	$90deg$
${}^R\mathbf{P}_h$	End-effector position	$(0.35m, -0.3m)$
${}^R\mathbf{P}_e$	Intermediate joint position	$(0.0m, -0.3m)$
$\mathbf{F}_h$	Operational force	-
θ_{F_h}	Operational force direction	-
${}^R\mathbf{P}_{ti}$	Target positions	-
$\mathbf{P}_s$	Eye position	$(0.0m, 0.3m)$

Table 3.3: Experimental posture combinations of PAS

$\theta_1[deg], \theta_2[deg]$	$\theta_1[deg], \theta_2[deg]$	$\theta_1[deg], \theta_2[deg]$
$(-90, 120)$	$(-90, 90)$	$(-90, 60)$
$(-60, 120)$	$(-60, 90)$	$(-60, 60)$
$(-60, 30)$	$(-30, 120)$	$(-30, 90)$
$(-30, 60)$	$(-30, 30)$	-

3.2.1 実験環境

ユーザの視線方向と操作力の方向の関係を実験的に調べる．本研究ではパワーアシストスーツのような装着型 PAS ではなく，エアバランサ等のような非装着型 PAS 想定し，矢状面上を動作する 2 自由度 2 リンクのマニピュレータを用いて PAS を構成する．**Fig. 3.1** に PAS 及びセンサ外観を，**Table 3.1** に PAS 構成部品諸元を示す．ハンドルを持つ 6 軸力センサを PAS 先端部に取り付け，PAS 運動平面の 2 次元操作力 $\mathbf{F}_h$ を計測できるようにした．

習熟度による操作性への影響は今後の研究課題であるが，本実験ではその影響を排除するため，本 PAS の操作に十分習熟している 20 代男性 1 名を被験者とした．被験者は裸眼視力 0.1，矯正視力 1.5 であり実験はすべて眼鏡を着用し行った．姿勢を固定した PAS に

対して操作力 $\mathbf{F}_h$ を入力しその値を計測する．実験に使用した PAS 内の座標系の設定及びパラメータを **Fig. 3.2**, 及び **Table 3.2** に定式化する．**Fig. 3.2(a)** は PAS とユーザの位置関係及び座標系を示す．また, **Fig. 3.2(b)** は PAS 先端部の拡大図であり, 操作力計測実験におけるターゲットマーカの位置関係及び操作力等のパラメータを示す．

計測環境として, まず, ユーザの左腕に沿って PAS を設置する．左肩付近に PAS ベース座標系 Σ_R , 左肘付近に PAS 中間関節 $\mathbf{P}_e$, 左掌中央付近に PAS 先端部座標系 $\Sigma_{R+\mathbf{P}_h}$, ユーザの眼の位置に視線座標系 Σ_s を設置する．すべての x 軸は水平, y 軸は鉛直上向きとする．

実験時の各ターゲットマーカ (それぞれの位置を ${}^R\mathbf{P}_{ti}$ で表す) と PAS 先端部の相対位置をベクトル ${}^{R+\mathbf{P}_h}\mathbf{P}_i$ とし, ${}^{R+\mathbf{P}_h}x$ 軸との成す角度 $\theta_{\mathbf{P}_i}$ を定義する．PAS 先端部 ${}^R\mathbf{P}_h$ から水平方向に $\pm 0.1m$ に位置したポール上に $\theta_{\mathbf{P}_i}$ が $-180deg \sim 180deg$ の中で $30deg$ 毎になるように大きさが無視できるターゲットマーカを各ポールに 5 個ずつ配置する． i 番目のターゲットマーカの位置ベクトル ${}^R\mathbf{P}_{ti}$ は次式で与えられる．

$${}^R\mathbf{P}_{ti} = {}^R\mathbf{P}_h + {}^{R+\mathbf{P}_h}\mathbf{P}_i \quad (3.1)$$

$$\mathbf{P}_i = \begin{cases} (0.1, 0.1 * \tan \theta_{\mathbf{P}_i}) & (i=1 \sim 5) \\ (-0.1, 0.1 * \tan \theta_{\mathbf{P}_i}) & (i=6 \sim 10) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\theta_{\mathbf{P}_i} = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6}i & (i=1 \sim 5) \\ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6}(i-5) & (i=6 \sim 10) \end{cases} \quad (3.3)$$

3.2.2 実験条件

操作力 $\mathbf{F}_h$ の計測方法は次の通りである．本研究では, 部品の組み付け等の正確な位置決めが必要な, 作業領域の小さな作業を想定しており, 作業中ユーザの頭部は動かないものとする．そこで, 視線と操作力以外の影響を排除するため, ユーザには作業課題として, 椅子背もたれに背中を接着させ, 頭部の位置・姿勢を変化させずに, PAS ハンドルを逆手に把持し, PAS 先端を注視しながらターゲット方向へなるべく一定の大きさの操作力を出すことを要請した．マニピュレータの姿勢を固定した静止状態で, ユーザの操作力 $\mathbf{F}_h$ を 1 試行あたり 2 秒間で 5 回計測する．PAS の姿勢を 11 通りに変化させ同様に $\mathbf{F}_h$ を計測する．PAS の各姿勢での各関節角度を **Table 3.3** に示す．試行回数は合計で 11 姿勢 $\times$ 10 ターゲット $\times$ 5 回 = 550 試行である．また, $\mathbf{F}_h$ のサンプリングタイムは $2.5ms$ であり, 1 試行あたりのデータ数は 800 である．各試行において操作力の大きさ $|\mathbf{F}_h|$ 及び操作力方向 $\theta_{\mathbf{F}_h}$ を測定する．

3.2.3 実験結果

Fig. 3.3 は, PAS 姿勢を固定して一定のターゲット方向に入力した操作力の大きさ $|\mathbf{F}_h|$ と方向 $\theta_{\mathbf{F}_h}$ 及び $\theta_{\mathbf{F}_h}$ のヒストグラムの例を示す．同図より, ターゲット方向によって操作力方向の分布のばらつきが異なっていることが確認できる．

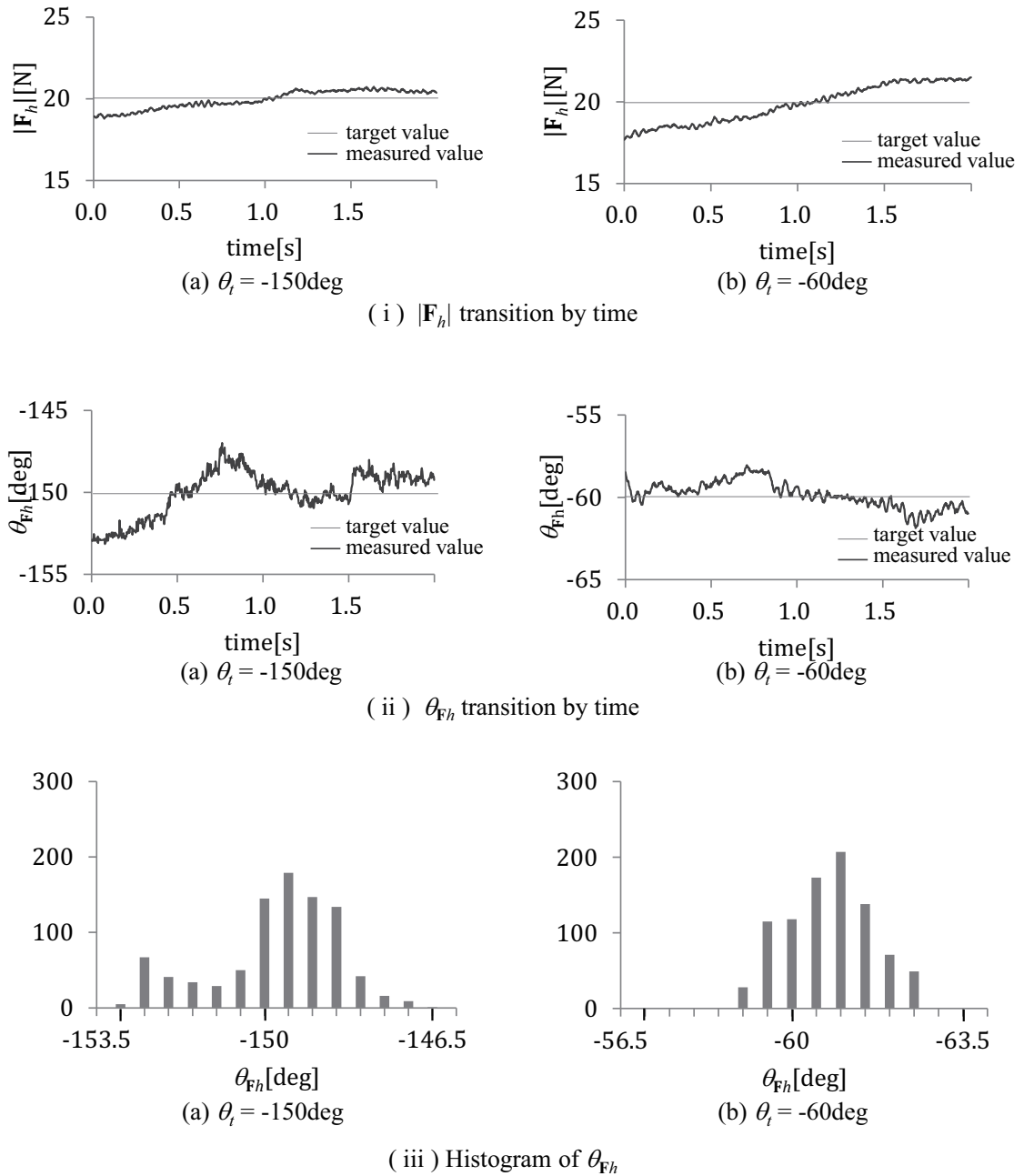


Fig. 3.3: Examples of experimental results of operational force.

さらに、**Fig. 3.4, 3.5** は3つのPAS姿勢を例に、各ターゲットに向けた操作力方向のばらつきをレーダチャートに表している。また、ヒストグラムも併せて示した。PAS各姿勢によって操作力方向のばらつきの傾向が変化していることがわかる。また、 χ^2 検定により分布の正規性が確認されたので、以下、操作力方向分布を正規分布に近似して扱う。

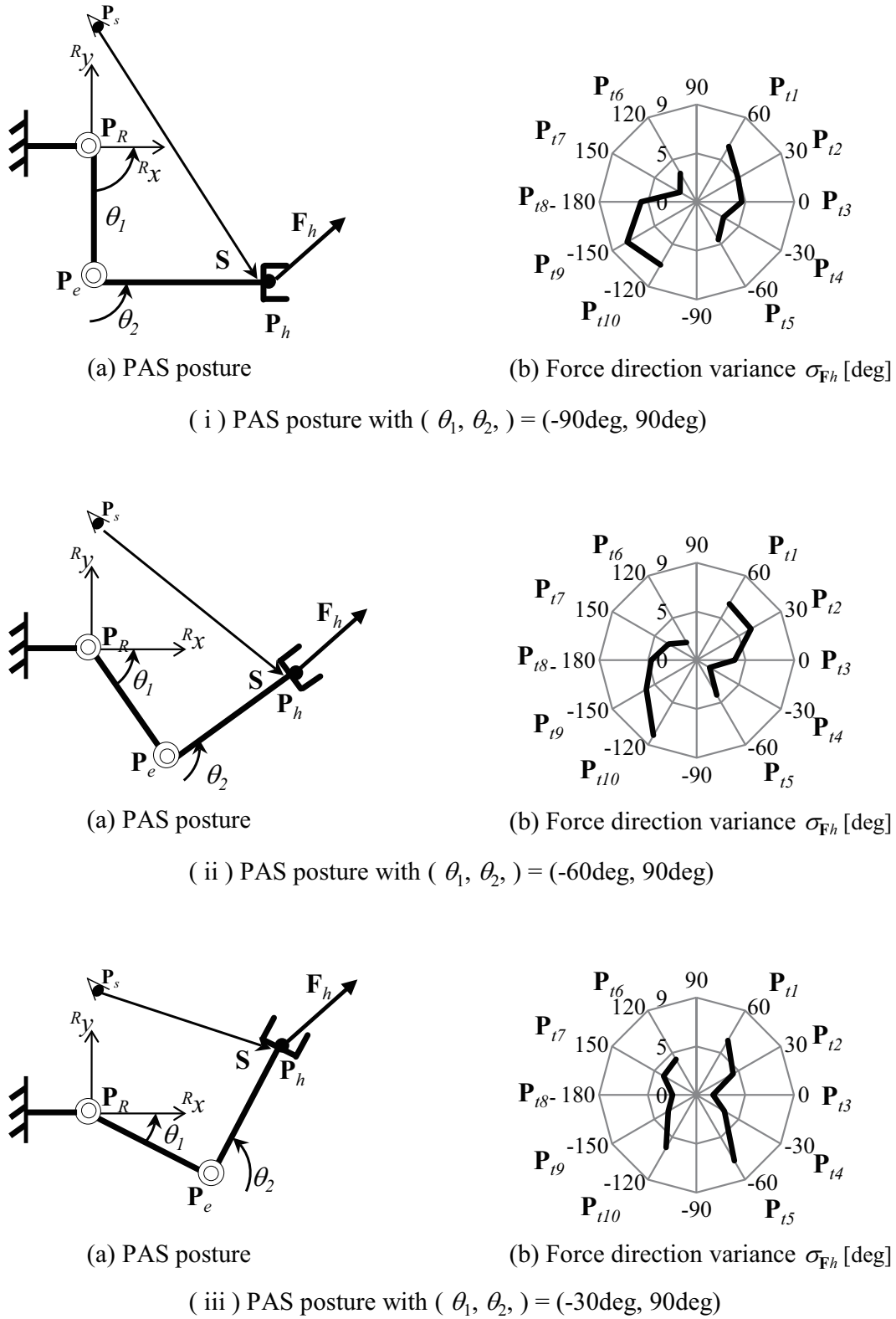
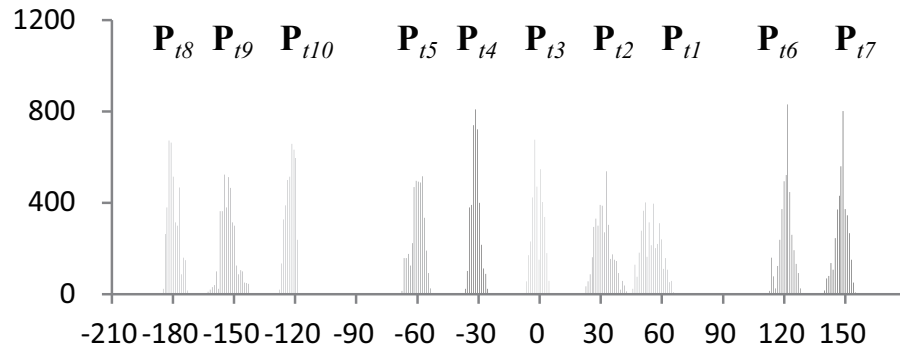
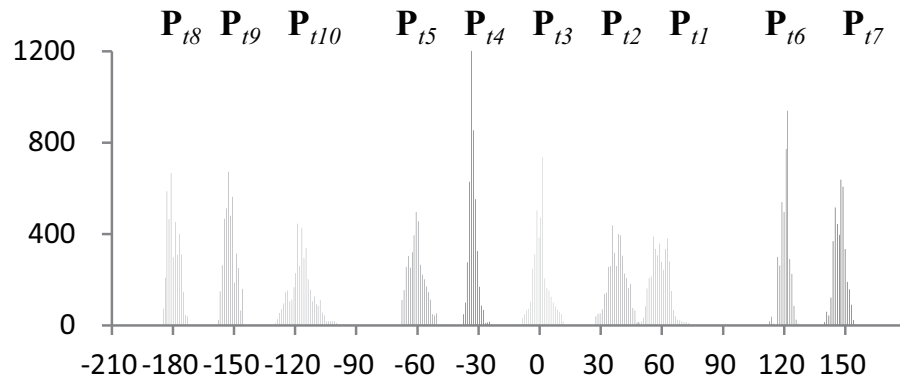


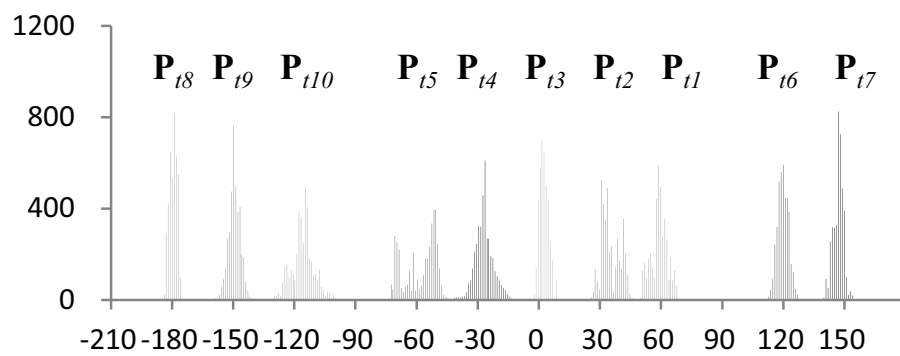
Fig. 3.4: Force direction variance as PAS with cobweb chart.



(i) PAS posture with $(\theta_1, \theta_2) = (-90\text{deg}, 90\text{deg})$



(ii) PAS posture with $(\theta_1, \theta_2) = (-60\text{deg}, 90\text{deg})$



(iii) PAS posture with $(\theta_1, \theta_2) = (-30\text{deg}, 90\text{deg})$

Fig. 3.5: Force direction variance as PAS with cobweb chart.

3.2.4 視線を考慮した操作力方向のばらつきの解析

実験条件より、ユーザはPAS先端部を注視しているため、ユーザの視線はPASの姿勢変化に伴うPAS先端部位置によって変化している。そこで、ターゲット及びPAS姿勢の変化における操作力方向のばらつきの違いをユーザの視線方向という観点から解析する。

ユーザの視線方向をFig. 3.2(a)に示すように、 Σ_s 原点 (視線原点) $\mathbf{P}_s$ から $\Sigma_{R+\mathbf{P}_h}$ 原点 (視線終点) $\mathbf{P}_h$ を結ぶ視線ベクトル $\mathbf{S}$ と $^s x$ 軸との成す角度 θ_s で表し、操作力 $\mathbf{F}_h$ と $\mathbf{S}$ の成す角度を視線差 θ_{F_s} として定義する。視線差は次式で表される。

$$\theta_{F_s} = \theta_{F_h} - \theta_s \quad (3.4)$$

全11通りの各PAS姿勢において、10方向のターゲットに向けた操作力方向のばらつきを標準偏差 σ_{F_h} として求めた。視線差 θ_{F_s} を横軸に、操作力方向のばらつき σ_{F_h} を縦軸にとったグラフがFig. 3.6である。統計的にばらつきはあるものの σ_{F_h} は θ_{F_s} が $\pm 90\text{deg}$ 付近のとき極大となり、 0deg および $\pm 180\text{deg}$ のとき極小値を取る傾向があることがわかる。この傾向は視線方向と操作方向が一致するとき、すなわち視線に沿って手先を動かすとき操作力は安定し、一方、手先の運動が視線に直交するようになると操作力は定まりにくくなると考えられ、日常の経験とも合致する。このことはユーザの視線中心から離れるほど視覚の弁別度が低下し、空間知覚における分解能が低下するという畑田らの研究成果 [51] からも妥当であると言える。

センサの公称精度より操作力方向の誤差は 0.6deg 未満であり、 σ_{F_h} の変化の範囲と比較して十分に小さく無視できるものであり、以下の考察が成り立つと考える。

操作力方向のばらつき σ_{F_h} のユーザの視線差 θ_{F_s} に対する関係は次式で表現できるものとする。

$$\sigma_{F_h}(\theta_{F_s}) = a \cos(2\theta_{F_s}) + b \quad (3.5)$$

式 (3.5) をユーザの視線と操作力方向との関係による操作力方向のばらつき、すなわち不安定性モデルとする。本被験者にパラメータ a, b を適合させた場合、それぞれ $-3.6, 5.3$ となった。個人差に関しては今後さらに検討すべき課題であるが、現段階では、他のユーザに適用するためにはパラメータ a, b をユーザ毎に適合する必要がある。次章にて、この不安定性モデルを用いて、PAS操作力安定化のためのアルゴリズムを提案する。

3.3 ファジィ回帰分析を用いた 視空間認識考慮型操作力安定化法

前述の σ_{F_h} と θ_{F_s} の関係に基づき操作力方向を安定化する、視空間認識考慮型操作力安定化法 (Force Stabilization considering VisuoSpatial recognition: FS-VS) を提案する。

1次元ファジィ回帰分析に基づき、ファジィ推定器を用いて操作力方向を推定することによって、操作力方向のばらつきを抑え、安定化することが期待できる。ファジィ回帰分析は区間推定法と等価であることが知られている [52–56] が、1次線形区間推定と比較す

ると信頼区間が可変なため、入力データのばらつきに応じた、より精度の高い推定が行える。そこで、我々はファジィ回帰分析に基づいた FS-VS として、F-FS-VS(Fuzzy regression analysis based FS-VS) を提案する。

Fig. 3.7 にて、あるターゲット $\mathbf{P}_t$ への手先の移動を PAS に支援されながら行うユーザを例に F-FS-VS の作用を示す。同図 (a) は初期姿勢、(b) は同一の運動の途中状態の例を表している。ここで (a) 及び (b) に示す $\theta_{\mathbf{P}_t}$ は Fig.3.2(a) と同様に $\Sigma_{R+\mathbf{P}_h}$ におけるターゲット方向角を表す。

ファジィ回帰分析を行った場合、Fig. 3.7(ii) に示すとおり線形 1 次の区間推定よりも信頼区間が小さくなる。今回は操作力方向のばらつきを視線差 $\theta_{\mathbf{F}_s}$ の三角関数によって近似しているため、その振幅項とオフセット項の割合によって信頼区間が変化するが、理論的には最大で 50% もの信頼区間の差が生じる。ファジィ回帰分析の際の信頼区間の形状はその PAS 姿勢での視線方向 θ_s に依存している。

以下に F-FS-VS のアルゴリズムを示す。操作入力方向 $\theta_{\mathbf{F}_h}$ から安定化操作力方向 $\theta_{\mathbf{F}_h}^*$ を Min-Max-重心法を用いた多重ファジィ推論によって求める。前件部のメンバシップ関数 μ はガウス関数を用いて次式によって定義する。

$$\mu(\theta_{\mathbf{F}}, \theta_{\mu}, \sigma_{\mathbf{F}_h}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\mathbf{F}_h}} \exp\left(-\frac{(\theta_{\mathbf{F}} - \theta_{\mu})^2}{2\sigma_{\mathbf{F}_h}^2}\right) \quad (3.6)$$

ここで、 $\theta_{\mu}, \sigma_{\mathbf{F}_h}$ はメンバシップ関数のパラメータであり、それぞれ正規分布の平均と標準偏差を表している。多重ファジィ推論により次式 (3.7-3.9) から安定化操作力方向 $\theta_{\mathbf{F}_h}^*$ を求める。

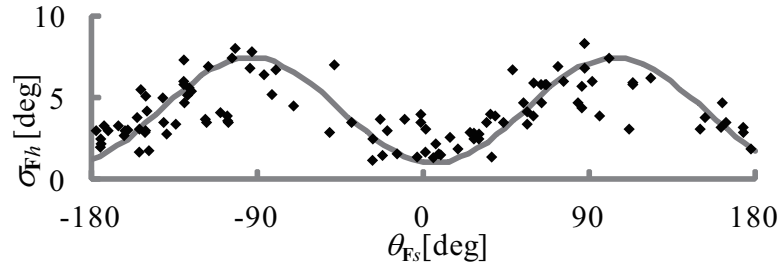
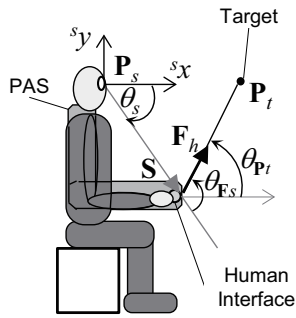
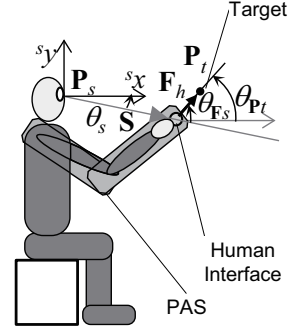


Fig. 3.6: $\sigma_{\mathbf{F}_h}$ as analyzed on the basis of $\theta_{\mathbf{F}_s}$.

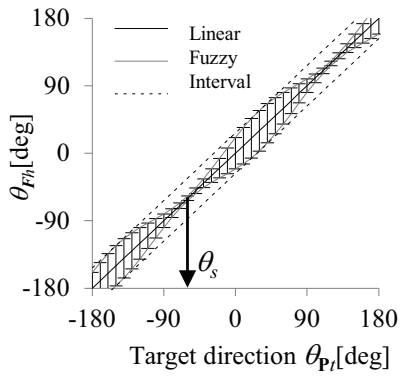


(a) (θ_1, θ_2) = (-90deg, 90deg)

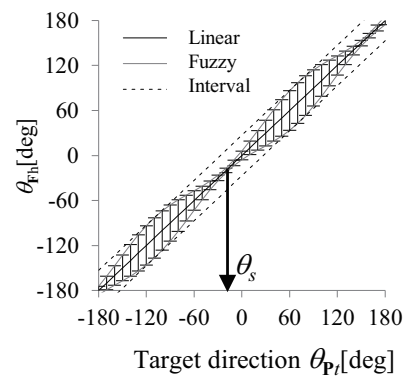


(b) (θ_1, θ_2) = (-60deg, 90deg)

(i) sight line difference θ_s at PAS postures

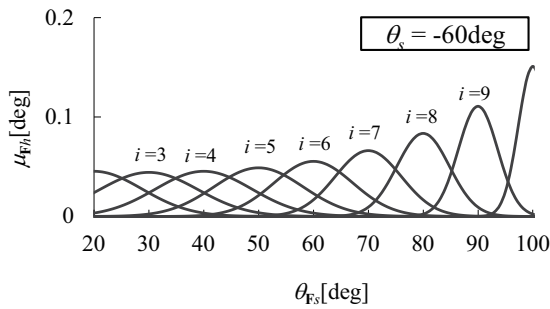


(a) (θ_1, θ_2) = (-90deg, 90deg)

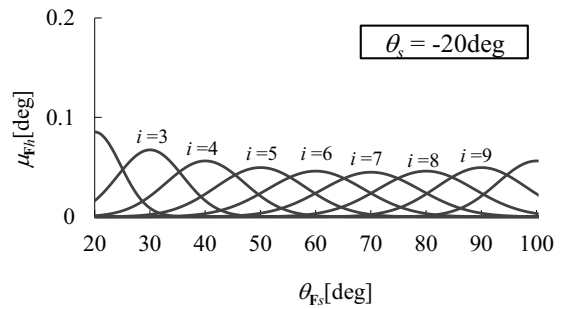


(b) (θ_1, θ_2) = (-60deg, 90deg)

(ii) Confidence interval



(a) (θ_1, θ_2) = (-90deg, 90deg)



(b) (θ_1, θ_2) = (-60deg, 90deg)

(iii) Membership functions

Fig. 3.7: Confidence intervals by fuzzy and linear interval regression analysis and membership functions.

$$\begin{aligned}\mu''(\theta_{\mathbf{F}_h}, \theta_{\mu_h}, \sigma_{\mathbf{F}_h}, i) \\ = \mu(\theta_{\mathbf{F}_h}, \theta_{\mu_h}, \sigma_{\mathbf{F}_h}) \wedge \mu(\theta_{\mathbf{F}_h}, \theta_{\mu_i}, \sigma_{\mathbf{F}_{hi}})\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$\mu'(\theta_{\mathbf{F}_h}) = \sum_{i=1}^{N_L} \mu''(\theta_{\mathbf{F}_h}, \theta_{\mu_h}, \sigma_{\mathbf{F}_h}, i) \quad (3.8)$$

$$\theta_{\mathbf{F}_h^*} = \frac{\int \mu'(\theta_{\mathbf{F}_h}) \cdot \theta_{\mathbf{F}_h} d\theta_{\mathbf{F}_h}}{\int \mu'(\theta_{\mathbf{F}_h}) d\theta_{\mathbf{F}_h}} \quad (3.9)$$

ここで、 μ'' 、 μ' はそれぞれ Min-Max-重心法における前件部の min 演算と後件部の max 演算を表している。

今回、前件部及び後件部のメンバシップ関数は $10deg$ 毎に配置しており、式 (3.7, 3.8) における i は $10deg$ 毎の各メンバシップ関数の番号を表す。ラベル数 N_L は 36 である。PAS 動作中は Fig. 3.7(iii) に示すように、ファジィ推論演算中のメンバシップ関数の形が逐次変化する。提案手法ではその変化を逐次反映し、PAS 姿勢の変化に伴い常に変化するユーザの視線の影響を考慮している。このようにして求められた安定化操作力方向 $\theta_{\mathbf{F}_h^*}$ を用いて次式に従って安定化操作力 $\mathbf{F}_h^*$ を構成する。

$$\begin{cases} |\mathbf{F}_h^*| = |\mathbf{F}_h| \\ \angle \mathbf{F}_h^* = \theta_{\mathbf{F}_h^*} \end{cases} \quad (3.10)$$

以上のように、提案する F-FS-VS は視線に伴う操作方向の信頼性を考慮し、1 回のサンプルデータで操作力方向の安定化を行う手法である。この点で、移動平均やローパスフィルタ等の多数のデータから安定化を行う積分型フィルタリング技術に対して優位である。

3.4 F-FS-VS による操作力安定化性能評価

3.4.1 操作力安定化性能評価実験

F-FS-VS の性能評価として、3.2 節において計測した各ターゲット方向への操作力 $\mathbf{F}_h$ のデータを用いて操作力安定化実験を行った。 $\mathbf{F}_h$ 安定化操作力 $\mathbf{F}_h^*$ を算出し、 $\mathbf{F}_h^*$ と $\mathbf{F}_h$ を比較することで、その安定性を評価する。評価指標として次式によって定義するターゲット方向への誤差 $\varepsilon_{\mathbf{F}_h}$ 、 $\varepsilon_{\mathbf{F}_h^*}$ を用いる。データ数 N_F はターゲット 1 つにつき、1 試行あたり 800 個のデータ、5 試行分で 4000 個である。

$$\varepsilon_{\mathbf{F}_h} = \frac{1}{N_F} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_F} (\theta_{\mathbf{F}_h j} - \theta_{\mathbf{P}_i})^2} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{\mathbf{F}_h^*} = \frac{1}{N_F} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_F} (\theta_{\mathbf{F}_h^* j} - \theta_{\mathbf{P}_i})^2} \quad (3.12)$$

また、操作力方向のばらつき $\sigma_{\mathbf{F}_h}, \sigma_{\mathbf{F}_h^*}$ も比較する。結果を Fig. 3.8, 3.9, Table 3.4 に示す。

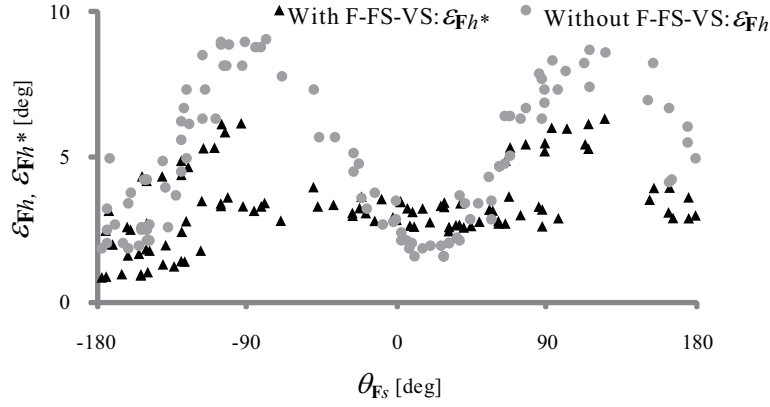


Fig. 3.8: Comparison of estimation error with θ_{F_s} between F-FS-VS and direct operational force.

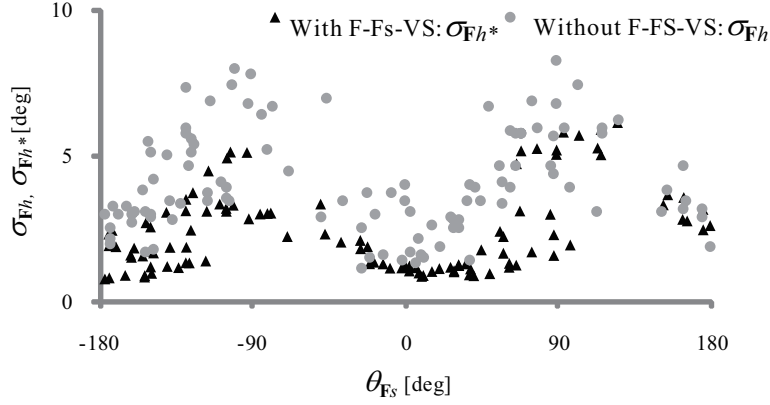


Fig. 3.9: Comparison of standard deviation of θ_{F_s} between F-FS-VS and direct operational force.

Fig. 3.8 及び Table 3.4 から、ターゲット方向に対する操作力方向の F-FS-VS を適用した場合の誤差 $\epsilon_{F_h}^*$ は適用していない場合の誤差 ϵ_{F_h} と比較し 31% 減少している。また、 t 検定によって危険率 5.5% で $\epsilon_{F_h}^*$ が ϵ_{F_h} より小さいことが有意であることを確認した。

Fig. 3.9 は、操作力方向のばらつき σ_{F_h} , $\sigma_{F_h}^*$ を示しており、Table 3.4 と併せて、操作力方向のばらつきについても提案する F-FS-VS を適用した場合である $\sigma_{F_h}^*$ が σ_{F_h} よりも、標準偏差が 41% 小さくなり操作力安定化性能の有効性を確認した。これは第 3 章において示した区間推定における信頼区間の関係からも妥当であると考えられる。また、 t 検定によって危険率 9.2% で $\sigma_{F_h}^*$ が σ_{F_h} より小さいことが有意であることを確認した。

以上により、操作力方向の誤差低減及び安定化の面で、F-FS-VS の有効性を示した。

Table 3.4: Experimental results of estimation comparing F-FS-VS and direct operational force

	Without F-FS-VS	With F-FS-VS	Improvement rate
$\varepsilon_{F_h}, \varepsilon_{F_h}^*$	5.41 deg	3.75 deg	30.7%
$\sigma_{F_h}, \sigma_{F_h}^*$	4.07 deg	2.40 deg	41.0%

RMSE: root-mean-square error

3.4.2 F-FS-VS における視線方向誤差の影響

頭部固定の安定性や視線計測装置の性能如何に関わらず、人間の視線は固視微動等のブレを含んでいる [57]. そこで、ユーザの視線に誤差が含まれていた場合を想定し $\pm 5deg$ の範囲で $1deg$ 毎に、定常的な視線誤差 ε_s を含めた場合の安定化後の操作力方向のばらつき $\sigma_{F_h}^*$ を算出してその結果を Fig. 3.10 に示す.

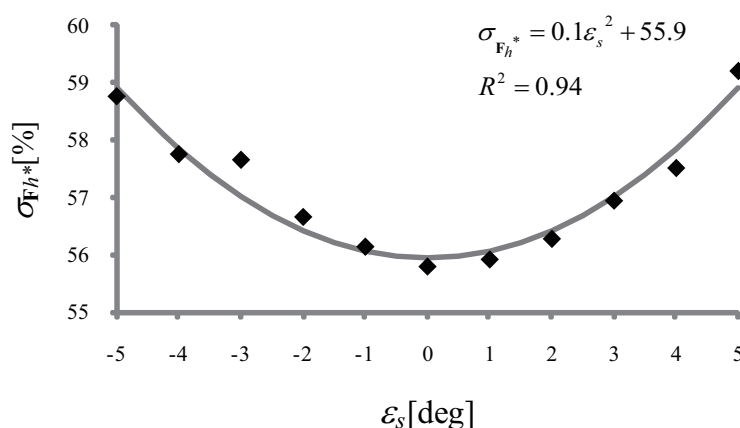


Fig. 3.10: Analysis of $\sigma_{F_h}^*$ caused by line of sight error.

値は σ_{F_h} を 100% として表している. Fig. 3.10 より、視線誤差 ε_s を含まない場合が $\sigma_{F_h}^*$ の最小となり、誤差の増加に伴い大きくなっている. 2 次式によって近似すると次式のようになり、

$$\sigma_{F_h}^* = 0.1\varepsilon_s^2 + 55.9 \quad (3.13)$$

式 (3.13) から視線誤差が $21deg$ 以内であれば 100% を超えることはなく、視線誤差に関わらず F-FS-VS が有効となることがわかった.

これらの結果が示すように、視線に誤差 ε_s を含んでいたとしても、操作力方向安定化の効果を発揮している. よって、本手法 F-FS-VS は固定困難な視線に関する誤差に対してもロバストであることを確認した.

3.5 PAS 操作安定性評価シミュレーション

F-FS-VS を適用した安定化操作力方向 $\theta_{F_h}^*$ を用いて、インピーダンス制御 PAS モデルでの先端部軌道安定性評価シミュレーションを行い、提案手法による PAS 操作の安定化効果を検証する。F-FS-VS を適用した PAS のブロック図を **Fig. 3.11** に示す。ここで、 F_h を操作入力、 F_h^* を安定化操作力、 P_h^*, P_{href}^* を PAS 先端部位置とその目標値、 θ^*, θ_{ref}^* を各関節角度とその目標値とする。本シミュレーションでは、**Fig. 3.12** のように目標軌道 r を設定し、PAS 先端部の軌道と目標軌道との一致度を評価する。目標軌道上を PAS 先端部が移動するような試行を各 100 回行った。PAS 先端部目標軌道を次式に示す、始点位置、終点位置、始点速度、終点速度を与えることで滑らかな軌道を算出可能なエルミート曲線を用いて算出する [58]。

$$\begin{aligned} r(u) = & (2u^3 - 3u^2 + 1)P_s + (u^3 - 2u^2 + u)\dot{P}_s \\ & + (-2u^3 + 3u^2)P_f + (u^3 - u^2)\dot{P}_f \end{aligned} \quad (3.14)$$

ここで、 r は経路、 P_s, P_f は始点と終点の位置を、 $\dot{P}_s, \dot{P}_f$ は始点と終点の速度をそれぞれ表している。ここでシミュレーションにおいて始点から終点へ向かう経路の各時刻においてユーザは躍度最小となるように PAS 先端部を操作するものと仮定する [59]。 u は時間関数であり、人間の滑らかな運動を模擬するために次式によって表される躍度最小モデルで与える。

$$u(t) = 6t^5 - 15t^4 + 10t^3 \quad (3.15)$$

ここで PAS にインピーダンス制御を施すと、PAS を操作するために必要な操作力 F_h は以下のように求まる。

$$F_h = M \frac{d^2 r}{dt^2} + D \frac{dr}{dt} \quad (3.16)$$

次に、 M, D はそれぞれ 2 次系の振動モデルにおける、慣性行列、粘性行列を表している。PAS 操作中 P_h の移動に伴って、ユーザの視線も変化する。その際、操作入力 F_h の方向 θ_{F_h} に対しユーザの空間分解能に基づいたノイズ $\varepsilon_h(\sigma_{F_h})$ を持たせた。 $\varepsilon_h(\sigma_{F_h})$ は正規分布に従うものとした。

$$\theta_{F_h'} = \theta_{F_h} + \varepsilon_h(\sigma_{F_h}) \quad (3.17)$$

$$|F_h'| = |F_h| \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_h(\sigma_{F_h}) \sim N(0, \sigma_{F_h}), \quad |\varepsilon_h| \leq \pi \quad (3.19)$$

ノイズ $\varepsilon_h(\sigma_{F_h})$ を加えた操作力 F_h' を入力とし、PAS 先端部を次式を満たすようにインピーダンス制御を行う。

$$M \frac{d^2 r}{dt^2} + D \frac{dr}{dt} = \alpha F_h' \quad (3.20)$$

α は PAS のアシスト比であり、今回は 1 とした。

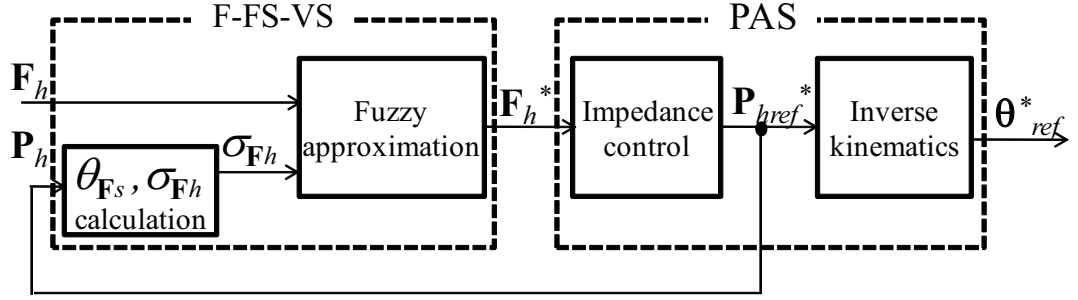


Fig. 3.11: Block diagram of stabilized PAS with F-FS-VS.

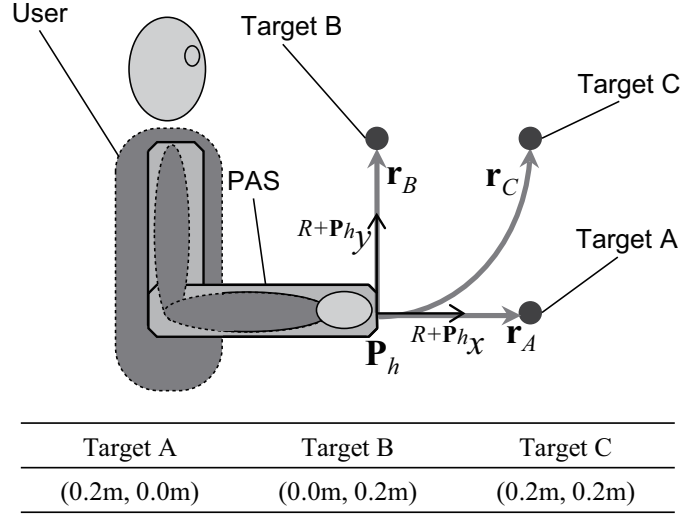


Fig. 3.12: Position of target in simulation.

このようにして得たノイズを含む操作力 $\mathbf{F}'_h$ に対して F-FS-VS を適用し操作力の安定化を図る．F-FS-VS 適用の有無による操作安定性を以下に示す経路一致度で評価する．PAS 先端部 $\mathbf{P}_h$ の移動経路と目標軌道 $\mathbf{r}$ とのずれを RMSE を用いて経路一致度 C_m として次式のように定義する． C_m はその値が小さいほど経路一致度が高い．

$$C_m = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{t=0}^T (\mathbf{P}_h(t) - \mathbf{r}(t))^2} \quad (3.21)$$

ここで、 T, t はそれぞれ操作時間と時刻を表している．シミュレーション結果を **Fig. 3.13**～**Fig. 3.18**, **Table 3.5** に示す．**Fig. 3.13**～**Fig. 3.15** は (a)F-FS-VS を適用しない場合の 100 試行分の軌道と (b)適用した場合の軌道を示す．また、**Fig. 3.18** 及び **Table 3.5** には、F-FS-VS 適用有無による C_m の変化を表す．

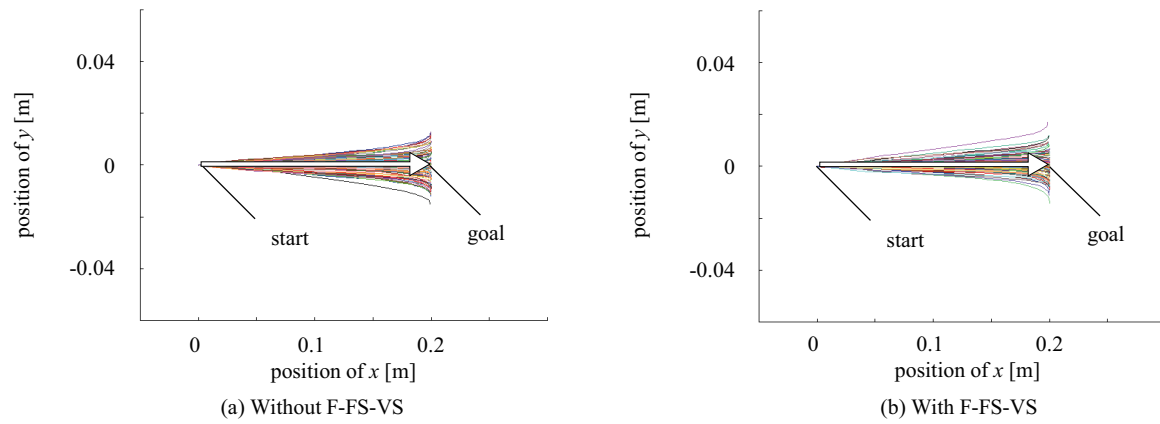


Fig. 3.13: Approaching path to target A.

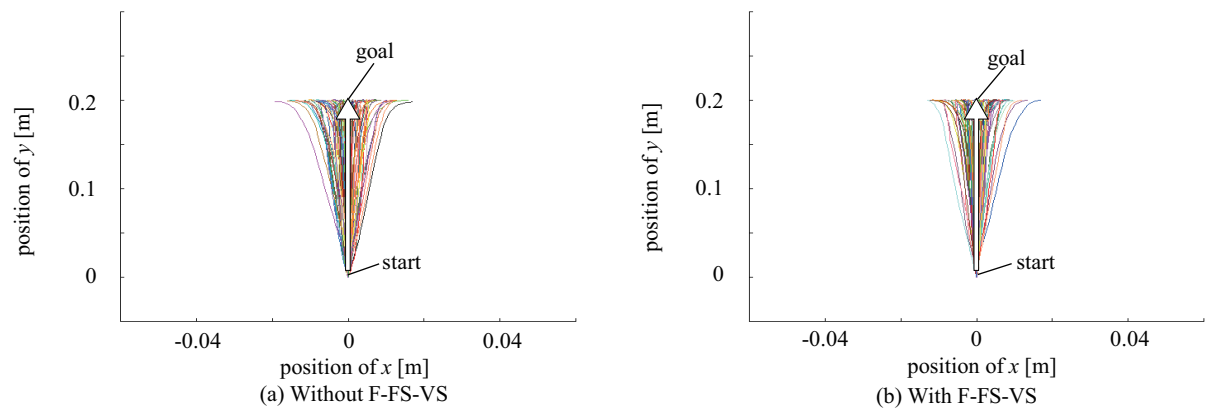


Fig. 3.14: Approaching path to target B.

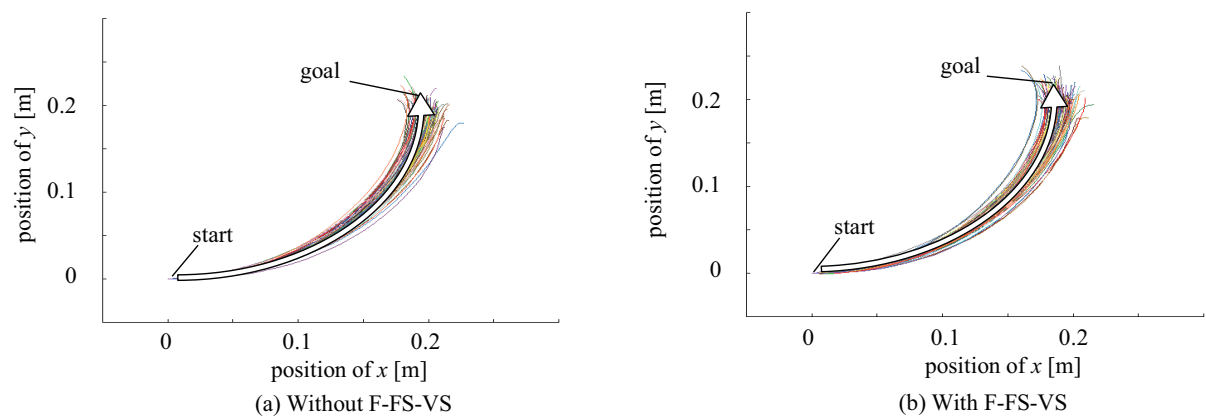


Fig. 3.15: Approaching path to target C.

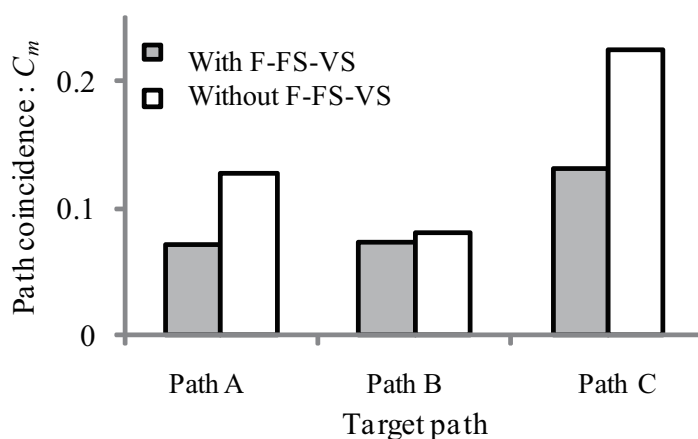


Fig. 3.16: Path coincidence of end-effector orbit.

Table 3.5: Experimental results of path coincidence

	Without F-FS-VS	With F-FS-VS	Improvement rate
Path A	0.13	0.07	44.4%
Path B	0.08	0.07	9.7%
Path C	0.22	0.13	41.5%
Average	0.14	0.09	36.4%

いずれの経路においても PAS 先端部軌道の経路一致度が F-FS-VS を用いた場合のほうが、適用してない場合に比べて小さくなっている。全経路で平均して 36% の改善が確認できた。このことからユーザの視線を考慮した PAS 操作安定化に対する有用性を確認した。

3.6 3 リンク PAS における F-FS-VS の評価

前節までにおいて、2 リンク PAS を用いて操作点の変更に伴うユーザの視線変化の影響を考慮した PAS 操作力安定化の提案し、その有効性を示した。より多自由度な PAS への適用を考え、次章以降の実験で用いる矢状面上を動作する 3 リンク 3 自由度マニピュレータを用いた PAS における提案手法の評価を行う。

3.6.1 操作力方向特性計測実験

3.2 節の実験と同様に、PAS 操作力の方向とユーザの視線の関係を調べる。

3 リンク PAS 上の P1,P2,P3 点から 30deg 毎に設定した目標方向に対し操作力を入力する。PAS の姿勢は下記 5 通りで静止状態の下に行った。視線と操作力方向のばらつきの関係

を確認する．F-FS-VS 適用時及び非適用時において，操作力方向の精度及びばらつきの変化を確認する．

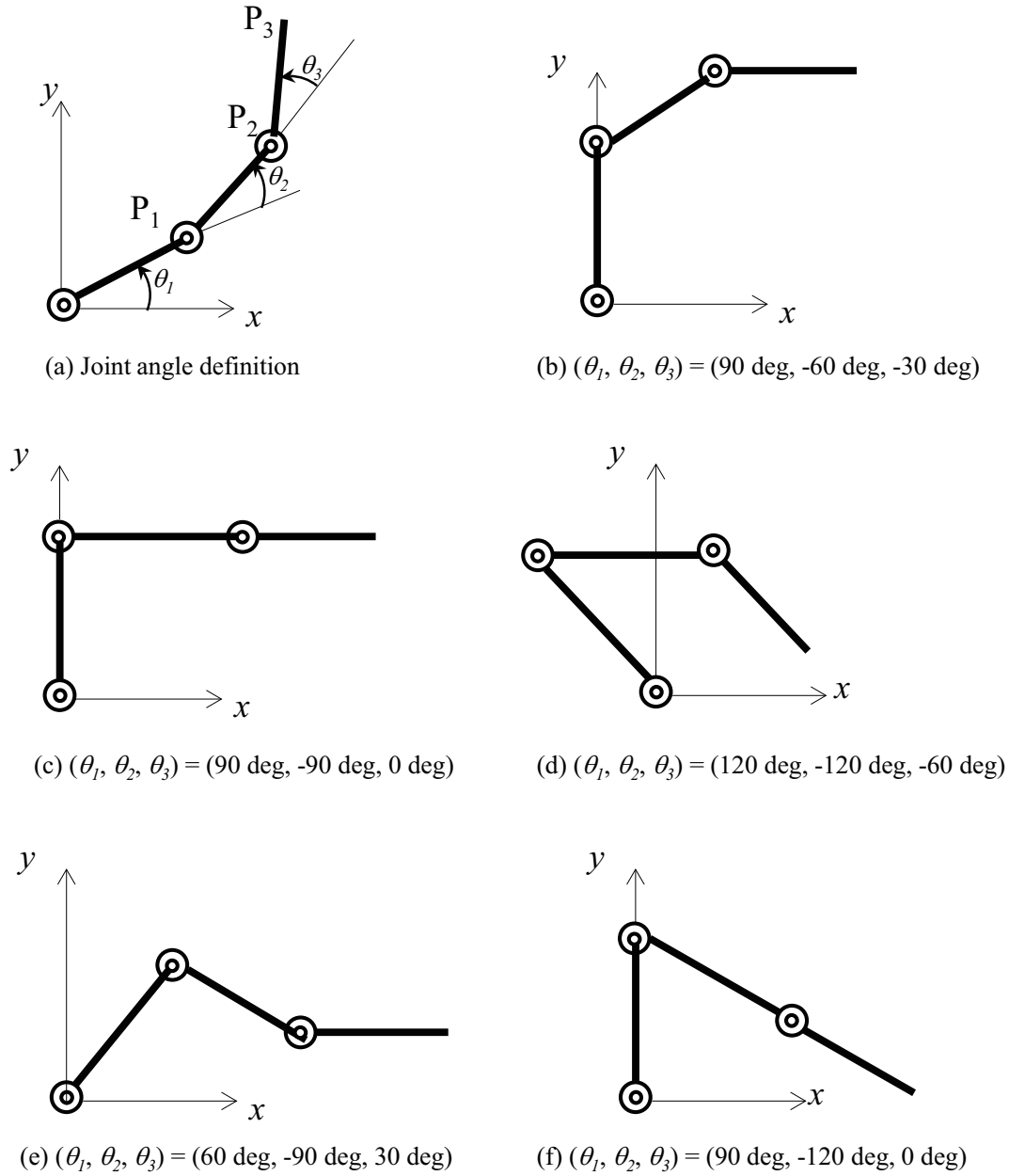
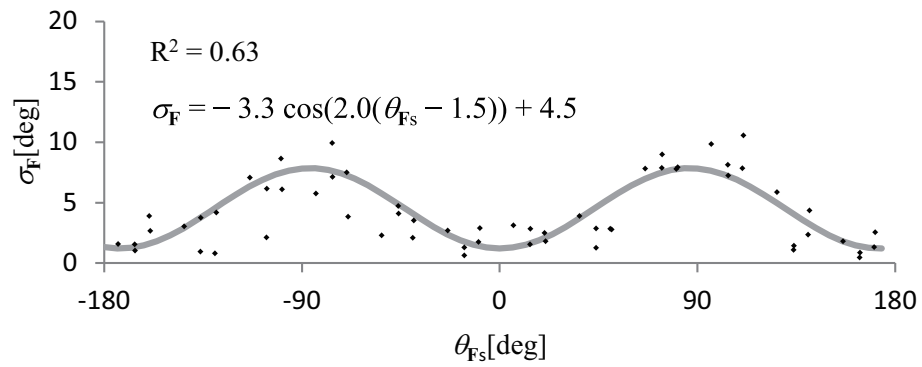
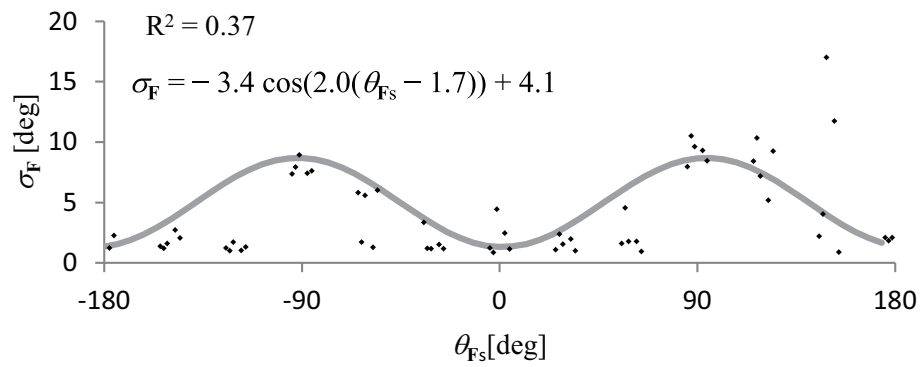


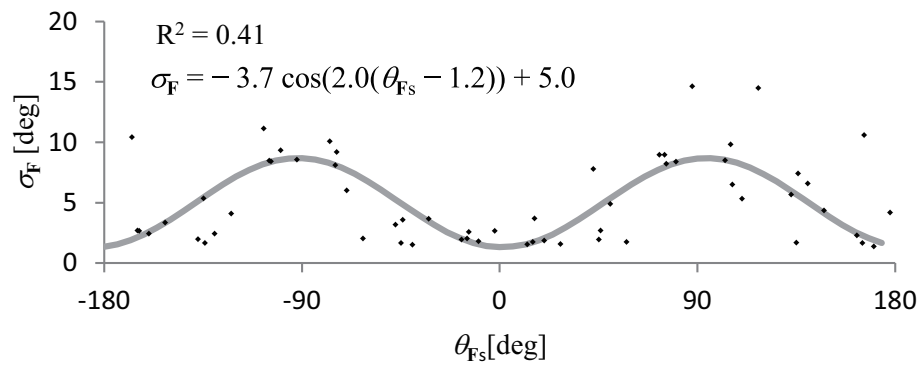
Fig. 3.17: Experimental PAS postures.



(a) Input operational force form P_3



(b) Input operational force form P_2



(c) Input operational force form P_1

Fig. 3.18: Operational force characteristic 3 link PAS.

3.6.2 操作力安定化性能評価シミュレーション

3リンクPASへのF-FS-VSの適用を想定した操作力方向安定化性能評価シミュレーションを行う。前節で計測した操作力のデータへF-FS-VSを適用し、操作力方向の目標方向との誤差および、ばらつきを用いて操作力安定化性能を評価する。

結果をFig. 3.6に示す。Fig. 3.6より、各操作点(P_1 , P_2 , P_3)から操作力へF-FS-VSを適用し、操作力方向の誤差およびばらつきにおいての改善を確認した。

Table 3.6: Experimental results of estimation using 3 link power assist system

	Estimation error			Standard deviation		
	P_3	P_2	P_1	P_3	P_2	P_1
Without F-FS-VS	7.31 deg	6.90 deg	7.07 deg	4.07 deg	4.05 deg	5.19 deg
With F-FS-VS	5.34 deg	4.76 deg	6.02 deg	2.85 deg	2.53 deg	3.21 deg
Improvement rate	29.7 %	35.3 %	13.6 %	30.1 %	37.6 %	38.1 %

RMSE: root-mean-square error

3.7 視線と操作力方向の安定性における 個人差の考察

これまで、視線と操作力方向の安定性に相関があることと、そのことを考慮することによってPASの操作入力を安定化できることを示してきた。ここでは、視線と操作力方向の安定性における個人差の影響について考察する。

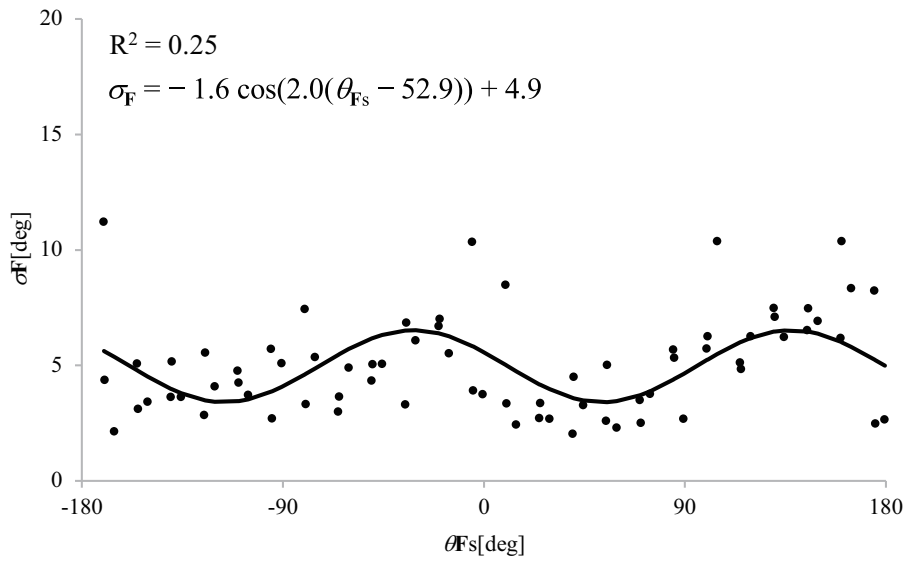
3.7.1 身体的特徴における個人差の影響

我々の提案するF-FS-VSでは、操作力方向のばらつきがユーザの視線方向と操作力方向に依存するものとして設計している。このとき前提として、ユーザはPAS操作中においてPAS先端部を注視するものとし、視線方向をユーザの眼球の位置は既知とし、眼球位置からPAS先端部位置へ向かうベクトルを視線ベクトルと定義している。PASのユーザの身体的特徴は千差万別であり、同じPASを使用するとしてもユーザの背格好が違えば視線ベクトルは異なる。しかし本手法では、身体的特徴による個人差はユーザの眼球位置のみであり、それが既知であれば適用可能である。

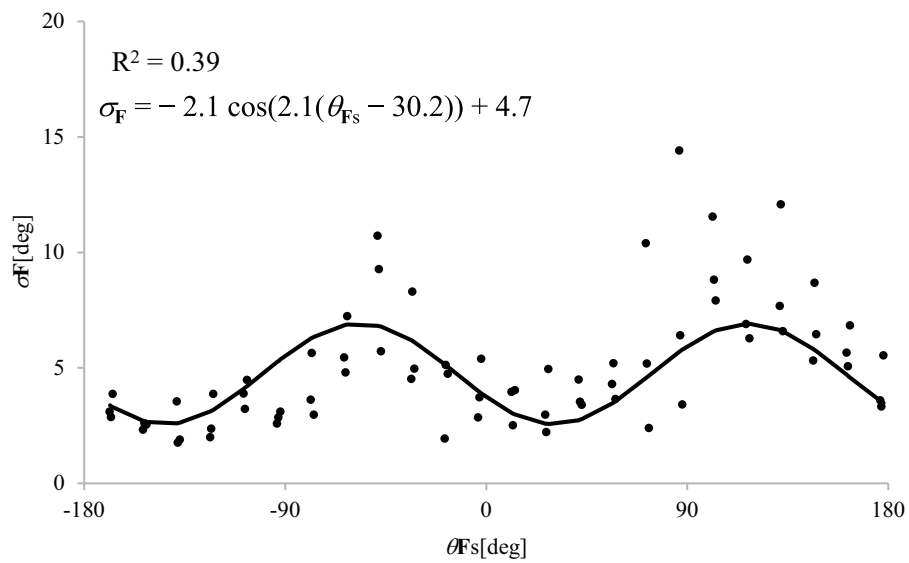
3.7.2 視空間認識特性および運動特性の個人差の確認実験

本手法における、「操作力方向のばらつきがユーザの視線方向と操作力方向に依存する」という前提は、被験者1人に対して実験的に確認した事実である。ここでは、新たに同程度の背格好の別の被験者に対し操作力方向と視線の関係を計測し、本手法の前提に対する個人差の影響を確認する。実験環境および条件は3.6.1節と同様であり、計測点は P_3 およ

び P_1 とする．結果を **Fig. 3.19** に示す．傾向として操作力方向のばらつきがユーザの視線に依り変化していることが確認できる．同様の傾向として，視線と操作力方向の角度差がおおよそ $90deg$ ごとに上限と下限のピークが存在することを確認した．しかし，先の被験者と異なり角度に対してオフセットが存在していることを確認した．2 人の被験者の大きな違いとして，1 人目の被験者は実験装置である PAS の操作経験が豊富であることが挙げられる．具体的には，一人目の被験者は目標方向へ PAS 先端部を動作させるための操作力入力の実行錯誤をより多く行っているということである．つまり，今回の被験者は先の実験の被験者よりも PAS 操作における習熟度が低いと言える．ここで，人間はその個人個人の知覚している空間内の位置関係を脳内に構築する [60]．しかし，実際の空間に対して人間の知覚空間した空間は曲がっており，例えばそれにより，上肢を目標到達運動させた場合，手の到達位置に関するアンダーシュートが起こることが実験的に確認されている [61, 62]．また，この視空間認識と現実の空間との位置関係は試行錯誤によって修正していくことが可能であり [60]，この学習に関しては様々な個人差があることがわかっている [63, 64]．これらの事実はユーザはそれぞれの認識している空間は個々人によって異なり，またその現実空間との関係性はその空間での行動経験量に大きく影響することを意味している．このことから PAS 操作の経験および習熟度によって，操作力方向のオフセットが生じると考えられる．しかし認識空間による操作力方向には個人差があるものの，視線によって操作力の安定しやすい方向およびしにくい方向が存在し，また計測によってモデル化可能であることを確認した．



(a) Input operational force form P_1



(b) Input operational force form P_3

Fig. 3.19: Individual reference operational force characteristic 3 link PAS.

3.8 第3章のまとめ

本章では、PAS 操作におけるユーザの視線と操作力の関係を明らかにし、視線を考慮した PAS への操作入力安定化手法 F-FS-VS を提案し、その有効性を確認した。

まず、ユーザの視線と操作力の関係に関しては、11 通りの PAS 姿勢における各ターゲットへの操作力方向を計測し、ユーザの視線を考慮して解析を行った。PAS 操作入力の解析の結果、操作力方向のばらつきがユーザの視線によってその安定性が変化することを確認した。計測結果より、操作力の方向はユーザの視線方向と一致するほど安定し、逆にユーザの視線に対して直交する方向に操作力を加える場合、その操作力の方向は不安定化することがわかった。この結果は、ヒトの視界に空間分解能が視点中心から離れるに従って疎になる性質があることから妥当である。その性質を余弦関数を用いて、ユーザの視線方向を既知としたとき、ユーザの操作力方向のばらつきのモデルを作成した。

次に、ファジィ回帰分析に基づきユーザの視線と操作力方向のばらつきの関係から操作力方向を安定化する手法 F-FS-VS を提案した。2 リンク 2 自由度マニピュレータを用いた PAS における F-FS-VS 適用例を示し、その性能評価を行った。操作力方向の安定化実験において、F-FS-VS を適用した場合とそうでない場合と比較して、操作力方向のばらつきを評価指標とし 41% の操作力安定化効果を確認した。

さらに、F-FS-VS を適用した PAS 先端部の経路追従操作における安定性をシミュレーションにより評価した。その結果、非適用時と比べ 36% の PAS 先端部の挙動の安定性を確認し、ユーザの視線を考慮して PAS 操作入力を安定化させる本手法の有用性を示した。

本手法は、基本的に 2 リンク 2 自由度マニピュレータによって、実験及び性能評価を行っている。多くの PAS に適用することを考え、より大型の 3 リンク 3 自由度マニピュレータにおいても同様の計測及び評価を行った。同一被験者において PAS が変化した場合でも、F-FS-VS において重要な視線と操作力の方向の安定性の関係は、同傾向であることが確認できた。

また個人差について考慮した結果、視空間認識による操作力方向には個人差があるものの、視線によって操作力の安定しやすい方向およびにくい方向が存在し、また計測によってモデル化可能であることを確認した。上肢運動に限定した場合、視認識空間と上肢運動空間の関係性は、前田らが神経回路網による統合モデルを提案している [65]。今後、個人差への対応に関する検討として、各個人への実計測によるモデル調整だけでなく、上記統合モデルを利用したより一般的な視線と操作力方向の関係モデルの構築及び、F-FS-VS への適用を考える必要がある。

本手法は従来のセンサ入力安定化における移動平均やローパスフィルタなどの積分型フィルタリング技術とは異なり、データの信頼性を考慮して 1 サンプル分のデータのみを用い、遅延の起こらない入力の安定化を実現している。これにより PAS の操作入力安定化への大きな貢献が期待できる。

本手法では、今回視線方向は「作業中頭部位置が変化しない」及び「作業中ユーザは PAS 先端部を注視し続ける」という条件の下、ユーザの瞳の位置および PAS 先端部位置の関係から計算している。これは同条件下であれば本手法を適用可能であり、また、ユーザの頭部が動く場合や、よそ見してしまうような状況でも、アイマークレコーダ等の視線計測装置の導入によって、より広い条件下で適用可能であると考えられる。視線計測を用いたより動的な条件下での F-FS-VS の適用及び性能評価は今後の課題とする。動的に頭部位置が変化

し続ける状況での適用は今後の課題とする.

第4章 操作点のインピーダンス特性に基づく操作性改善

本章では、PAS 先端部をインピーダンス制御した時、PAS 先端部から操作する場合は、操作者は設定した所望のインピーダンスで動作する先端部の動作を感じながら操作できるが、M-HI により任意点から操作する場合、操作者は設定したインピーダンスと異なるインピーダンスを感じながら操作することになるため操作性が低下する。操作点の運動を先端部と同様のインピーダンスモデルで表した場合の各インピーダンス値を操作点インピーダンスと定義し、操作性への影響を評価した。さらに先端部と異なる操作点インピーダンスを修正し、操作性を向上させる。

4.1 3自由度 PAS の先端部インピーダンス制御

M-HI は Fig. 4.1(a) に示すような従来多く用いられるマニピュレータ先端部を操作するパワーアシストシステムに対し、操作点を Fig. 4.1(b) に示すように PAS 中間点から操作することでその有効作業領域を拡張することを目指したヒューマンインタフェースである。M-HI によって PAS 中間点から操作し作業対象物との安全距離を確保することで、落下事故等に巻き込まれるリスク [1] を低減するなどのメリットが期待できる。

一方、M-HI 適用 PAS において従来のように先端部から操作した場合よりも操作性が劣化することが確認されている。これまでに我々は操作点における、ユーザの操作力と操作点運動の干渉力を軽減することで、操作性劣化を軽減する操作点運動協調化を提案した [66]。本章では、操作点のインピーダンスに着目し、操作性劣化の解析及び操作性改善案の提案及びその評価実験を行う。

4.1.1 実験環境

今回使用する 3 リンク PAS の先端部インピーダンス制御のモデルを Fig. 4.1(c) に示す。本実験では、Fig. 4.1 のように PAS 先端部に設定した仮想剛体の挙動を、センサにより取得した操作力から逐次計算することで操作者の操作力を PAS 先端部に再現する。その手先力を次式に基づくインピーダンス制御を用いて空間に固定された仮想剛体の挙動を計算することで制御する。

$$\mathbf{M}_3 \ddot{\mathbf{r}}_{P_3} + \mathbf{C}_3 \dot{\mathbf{r}}_{P_3} = \alpha \mathbf{F}_h \quad (4.1)$$

$$\mathbf{M}_3 = \text{diag}(m_{3x}, m_{3y}, m_{3\theta}) \quad (4.2)$$

$$\mathbf{C}_3 = \text{diag}(m_{3x}, m_{3y}, m_{3\theta}) \quad (4.3)$$

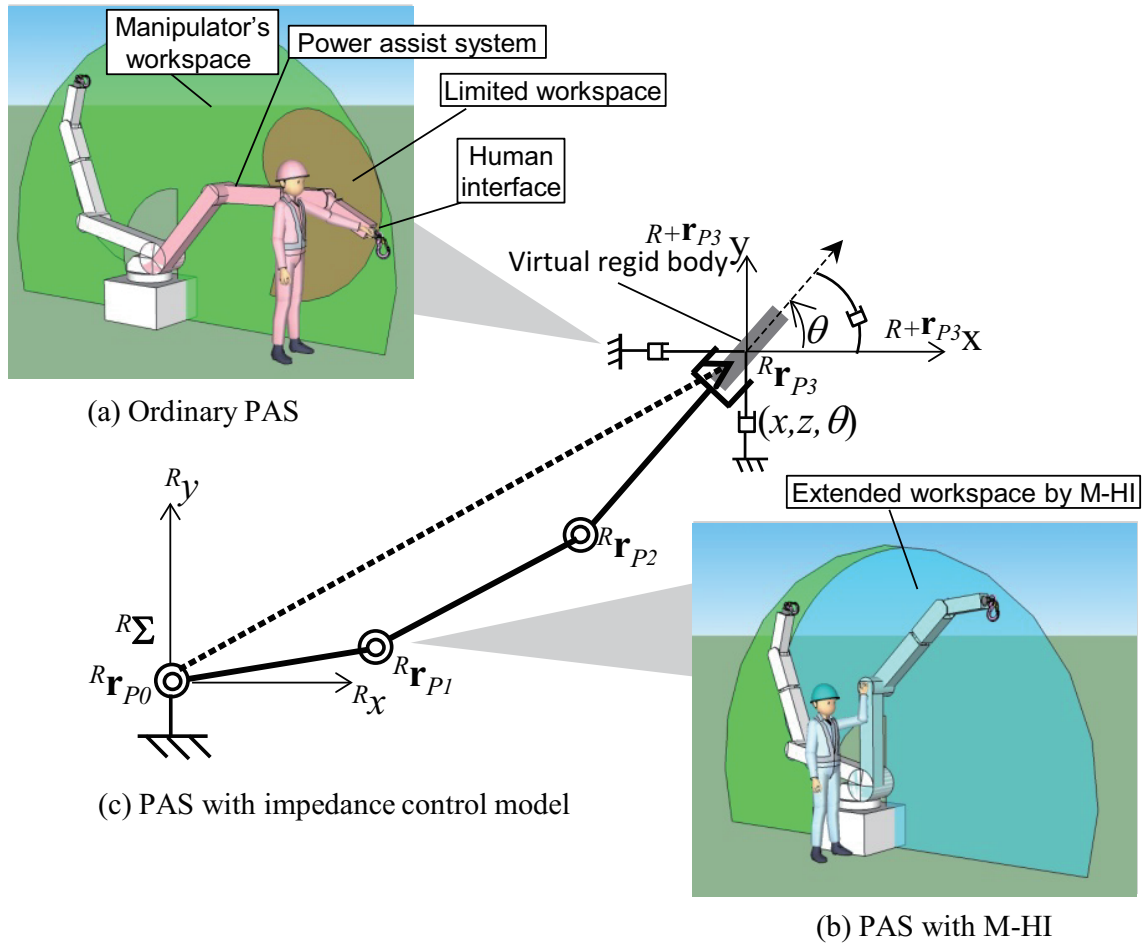


Fig. 4.1: Power assist system using impedance control with and without Multi-port Human Interface

操作者は操作点に取り付けられたフォース・トルクセンサに、トルクを含む操作力 $\mathbf{F}_h(F_x, F_y, \tau)$ を入力し、PAS 先端部の挙動は式 (4.1) によって与えられる仮想剛体の位置および姿勢 $\mathbf{r}_{P_3}(x, y, \theta)$ を逐次算出することで得る。ここで、式 (4.1) において $\mathbf{F}_h$ は操作力で、 α は増力比、 $\mathbf{M}$ は慣性係数行列、 $\mathbf{r}$ は仮想剛体の位置及び姿勢、 $\mathbf{C}$ は粘性係数行列をそれぞれ表す。本実験では、慣性係数および粘性係数の値はそれぞれ、 $m_{3x}, m_{3y}, m_{3\theta} = 1.8, c_{3x}, c_{3y}, c_{3z} = 30.0$, 増力比 $\alpha = 1.0$ とする。

4.1.2 実験条件

本実験では Fig. 4.1(c) に示したような矢状面上を可動する 3 リンク 3 自由度マニピュレータを用いて M-HI を適用した PAS を構成する。マニピュレータ先端部及び P_2 点にフォース・トルクセンサを取り付け、それぞれから操作力を入力して、PAS 先端部を操作する。



4.2.1 M-HI 適用 PAS の操作性評価

$$\mathbf{F}_h^* = \mathbf{F}_h \quad (4.4)$$

PAS 先端部の目標経路追従誤差と目標点到達時間を指標として M-HI 適用 PAS の操作性評価を行う。M-HI を適用した PAS の各操作点からの操作精度を計測する。実験では、PAS 先端部及び中間関節から操作し、PAS 先端部が目標経路にどれだけ追従できているかを評価する。操作者は P_3, P_2 いずれかにとりつけたフォース・トルクセンサに操作力を入力し、PAS 先端部 P_3 を初期姿勢から上下前後方向に設定したターゲット $\mathbf{r}_m, (n = 0..3)$ に向かって、 $0.2m$ PAS 先端部を移動させるように操作する。被験者は 20 代男性とし、各操作を 10 回ずつ試行した。評価指標としての PAS 先端部の目標経路追従誤差を次式で定義する。

実験結果を **Fig. 4.3(a), 4.3(b)** に示す. Fig. 4.3(a) より, 経路 $\mathbf{r}_{t0}, \mathbf{r}_{t1}, \mathbf{r}_{t2}$ において M-HI 適用時の追従誤差 $\varepsilon_{\mathbf{r}}$ が大きくなっていることが確認できる. また目標点到達時間に関しても, Fig. 4.3(b) より, M-HI 適用時に経路 $\mathbf{r}_{t1}, \mathbf{r}_{t2}$ において遅くなっていることが確認でき

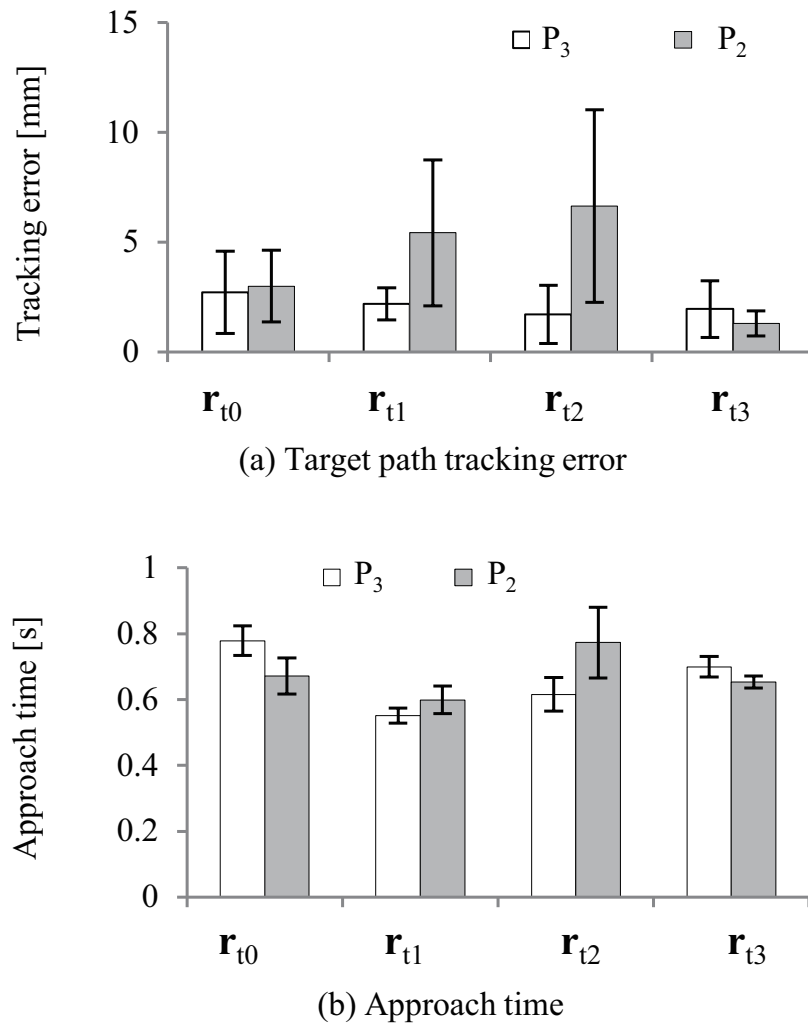


Fig. 4.3: Experimental result of approach time with applying M-HI

る．これらの結果は，M-HI 適用時に PAS の操作性が劣化していることを示唆している．次節にて，これらの操作性劣化について操作点のインピーダンスの観点から解析する．

4.2.2 操作点インピーダンスの算出

本実験に用いた PAS はその運動を制御する際に，式 (4.1) に示した先端部に設定した所望のインピーダンスパラメータを持つ仮想剛体の挙動を計算することにより制御している．ここで，新たに PAS 操作点に仮想剛体を Fig. 4.4 のように設定し，その点の動作 $\dot{\mathbf{r}}_{p_2}$, $\dot{\mathbf{r}}_{p_2}$ から，各インピーダンスパラメータを算出することを考える．操作点 P₂ のインピーダンスモデルを次式のように設定する．

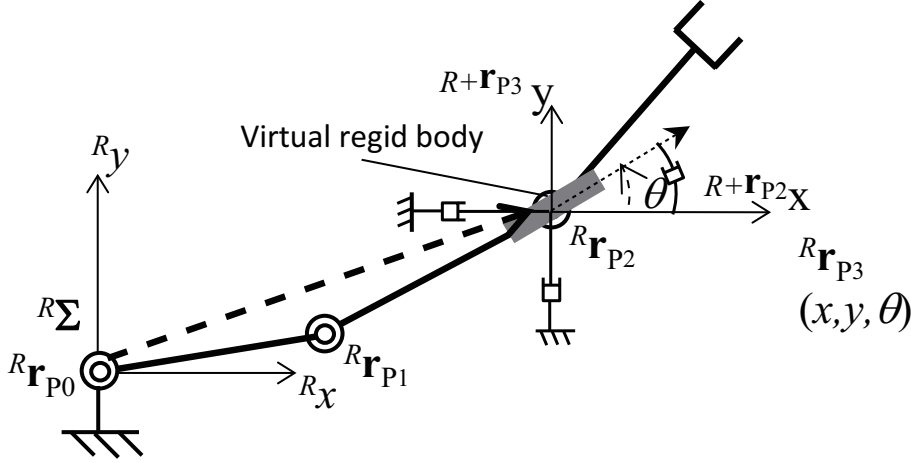


Fig. 4.4: Operational point impedance model at P₂

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{r}}_{P2} + \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{r}}_{P2} = \alpha \mathbf{F}_h^* \quad (4.6)$$

$$\mathbf{M}_2 = (m_{ij})_{1 \leq i, j \leq 3} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{C}_2 = (c_{ij})_{1 \leq i, j \leq 3} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (4.8)$$

各インピーダンス行列の値を同定する． $\mathbf{M}_2, \mathbf{C}_2$ の未知パラメータ 18 個を同定するために PAS 制御ステップの 6 ステップ分以上の運動データから最小二乗法を用いて算出する． $k \geq 6$ として運動データ行列及び求めるインピーダンスパラメータ行列は次式のように表せる．

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_2 [\ddot{\mathbf{r}}_{P21} \ddot{\mathbf{r}}_{P22} \cdots \ddot{\mathbf{r}}_{P2k}] + \mathbf{C}_2 [\dot{\mathbf{r}}_{P21} \dot{\mathbf{r}}_{P22} \cdots \dot{\mathbf{r}}_{P2k}] \\ = \alpha [\mathbf{F}_{h1}^* \mathbf{F}_{h2}^* \cdots \mathbf{F}_{hk}^*] \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}}_{P21}^T & \dot{\mathbf{r}}_{P21}^T \\ \ddot{\mathbf{r}}_{P22}^T & \dot{\mathbf{r}}_{P22}^T \\ \vdots & \vdots \\ \ddot{\mathbf{r}}_{P2n}^T & \dot{\mathbf{r}}_{P2k}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_2^T \\ \mathbf{C}_2^T \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{h1}^{*T} \\ \mathbf{F}_{h2}^{*T} \\ \vdots \\ \mathbf{F}_{hk}^{*T} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

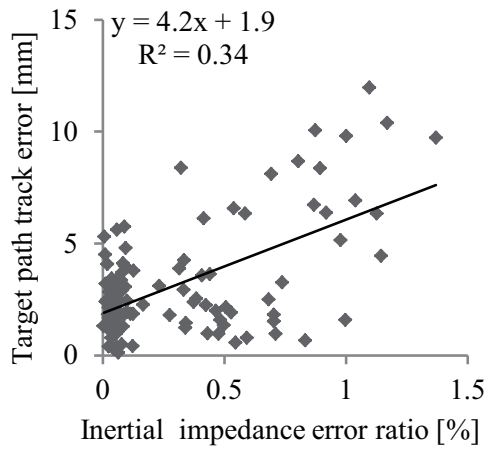
ここで，運動データ行列を $\mathbf{R}_k$ ，インピーダンスパラメータ行列を $\boldsymbol{\sigma}$ ，操作力データ行列を $\mathbf{F}_k$ と置くと次式のようになる．

$$\mathbf{R}_k \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}_k \quad (4.11)$$

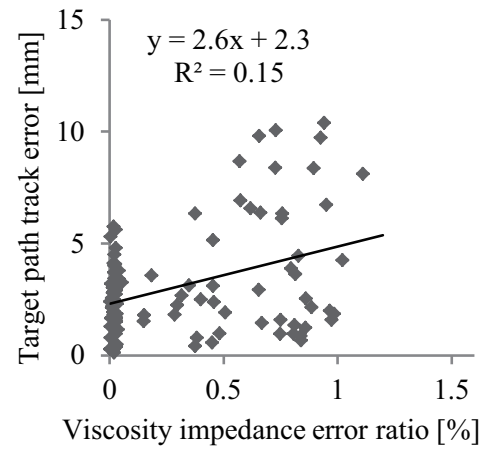
$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{R}_k + \mathbf{F}_k \quad (4.12)$$

$$\mathbf{R}_k^+ = \mathbf{R}_k^T (\mathbf{R}_k \mathbf{R}_k^T)^{-1} \quad (4.13)$$

ここで， $\mathbf{R}_k$ は $\ddot{\mathbf{r}}_{P21..k}, \dot{\mathbf{r}}_{P21..k}$ を， $\mathbf{F}_k$ は $\mathbf{F}_{h1..k}^*$ を表す．式 (4.12, 4.13) によって求められた $\boldsymbol{\sigma}$ は最小二乗解と等価である [67–69]．

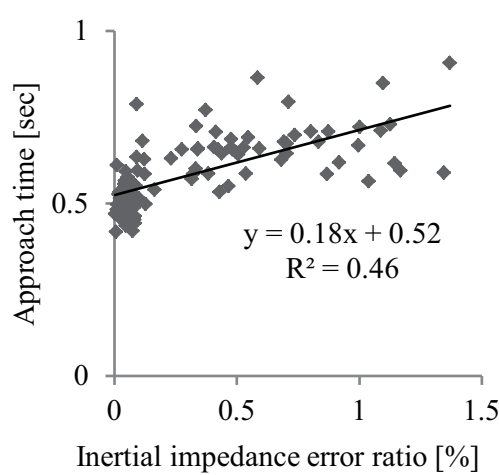


(a) Inertial parameter matrix

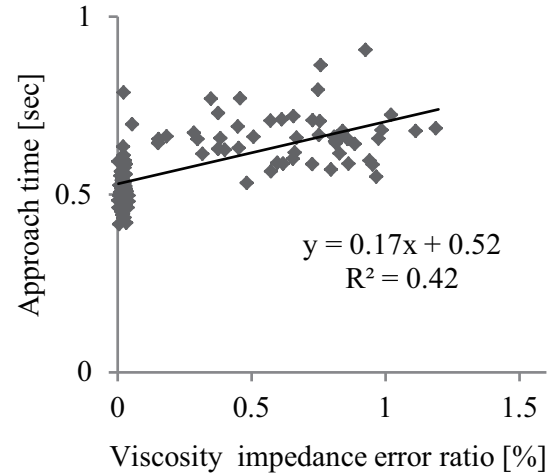


(b) Viscosity parameter matrix

Fig. 4.5: Examples of transition of impedance parameter value



(a) Inertial parameter matrix



(b) Viscosity parameter matrix

Fig. 4.6: Examples of transition of impedance parameter value

4.2.3 操作点インピーダンスと操作性の関係

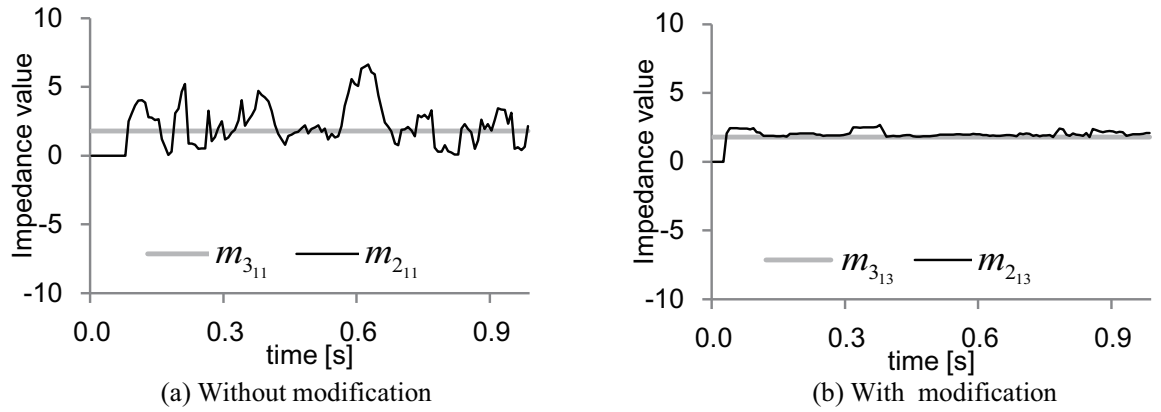
ここで、先の実験によって得られたデータから実際に操作点のインピーダンスを算出し、その操作性との関係进行评估する。Fig. 4.5, 4.6 に各インピーダンスパラメータと先端部の目標軌道追従誤差及び、目標点到達時間を示す。各評価指標は先の実験同様、大きくなるほど操作性が悪化していると判断する。また、インピーダンスパラメータに関しては、操作点のインピーダンスと先端部に与えた所望のインピーダンスの差のノルムを用いて、次

式のように設定した．この値が大きいほど，操作点インピーダンスが先端部に設定した所望のインピーダンスと異なっている．

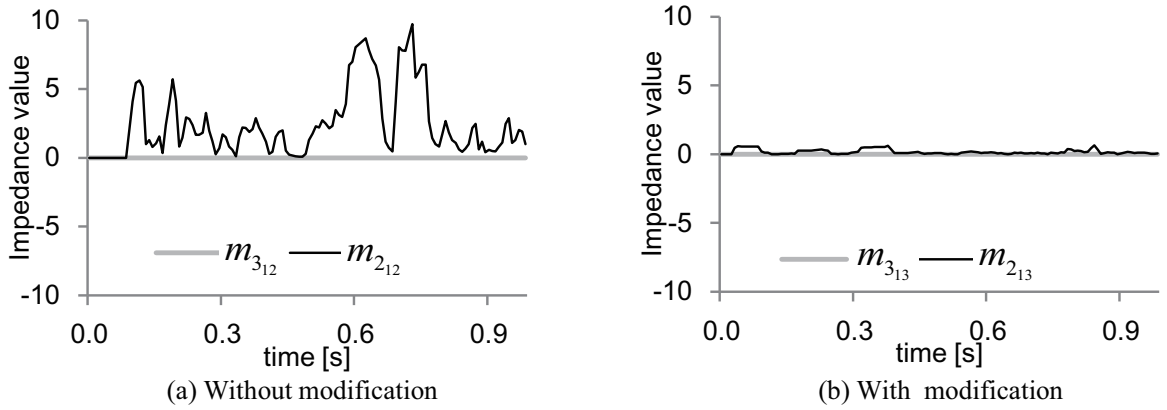
$$\varepsilon_{IM} = \frac{\|\mathbf{M}_2 - \mathbf{M}_3\|}{\|\mathbf{M}_3\|}, \varepsilon_{IC} = \frac{\|\mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_3\|}{\|\mathbf{C}_3\|} \quad (4.14)$$

ここで， ε_{IM} と ε_{IC} はそれぞれ，操作点における慣性係数行列及び粘性係数行列の目標値との誤差を表している．Fig. 4.5 より，先端部追従誤差と操作点インピーダンス誤差は大きな相関は見られないが，Fig. 4.6 より，目標到達時間と操作点インピーダンス誤差には，慣性及び粘性の両方において，相関を確認した．

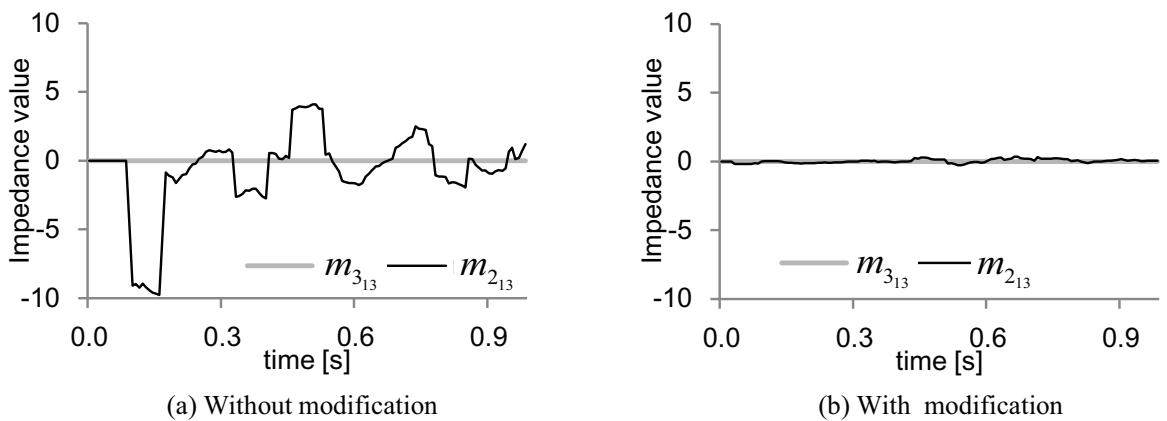
Fig. 4.7(a) にインピーダンスパラメータの算出結果の一例を示す．



(i) Impedance parameter value of inertial element m_{311} and m_{211}



(ii) Impedance parameter value of inertial element m_{312} and m_{212}



(iii) Impedance parameter value of inertial element m_{313} and m_{213}

Fig. 4.7: Examples of transition of impedance parameter value

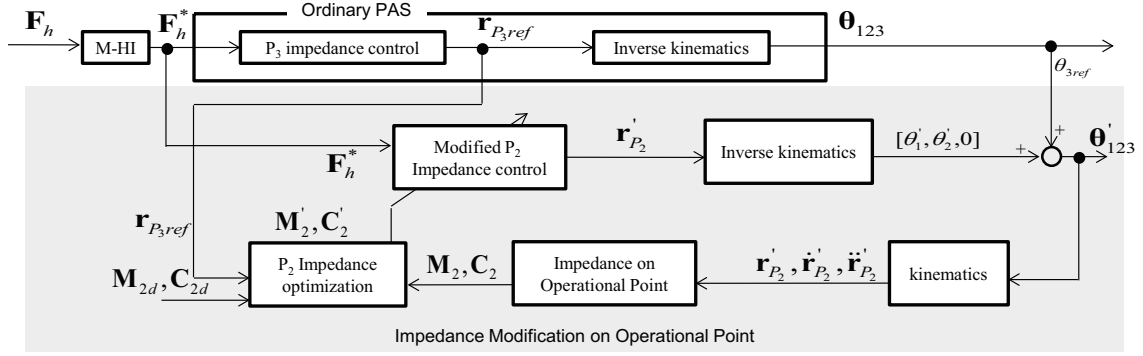


Fig. 4.8: Impedance modification on operational point

Fig. 4.7(a) より，操作点のインピーダンスパラメータが先端部に設定した値と大きく異なることが確認できる．

4.3 操作点インピーダンス修正

4.3.1 操作点インピーダンス修正

操作点のインピーダンスパラメータは先端部に設定したインピーダンスパラメータと大きく異なることを確認した．そこで，操作性を向上させるため操作点インピーダンスを修正することを考える．**Fig. 4.8** に操作点インピーダンス修正のブロック図を示す．今回は操作点を P_2 に限定し，対象の動作を直線経路の追従とする．理想的な操作点のインピーダンス M_{2d}, C_{2d} は，次式に示すように PAS 先端部に設定したインピーダンスと一致することが望ましいと考えられる．

$$M_{2d} = \begin{bmatrix} m_{2d11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{2d22} & 0 \\ * & * & * \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$C_{2d} = \begin{bmatrix} c_{2d11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{2d22} & 0 \\ * & * & * \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Fig. 4.7(b) に修正後の P_2 インピーダンスパラメータの算出結果の一例を示す．このデータは M-HI 操作性評価実験と同様の条件で r_{t1} 方向に動作させた場合のものである．**Fig. 4.7(b)** より，修正後の操作点インピーダンスパラメータ推定値は，目標として設定したインピーダンスパラメータにほぼ一致して推移していることが確認できる．

4.3.2 操作点インピーダンス修正量の最適化

前節に示した操作点インピーダンスの修正によって， P_2 の並進運動における要素のみではあるが，先端部の所望のインピーダンス値に近づけることを確認した．しかし，この

操作点インピーダンスの修正により，先端部のインピーダンスモデルの挙動に誤差が生じる．そこで次式に示す調整係数 β を用いて，最適な操作点インピーダンス修正量に制御できるように修正後の操作点インピーダンス $\mathbf{M}'_2, \mathbf{C}'_2$ を設計する．

$$\mathbf{M}'_2 = \mathbf{M}_2 - \beta(\mathbf{M}_2 - \mathbf{M}_{2d}) \quad (4.17)$$

$$\mathbf{C}'_2 = \mathbf{C}_2 - \beta(\mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_{2d}) \quad (4.18)$$

$$\mathbf{M}'_2 \ddot{\mathbf{r}}_{p_2} + \mathbf{C}'_2 \dot{\mathbf{r}}_{p_2} = \alpha \mathbf{F}_h^* \quad (4.19)$$

調整係数 β を調整するため，操作点のインピーダンスモデルの挙動誤差や，先端部と操作点のインピーダンスの差を評価指標として，評価関数を設計することが考えられるが，各評価指標は，操作点インピーダンスの所望のインピーダンスとの差を用いて ε_M と ε_C として次式に定義する．

$$\varepsilon_M = \frac{\|\mathbf{M}_2 - \mathbf{M}_{2d}\|}{\|\mathbf{M}_3\|}, \varepsilon_C = \frac{\|\mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_{2d}\|}{\|\mathbf{C}_3\|} \quad (4.20)$$

また，インピーダンス修正を施したことによる PAS 先端部の挙動誤差を次式のように定義する．

$$\varepsilon_r = \frac{\|\Delta \mathbf{r}_{p3} - \Delta \mathbf{r}'_{p3}\|}{\|\Delta \mathbf{r}_{p3}\|} \quad (4.21)$$

これらの評価指標 ε_M ， ε_C 及び ε_r を用いて操作点インピーダンス修正量の最適化を行う．目的関数 V を次式のように定義する．

$$V = k_M \varepsilon_M + k_C \varepsilon_C + k_r \varepsilon_r \quad (4.22)$$

ここで， k_M ， k_C ， k_r はそれぞれ，評価指標 ε_M ， ε_C ， ε_r の重み係数である．

β 最適化の目的関数を $V(\beta)$ とすると， $0 \leq \beta \leq 1$ の制約条件の下， V を最小とする β を逐次算出することで，最適な β を β_{opt} として，以下の最適化問題を解くことで求める．

$$\beta = \beta_{opt} \quad \{0 \leq \beta \leq 1, V(\beta_{opt}) \leq V(\beta)\} \quad (4.23)$$

β_{opt} の探索方法は，制約条件下で β を0.01刻みで0から1まで変化させ， $V(\beta)$ が最小になる β_{opt} を全探索する．

本実験ではインピーダンス修正のための指標と先端部誤差のための指標が同等の重みになるよう， $k_M, k_C = 0.5, k_r = 1.0$ とした．先の実験例での実際の各評価指標の推移を **Fig. 4.9** に示す．

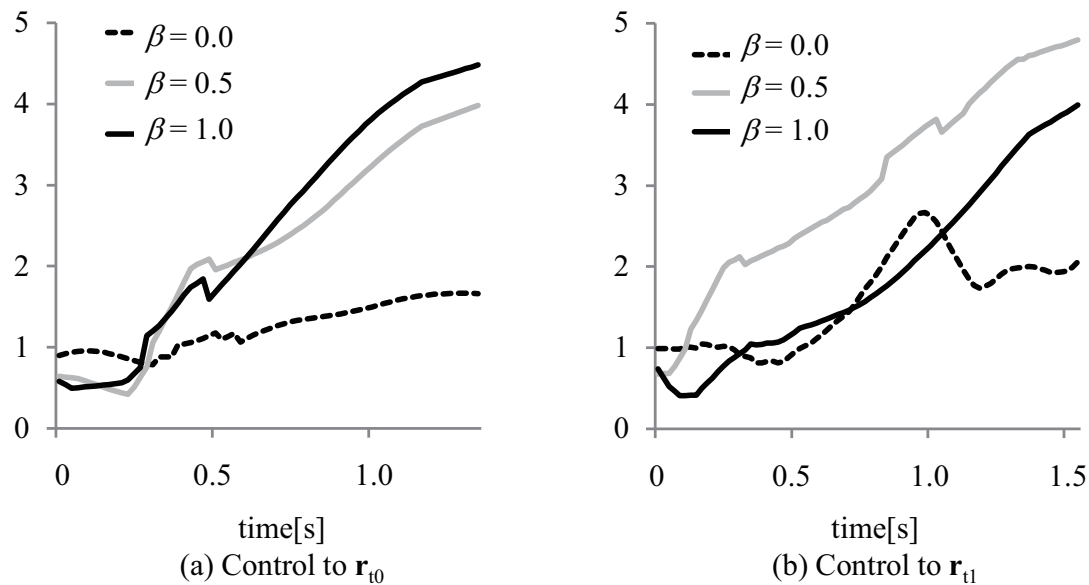


Fig. 4.9: Transitions of evaluation criteria for optimization of impedance modification

Fig. 4.9 より，操作方向や，時刻により各評価指標が変化することを確認した．これより，逐次目的関数を最小とする β を算出する．

Fig. 4.10 に β 逐次最適化における評価関数 V 及びその最小値のシミュレーション結果を示す．本シミュレーションでは，PAS 先端部を $\mathbf{r}_{t3}$ 方向へ 0.2m 動作させる試行である．またトルクを時計回りに $0.2[\text{N} \cdot \text{m}]$ に加えているものとして設定した．Fig. 4.10 より，PAS 動作中，評価関数 V が最小となるよう β を調整可能であることを確認した．

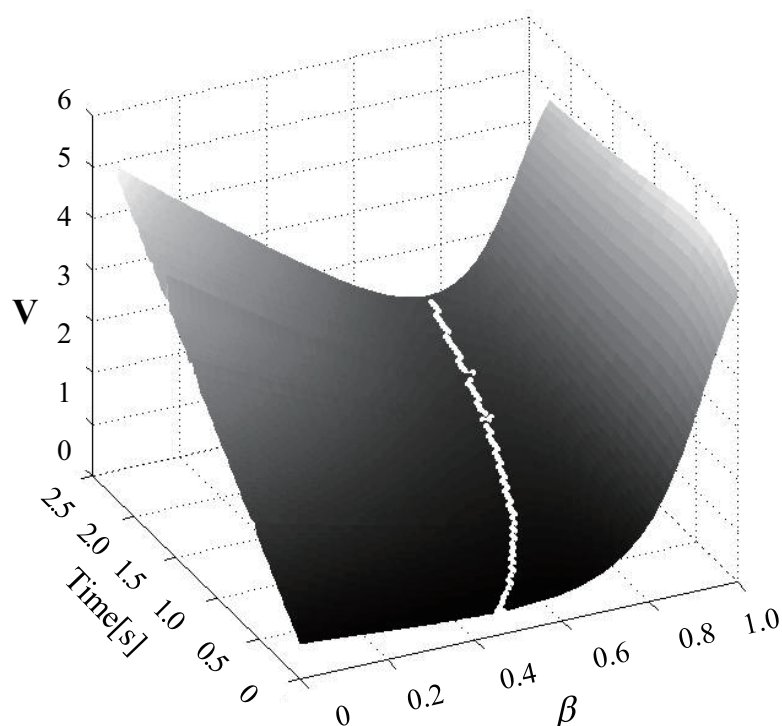


Fig. 4.10: Evaluation function for optimization of impedance modification

4.4 操作点インピーダンス修正評価実験

操作点インピーダンス修正の操作性評価実験を行う。3章で行ったシミュレーションと同様の作業を実機を用いて試行する。操作点インピーダンス修正を施した場合、評価指標である経路追従誤差及び、目標到達時間がどのように変化するかを確認する。

実験結果を **Fig. 4.11(a-c)** に示す。ここで $\beta_0, \beta_{opt}, \beta_1$ はそれぞれ、操作点インピーダンス修正量調整係数 β が 0, 最適化, 1 の場合を表している。図 4.11(a) より、操作点インピーダンス修正を施した場合、目標経路追従誤差が減少し操作性を改善していることを確認した。また図 4.11(b) より、操作点インピーダンスを修正した場合の目標点到達時間の短縮を確認した。それぞれ、目標点到達時間に関しては β 最適化時に 34%, $\beta = 1$ のとき 32% の改善が確認された。

続いて、 β におけるインピーダンスパラメータの修正量を確認する。前章で定義したインピーダンスパラメータの誤差による評価指標の平均値 $\bar{\varepsilon}_M$ と $\bar{\varepsilon}_C$ を用いた。結果を Fig. 4.11(c) に示す。

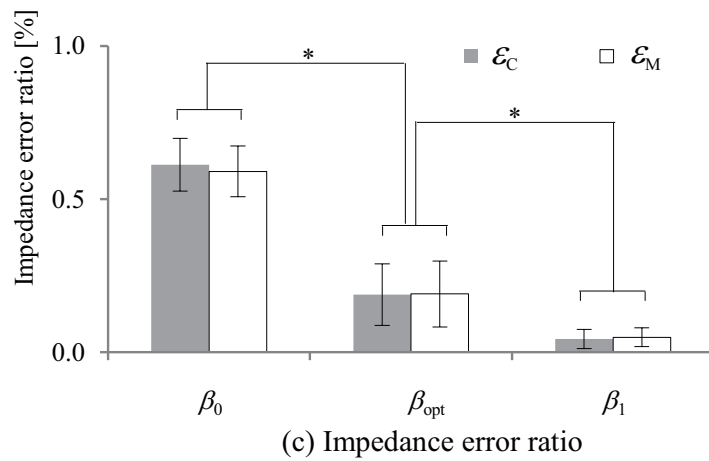
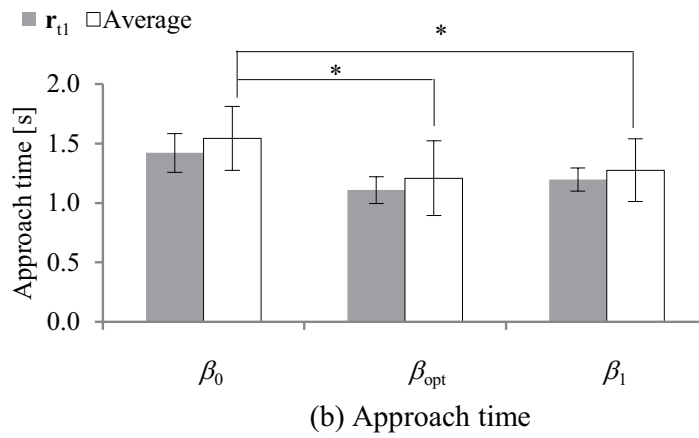
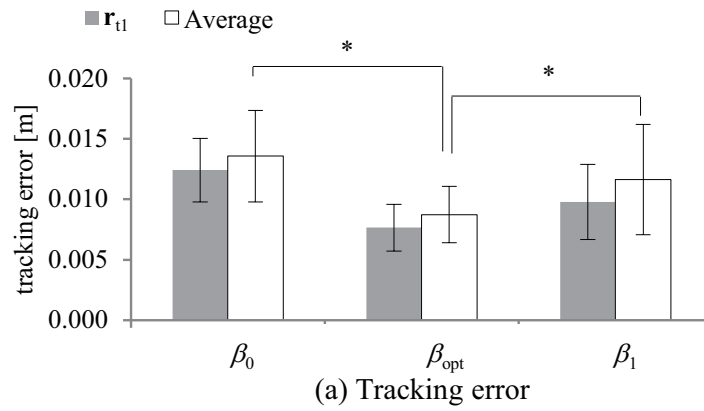


Fig. 4.11: Experimental result by impedance modification parameter β

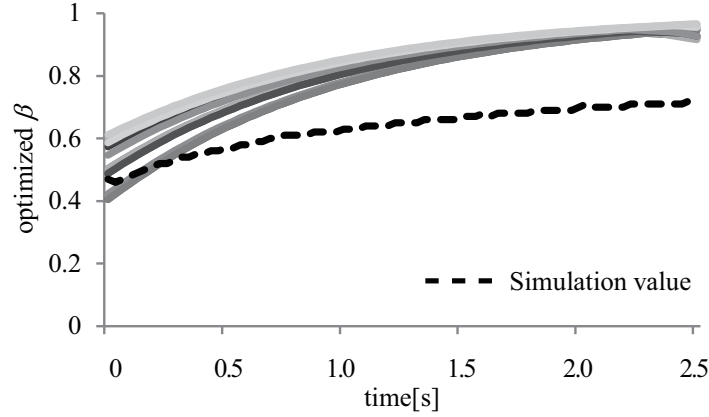


Fig. 4.12: Experimental result of impedance modification parameter β transition

Fig. 4.11(c) より, β 最適化時及び, $\beta = 1$ のとき操作点のインピーダンス誤差を軽減していることを確認した. インピーダンス修正を適用した場合, 適用してない場合と比べて β 最適化時において, 慣性, 粘性どちらにおいても約 70%, $\beta = 1$ の際には 90% のインピーダンス誤差軽減効果を確認した.

Fig. 4.12 に最適化動作時の β の推移を示す. 実線は実験時のものを, 破線はシミュレーション時の β の推移である. Fig. 4.12 より, 実際に動作させた場合の方が β の変化が急であるものの, シミュレーションと同傾向であることが確認できた.

最後に, インピーダンス修正における操作点および先端部の動作について比較する. インピーダンス修正アルゴリズムでは, 操作点のインピーダンスが先端部に設定した所望のインピーダンスに近づくよう PAS の運動を逐次修正している. その際修正した操作点の運動は先端部とどれだけ異なるのかを確認する. 運動の違いを表す評価指標として次式に示す各点の瞬時の速度および加速度の差 $\varepsilon_v, \varepsilon_a$ を評価指標として **Fig. 4.13, 4.14** に結果をまとめる.

$$\varepsilon_v = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} |\dot{\mathbf{r}}_{p_2} - \dot{\mathbf{r}}_{p_3}| \quad (4.24)$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} |\ddot{\mathbf{r}}_{p_2} - \ddot{\mathbf{r}}_{p_3}| \quad (4.25)$$

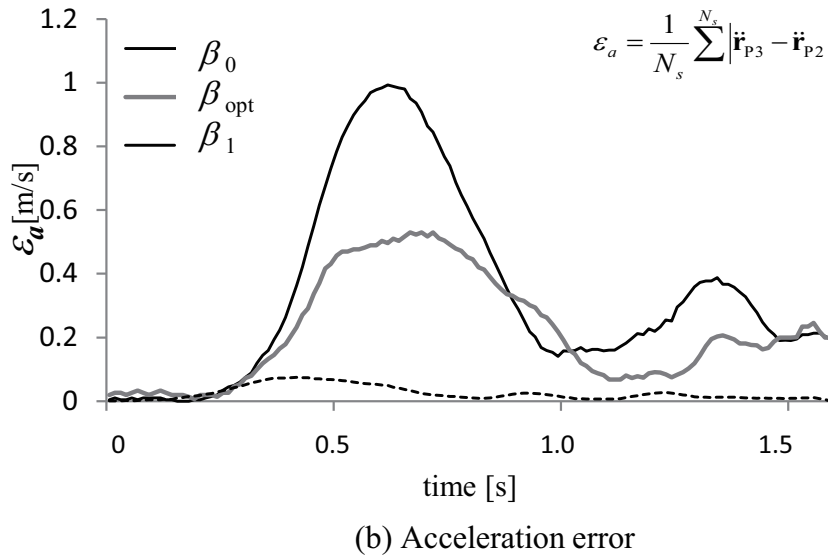
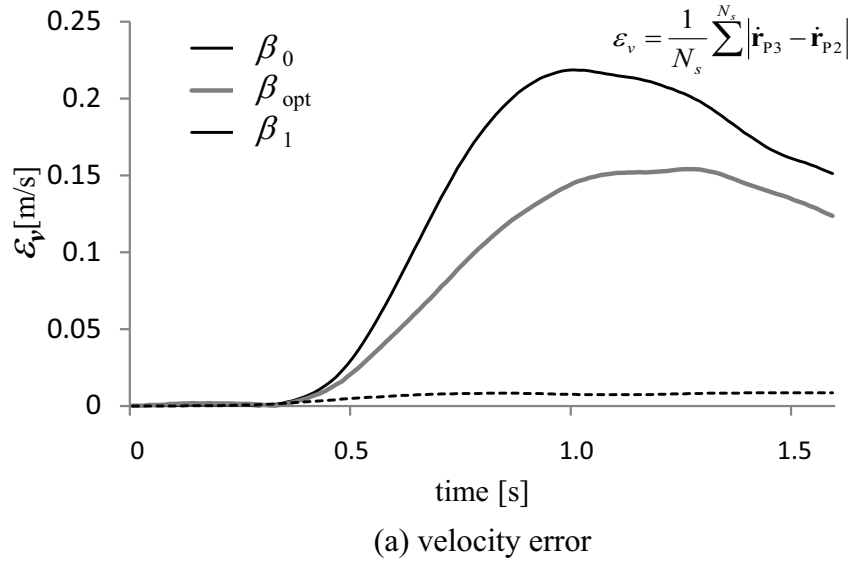


Fig. 4.13: Experimental result of motion error between P_2 from P_3

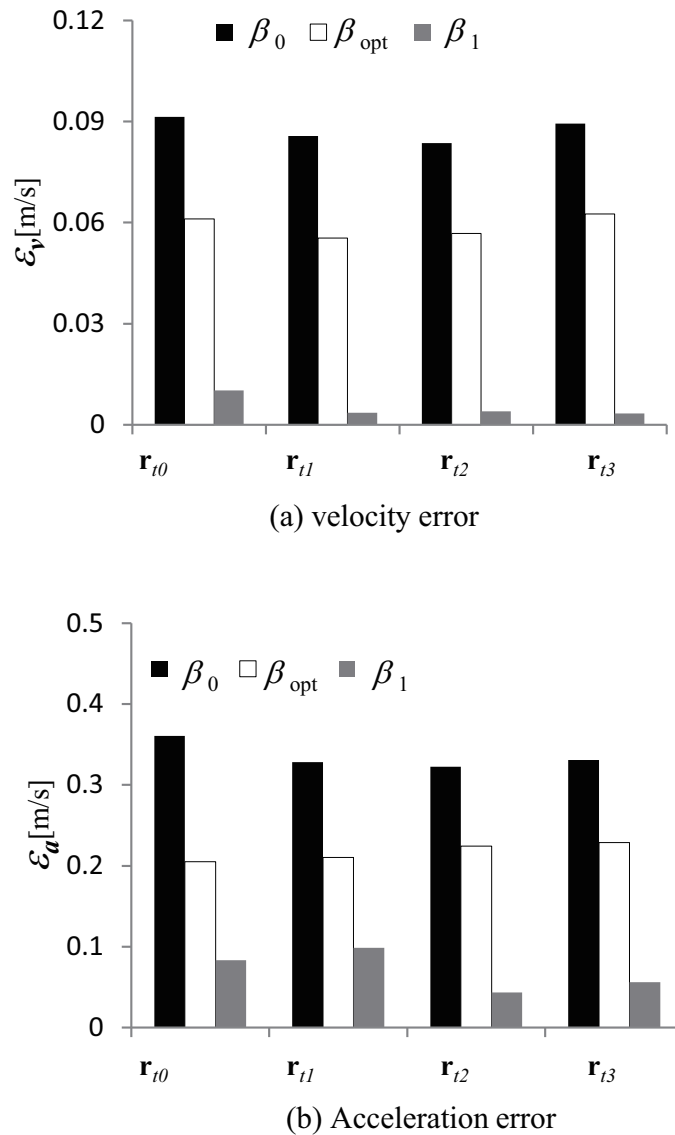


Fig. 4.14: Average of experimental results of motion error between P₂ from P₃

Fig. 4.13 より、インピーダンス修正を加えることで速度、加速度のどちらに関しても、操作点の運動が先端部の運動に近づいていることが確認できる。また Fig. 4.14 より、各経路毎の平均値でも、目標の軌道によらず同様の傾向をしめしており、インピーダンスを修正することで、操作点の挙動も先端部に近づいていることが確認できた。ただし、今回の実験は操作点の自由度が操作点より先の自由度よりも多い場合であったため、今後操作点を変えてより操作点の運動拘束がより厳しくなった場合の特性も確認する必要がある。

4.5 第4章のまとめ

本章では、M-HI を適用した PAS の P_2 点からの操作性が、先端部 P_3 からの操作よりも低下することを実験的に確認した。そこで、我々は新たに操作点 P_2 のインピーダンスに着目し、計算の結果、 P_3 に設定したインピーダンスパラメータから大きく異なることを確認した。さらに、操作点のインピーダンスの修正を提案し、今回は完全に理想的なインピーダンスを P_2 に設定し、操作性がどのように変化するかを確認する実験を行った。操作点のインピーダンスを修正することにより、操作性の評価指標とした目標経路追従誤差および目標点到達時間において改善を確認した。また、図 4.11(a) より、インピーダンス修正量を最適化した場合、先端部経路追従誤差が最も小さくなることを確認した。このことから単にインピーダンスを修正するだけでなく、先端部挙動を考慮し修正量を最適化することによって、M-HI 適用 PAS の操作性を改善可能であることを確認した。

第5章 操作点における力の干渉を考慮した 操作点運動協調化

本章では、PAS 先端部を制御する際に M-HI を用いて任意点から操作する場合、操作点の挙動と PAS 先端部の挙動は一般には一致しない。そのため、操作性が低下することが考えられる。操作点の運動方向と操作力の方向のずれによる力を操作点干渉力と定義し、それが操作性へ及ぼす影響を評価した。操作点干渉力と操作性の関係からそれぞれの最適化を行う操作点運動協調化 (OPMH : Operational Point Motion Harmonization) を提案した。OPMH を適用した PAS 実機を用いてその有効性を評価する。

5.1 3 リンク PAS への M-HI の適用と干渉力問題

PAS 中間点を操作する場合、操作点の PAS の運動が操作者の運動と一致しないことがある。例えば、Fig. 5.1 のような矢状面上で動作する 3 リンク 3 自由度マニピュレータを M-HI を用いて 2 リンク端 P_2 から操作する場合を考える。M-HI の操作インタフェースは操作点に対して固定されており、その位置、姿勢は操作点の運動に従って変化する。提案する M-HI を搭載した PAS は、操作入力 $\mathbf{F}_h$ に対して、先端部に疑似的な操作入力 $\mathbf{F}_h^*$ が入力されたと判断し、増力比を α として、PAS 先端部から $\alpha\mathbf{F}_h^*$ を出力する。ここで、 P_2 における PAS が出力する力を $\mathbf{F}_{R2}$ とすると PAS の構造上操作力 $\mathbf{F}_h$ と異なる方向に $\mathbf{F}_{R2}$ が出力される。その結果、干渉力 $\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_{R2} - \mathbf{F}_h$ が発生し、PAS が操作者の運動を妨げ操作性の悪化を招く。本章では、この問題を解決し M-HI を搭載した PAS の安定した操作を実現する。

Kazerooni の Human Extender [70] では、操作点が PAS 先端部よりもやや PAS ベース寄りのリンク中間点に設けられているが、Extender の場合は PAS 機械機構の設計段階から、操作者と PAS の干渉を考慮して設計されている。我々は既存の PAS のインタフェースを改良することにより M-HI の実現を目指しているため、PAS の機構の設計段階での操作性の検討及び改善は想定していない。そのため、我々は単に PAS 先端部で $\mathbf{F}_h^*$ を増幅するだけでなく、操作点の運動が操作の妨げとならないよう自律的に PAS を制御する必要がある。例えば、河本らは PAS のリハビリテーションへの応用の際、ユーザーの安全を考慮し筋電位から操作者の意図を推定するとともに、自律的にも制御している [16]。一方、小山らは PAS のインピーダンスを調整し、PAS と操作者との干渉力が閾値以下となるようフィルタリングし、干渉を軽減している [71]。また、Nathanael らは Exoskeleton において、制御にモビリティの最大化及び最小化を組み込むことで、人間-機械間の固定点に生じる干渉力の最小化を実現している [72]。

本章では、M-HI を搭載した PAS の安定した操作を実現するために、まず、PAS 操作点

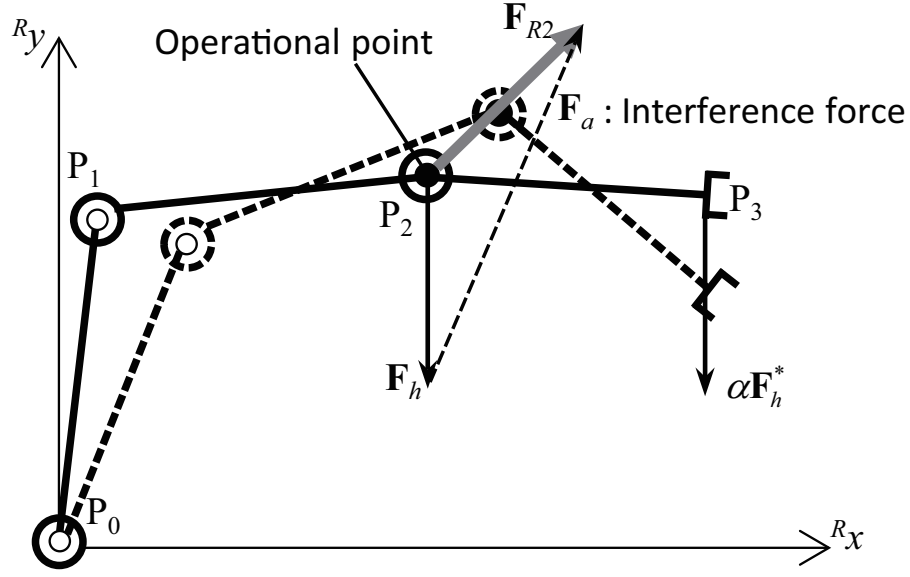


Fig. 5.1: An example that PAS with M-HI disturbs user's motion.

発揮力と操作力の相互干渉が操作性に及ぼす影響を実験的に明らかにする．次に，操作点での力の干渉を軽減するように PAS の運動に修正を加える．このとき，運動の修正によって PAS 先端部の操作精度の低下を抑えつつ，干渉力軽減の度合いを逐次調整する操作点運動協調化 (Operational Point Motion Harmonization:OPMH) を提案する．最後に，シミュレーション及び実機において OPMH の性能を評価する．

5.1.1 M-HI 適用 PAS の構成と制御

M-HI では，操作者が任意の操作点から入力した操作力 $\mathbf{F}_h$ を元に PAS 先端部に入力した場合の操作力 $\mathbf{F}_h^*$ を推定する [30, 73]．我々の先行研究 [73] によって， $\mathbf{F}_h^*$ は $\mathbf{F}_h$ と基本的に等しく，視空間認識能力に伴う方向安定性を考慮し，操作力方向に補正をかけることで，安定した操作性を実現できることを示しているが，本章では，提案手法である自律的な PAS 制御の評価を明確化するため次式に示すように，PAS ベース座標系から見た $\mathbf{F}_h$ と $\mathbf{F}_h^*$ は等しいものとする．

$$\mathbf{F}_h^* = \mathbf{F}_h \quad (5.1)$$

PAS 先端部への操作入力として $\mathbf{F}_h^*$ を用いることにより，PAS 自体の制御系に変更を加えずに PAS 中間関節からの操作が可能になる．

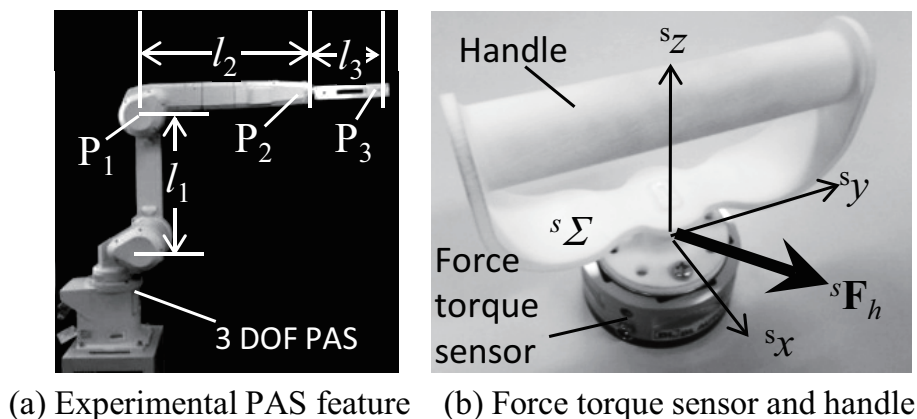


Fig. 5.2: The experimental PAS and operational force input device.

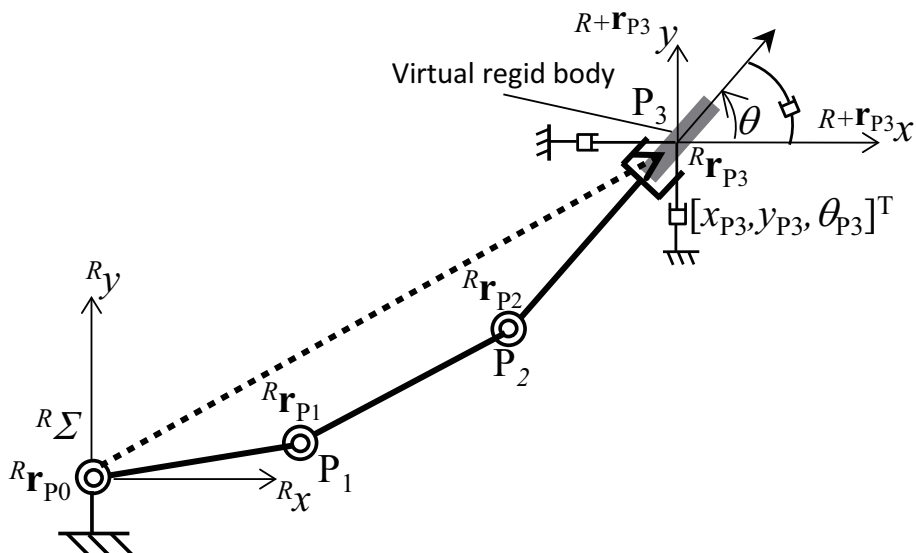


Fig. 5.3: PAS control method using Impedance control.

Fig. 5.2 に、本実験で使用する PAS 実機 (a) および M-HI 入力インタフェース (b) を示す。PAS は 6 自由度マニピュレータロボットのうち、ベースから第 2, 3, 5 関節のみを使用し矢状面 ($x-z$ 平面) 上を可動範囲とする 3 自由度 PAS である。各リンクの長さは、それぞれ $l_1 = 0.56\text{m}$, $l_2 = 0.67\text{m}$, $l_3 = 0.34\text{m}$ である。M-HI 入力インタフェースは、図のように 6 軸フォース・トルクセンサ (ビー・エル・オートテック製: BL 0353 10/100, 計測精度 $\pm 1\%$) にハンドルを取り付けた。センサは各リンク端 P_1 , P_2 , P_3 のいずれかに固定され、センサの姿勢及び操作者の手先姿勢は固定されたリンクに従って変化する。 P_3 にセンサを取り付けた場合が従来の PAS であり、 P_2 , P_1 に取り付けて操作する場合が M-HI を適用した PAS である。

この 3 自由度 PAS に **Fig. 5.3** のように、インピーダンス制御を施す [74, 75]。操作者は

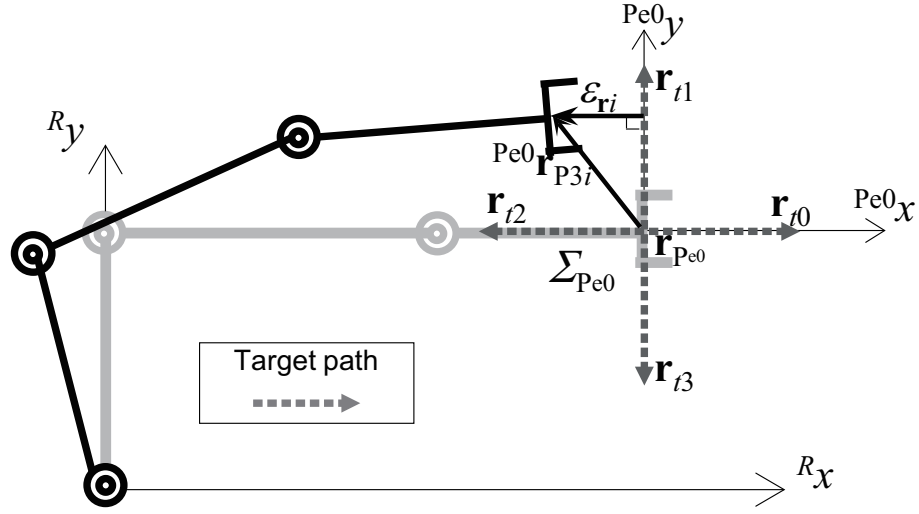


Fig. 5.4: Experimental settings of target path and an example of tracking error of end effector orbit ε_{ri} .

操作点に取り付けられた M-HI のハンドルを握って、操作力 $\mathbf{F}_h = [F_{hx}, F_{hy}, \tau_{hz}]^T$ を入力する．PAS 先端部には式 (1) により擬似操作力 $\mathbf{F}_h^*$ が入力され、増力比を α として、次式によって与えられるインピーダンス制御則より、手先目標位置 $\mathbf{r}_{p_3} = [x_{p_3}, y_{p_3}, \theta_{p_3}]^T$ を算出し、逆運動学演算から関節角度指令値を求めて、位置制御を行う．

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{r}_{p_3}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d \mathbf{r}_{p_3}}{dt} = \alpha \mathbf{F}_h^* \quad (5.2)$$

ここで、式 (5.2) において $\mathbf{M}$ は慣性係数行列、 $\mathbf{C}$ は粘性係数行列を表す．なお、本実験では $\alpha = 1.0$ としている．また、PAS の動特性は次式で表される．

$$\begin{aligned} \tau_R &= \tilde{\mathbf{M}}(\theta) \ddot{\theta} + \tilde{\mathbf{h}}(\theta, \dot{\theta}) + \tilde{\mathbf{g}}(\theta^*) \\ &+ \tilde{\mathbf{D}} \dot{\theta} + \tilde{\mathbf{f}}_r \text{sgn}(\dot{\theta}) - \tau_h \end{aligned} \quad (5.3)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{h}}(\theta, \dot{\theta})$, $\tilde{\mathbf{g}}$, $\tilde{\mathbf{D}}$, $\tilde{\mathbf{f}}_r$ は公称の慣性、遠心力・コリオリ力、重力、粘性減衰係数、クーロン摩擦力であり、 τ_R は関節駆動力、 τ_h は操作力 $\mathbf{F}_h$ により PAS に加わる外力である．本実験では、PAS の操作性を無負荷状態での動作によって評価するため、操作力及び、粘性摩擦力、クーロン摩擦力以外の外部からの負荷は考慮しないものとする．

5.1.2 2次元3自由度PASの任意操作点における運動拘束

Fig. 5.2(b) に示す M-HI の入力インタフェースは PAS 操作点に固定され、そのハンドルの位置、姿勢は PAS の運動に伴い変化するため、3自由度 PAS を任意操作点から操作する場合、操作点から PAS ベースまでの関節自由度によって、M-HI のハンドルを握った操作者の運動に拘束が生じる．つまり、 P_3 から操作する場合、位置、姿勢ともに運動拘束を

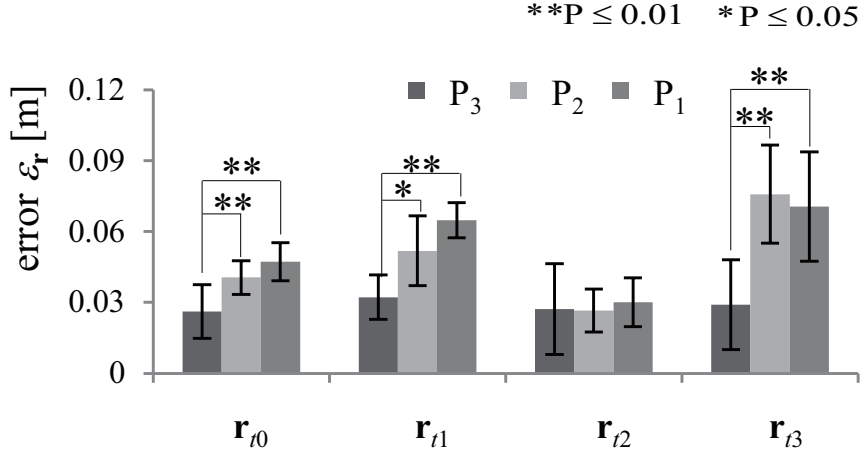


Fig. 5.5: Experimental results of operational accuracy of PAS applied M-HI.

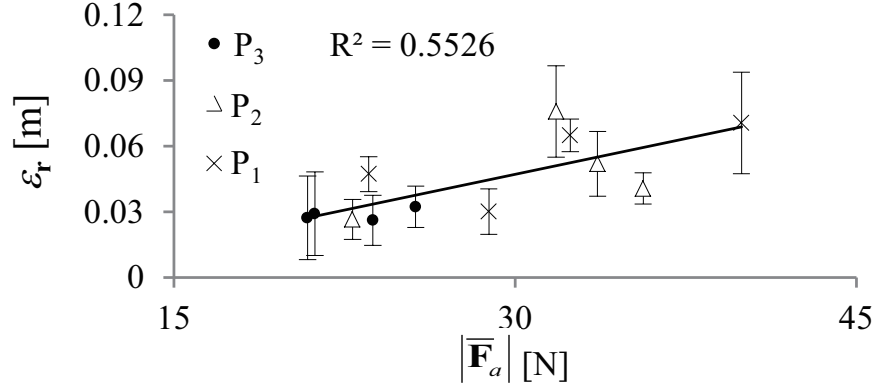


Fig. 5.6: Relation between average interference force $|\mathbf{F}_a|$ and control accuracy ε_{ri} .

受けない。しかし、 P_2 から操作する場合には、平面上の位置は任意に指定可能であるが、姿勢を制御できず、また、 P_1 から操作する場合には、操作点の運動空間は円周上に制限される。これらの運動拘束により、操作点は操作者の意図しない運動を行い、その結果、操作者は次式の操作点干渉力 $\mathbf{F}_a$ を受ける [76]。

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_{Rn} - \mathbf{F}_h \quad (5.4)$$

ここで、 $\mathbf{F}_{Rn}$ ($n = 1, 2, 3$) はマニピュレータの n リンク端の操作点 P_n で PAS が発する力であり、式 (3) の動特性により算出される。この操作点干渉力が操作性の悪化に影響しているものと考え、以下にその大きさ $|\mathbf{F}_a|$ と PAS 操作性との関係を調べる。

5.1.3 操作点干渉力と操作性の関係

M-HI を適用した PAS の各操作点から PAS 先端位置を制御した際の、操作点干渉力及び PAS 先端部の目標軌道追従誤差を調べる。

実験条件を Fig. 5.4 に示す。操作者は P_3, P_2, P_1 いずれかに固定した M-HI に操作力を入

かし、初期姿勢から上下前後方向に設定した PAS 先端部のターゲット $\mathbf{r}_{tj}$ ($j = 0 \sim 3$) に向かって、直線的に 0.2m 移動させる。被験者には PAS 先端位置を常に意識させ、各操作を 10 回ずつ試行した。

ここで、PAS の操作性を次式に定義する各目標経路の平均追従誤差 $\varepsilon_{\mathbf{r}}$ によって評価する。

$$\varepsilon_{\mathbf{r}} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s} \varepsilon_{\mathbf{r}i} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s} \sqrt{|\mathbf{p}_{e0} \mathbf{r}_{p3i}|^2 - \frac{(\mathbf{p}_{e0} \mathbf{r}_{p3i} \cdot \mathbf{p}_{e0} \mathbf{r}_{tj})^2}{|\mathbf{p}_{e0} \mathbf{r}_{tj}|^2}} \quad (5.5)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{e0} \mathbf{r}_{p3i}$, $\mathbf{p}_{e0} \mathbf{r}_{tj}$ はそれぞれ、PAS 先端部初期位置座標系 $\Sigma_{\mathbf{p}e0}$ 上での、PAS 先端部位置と目標位置であり、 N_s は 1 試行における総ステップ数を表す。 $\varepsilon_{\mathbf{r}}$ が小さいほど、PAS の操作性が良いことを表す。

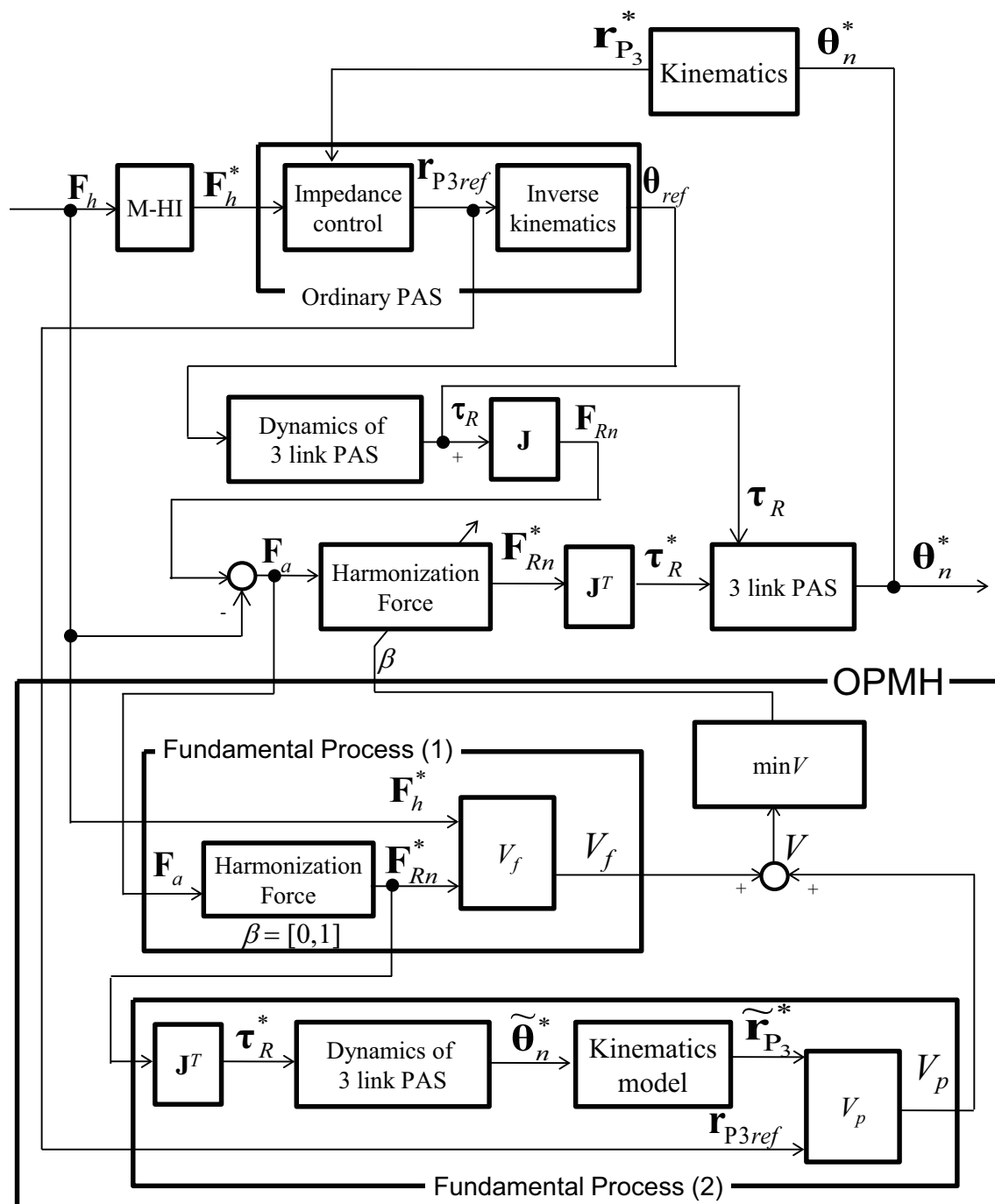


Fig. 5.7: Block diagram of operational point motion harmonization.

P_1, P_2, P_3 を操作点としてターゲット方向に PAS を操作した際の平均追従誤差 ε_r を Fig. 5.5 に示す. 図中における *, ** は, テューキーの方法による多重比較の P 値の段階を示しており, 5% 以下, 1% 以下を示している. 実験結果より, r_{t2} を除く全ての経路で P_3 から操

作した場合に比べて P_1 及び P_2 から操作した場合、平均追従誤差 ε_r が大きくなり操作性が低下していることが確認できるが、その程度には傾向は見られない。

つぎに、すべての実験において、操作点干渉力の大きさの平均値 $|\bar{\mathbf{F}}_d|$ と ε_r との関係について調べた。その結果を、**Fig. 5.6** に示す。このとおり、操作点に関わらず、 $|\bar{\mathbf{F}}_d|$ と ε_r とに強い相関があり、操作者と PAS の運動の違いによって生じる干渉力が大きければ操作性が悪化することが、逆に P_1 及び P_2 を操作しても操作点干渉力が小さければ、操作性が良いことが確認できた。

以上により、操作点干渉力を軽減することで操作性を向上させることが期待できる。

5.2 操作点運動協調化 (OPMH)

5.2.1 操作点運動協調化アルゴリズム

操作性低下を引き起こす操作点干渉力を軽減するため、操作点を操作力と協調させて制御する操作点運動協調化 (Operational Point Motion Harmonization: OPMH) を提案する。OPMH は以下の 2 つの基本処理を最適化しながら PAS の運動を補正する。

[OPMH の基本処理]

1. 操作点干渉力 $\mathbf{F}_a$ を軽減するよう操作点の運動を補正する。
2. (1) の操作点の運動補正により生じる PAS 先端部の挙動誤差を抑制する。

OPMH を適用した PAS のブロック図を **Fig. 5.7** に、操作点干渉力軽減の概念を **Fig. 5.8** に示す。

操作点干渉力を 0 にすることは、すなわち $\mathbf{F}_{Rn}$ を $\mathbf{F}_h$ に等しくすることであるが、PAS 先端部の運動が式 (1), (2) より得られる操作者が意図する運動と異なってしまう。そこで、**Fig. 5.8** のように、操作点干渉力と逆向きの補正力 $-\beta\mathbf{F}_a$ (ただし、 β は重み係数であり、 $0 \leq \beta \leq 1$) を操作点に加えることで、操作点の運動が $\mathbf{F}_h$ に近づくように PAS の運動に補正を加える。

補正後の操作点発揮力 $\mathbf{F}_{Rn}^*$ を次式に示す。

$$\mathbf{F}_{Rn}^*(\beta) = \mathbf{F}_{Rn} - \beta\mathbf{F}_a = \beta\mathbf{F}_h + (1 - \beta)\mathbf{F}_{Rn} \quad (5.6)$$

ここで、干渉力を軽減し、かつ操作者が意図する PAS 先端部の運動を実現するための最適な β を求める。

β 最適化の目的関数を $V(\beta)$ とすると、 $0 \leq \beta \leq 1$ の制約条件の下、 V を最小とする β を逐次算出することで、最適な β を β_{opt} として、以下の最適化問題を解くことで求める。

$$\beta = \beta_{opt} \quad \{0 \leq \beta \leq 1, V(\beta_{opt}) \leq V(\beta)\} \quad (5.7)$$

β_{opt} の探索方法は、制約条件下で β を 0.01 刻みで 0 から 1 まで変化させ、 $V(\beta)$ が最小になる β_{opt} を全探索する。

β 最適化のための評価関数 V を次式に定義する。

$$V(\beta) = V_f(\beta) + V_p(\beta) \quad (5.8)$$

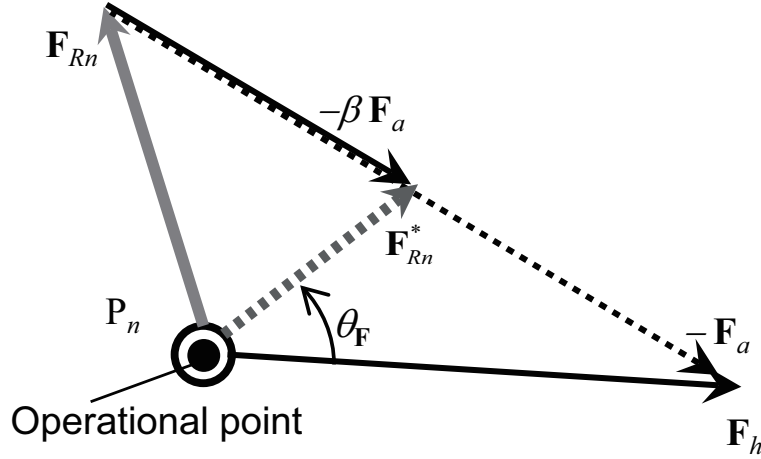


Fig. 5.8: A concept of the interference force reduction by OPMH.

ここで、式 (5.8) の右辺第 1 項 V_f 、第 2 項 V_p はそれぞれ、操作点干渉力の大きさによる要素と PAS 先端部の挙動誤差による要素を表す。 V_f を次式に定義する。

$$V_f(\beta) = (\cos \theta_F(\beta) + 1)/2 \quad (5.9)$$

$$\theta_F(\beta) = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{F}_{Rn}^*(\beta) \cdot \mathbf{F}_h}{|\mathbf{F}_{Rn}^*(\beta)| |\mathbf{F}_h|} \right) \quad (5.10)$$

式 (5.9,5.10) に定義したとおり、 V_f は操作点干渉力 $\mathbf{F}_a$ の方向を用いて、操作点での力の干渉度合いを正規化した指標である。

先端部位置誤差に関する評価関数 $V_p(\beta)$ は時刻 t の先端部位置を $\mathbf{r}_{p_3}(t)$ 、 Δt 後のインピーダンス制御則による先端部位置を $\mathbf{r}_{p_{3ref}}(t + \Delta t)$ 、 OPMH 適用後の先端部位置を $\tilde{\mathbf{r}}_{p_3}^*(t + \Delta t)$ とすると、各変化量は次式のように計算できる。

$$\Delta \mathbf{r}_{p_{3ref}} = \mathbf{r}_{p_{3ref}}(t + \Delta t) - \mathbf{r}_{p_3}(t) \quad (5.11)$$

$$\Delta \tilde{\mathbf{r}}_{p_3}^*(\beta) = \tilde{\mathbf{r}}_{p_3}^*(t + \Delta t, \beta) - \mathbf{r}_{p_3}(t) \quad (5.12)$$

これらの関係を **Fig. 5.9** に示す。ここで、本実験では PAS への外乱は無いものとして、 PAS 先端部位置 $\mathbf{r}_{p_3}$ は指令値 $\mathbf{r}_{p_{3ref}}$ 及び、補正された指令値 $\mathbf{r}_{p_3}^*$ の通りに動作するものとする。このようにして求めた OPMH 適用前後の PAS 先端部位置の変化量を用いて、先端部誤差に関する評価関数 V_p を次式のように計算する。

$$V_p(\beta) = (\cos \theta_p(\beta) + 1)/2 \quad (5.13)$$

$$\theta_p(\beta) = \cos^{-1} \left(\frac{\Delta \tilde{\mathbf{r}}_{p_3}^*(\beta) \cdot \Delta \mathbf{r}_{p_{3ref}}}{|\Delta \tilde{\mathbf{r}}_{p_3}^*(\beta)| |\Delta \mathbf{r}_{p_{3ref}}|} \right) \quad (5.14)$$

式 (5.13,5.14) に定義したとおり、 $V_p(\beta)$ は操作点協調化により、 PAS 先端部位置のずれを正規化した指標である。

補正後の PAS 先端部位置 $\tilde{\mathbf{r}}_{p_3}^*(t + \Delta t, \beta)$ は次のように算出する。 3 リンク PAS のヤコビ行列を $\mathbf{J}_{123} = [\mathbf{J}_1 \ \mathbf{J}_2 \ \mathbf{J}_3]$ 、 $(\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2, \mathbf{J}_3 \in \mathbb{R}^{1 \times 3})$ 、補正前の PAS 関節駆動力を $\boldsymbol{\tau}_R = [\tau_{R1}, \tau_{R2}, \tau_{R3}]^T$

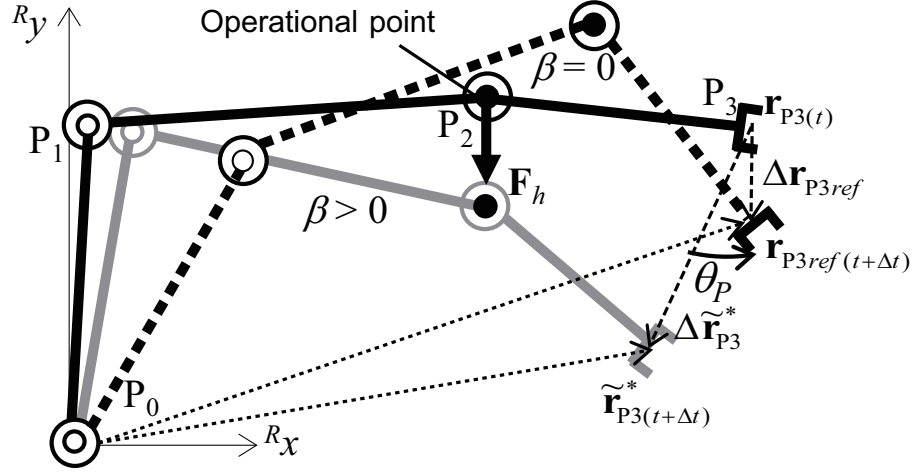


Fig. 5.9: Definition of end-effector motion error.

として、 P_1 , P_2 操作時の OPMH 適用後の関節駆動力 $\tau_R^* = [\tau_{R1}^*, \tau_{R2}^*, \tau_{R3}^*]^T$ を以下 (A), (B) に示す.

(A) P_1 操作時

$$\tau_R^* = [J_1^T F_{R1}^*(\beta) \quad \tau_{R2} \quad \tau_{R3}]^T \quad (5.15)$$

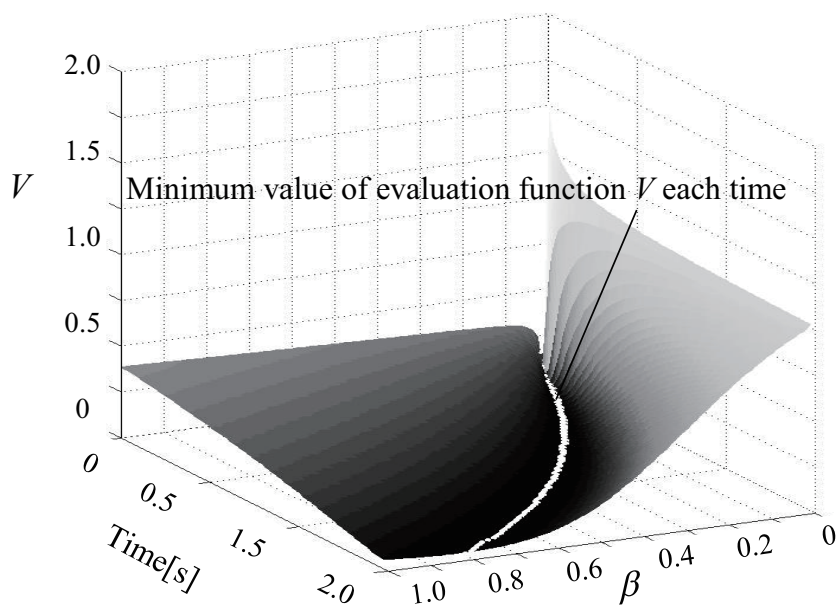
(B) P_2 操作時

$$\tau_R^* = [J_1 F_{R2}^*(\beta) \quad J_2 F_{R2}^*(\beta) \quad \tau_{R3}]^T \quad (5.16)$$

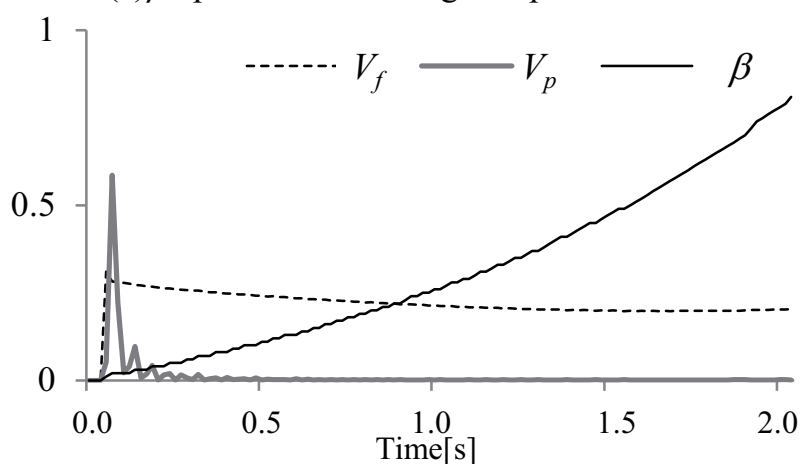
このように補正された関節駆動力を式 (3) の PAS 動力学モデルに $\tau_R = \tau_R^*$ として入力し、関節変位を算出し、順運動学演算によって OPMH 適用後の予測される PAS 先端部位置 $\tilde{r}_{P3}^*$ を算出する.

5.2.2 OPMH 適用 PAS の動作確認

動作例として、操作入力として鉛直下向きに 20N 加えかつ時計回りに 0.2N·m のトルクを加えた場合の P_2 操作時の β 最適化の様子を **Fig. 5.10** に示す.



(a) β optimization during an operation



(b) Transition of optimized V_f , V_p and β during an operation

Fig. 5.10: An example of β optimization during OPMH.

Fig. 5.10(a) は動作中の V の値を示しており、 V が常に最小になるように β を変化させていることを確認できる。Fig. 5.10(b) は最適化時の V_f , V_p 及び β_{opt} を示しており、 V_f , V_p の値に応じて β が 0 から 1 の間で滑らかに変化していることが確認できた。

β による PAS 動作の変化を Fig. 5.11 に示す。 $\beta = 0$ のとき操作力 $\mathbf{F}_h$ 方向と逆方向に動作しているが、 $\beta = 1$ のときには操作力方向に近い方向に動作している。 β 最適化時には、 $\beta = 0$, $\beta = 1$ の中間の動作をしていることが確認できる。

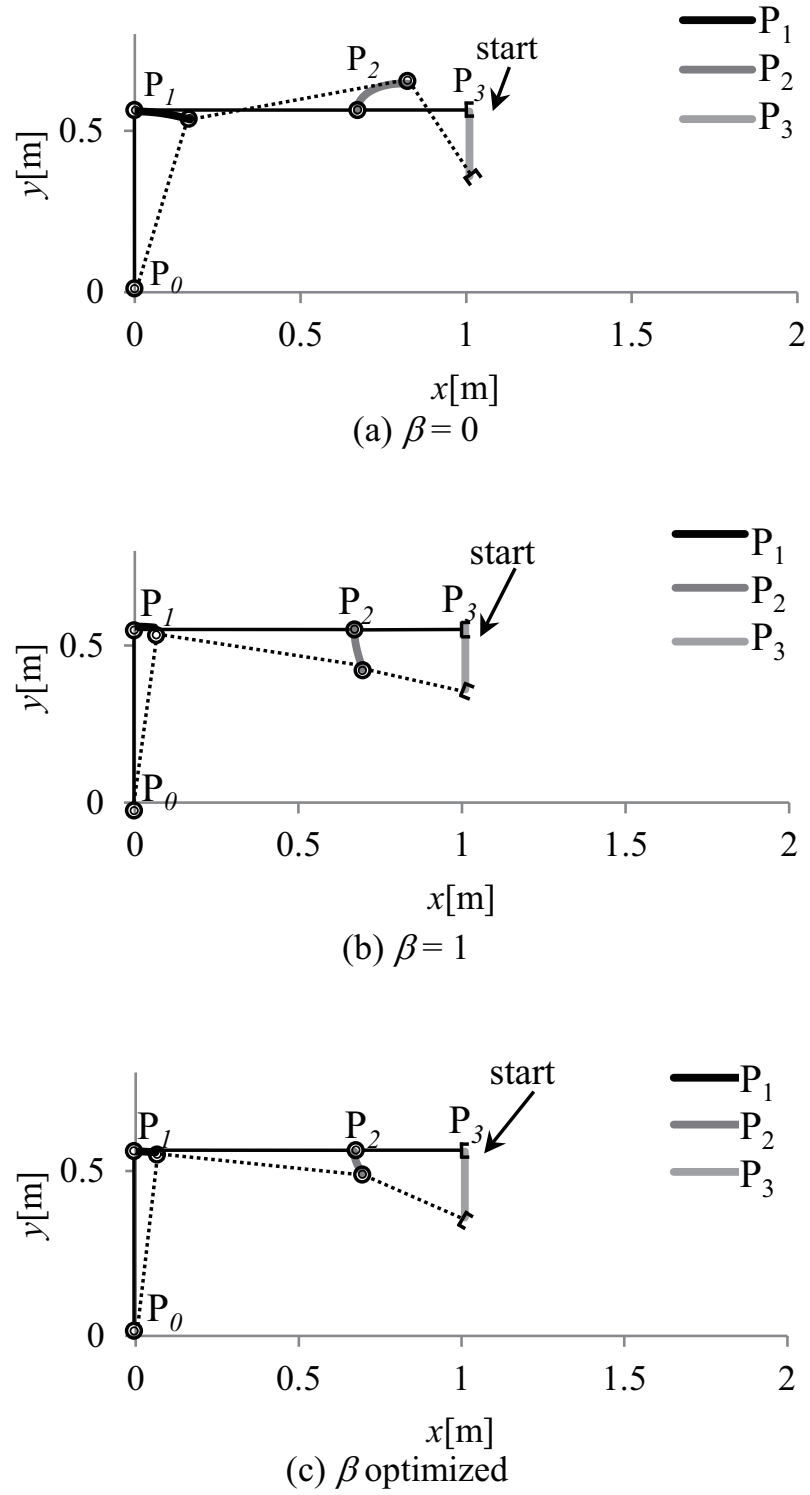


Fig. 5.11: Motion examples of each joint orbit $\beta = 0$, $\beta = 1$ and β optimized.

これらの結果から、OPMH が操作点運動を操作力方向に協調させるように PAS を制御できていることを確認した。

5.2.3 OPMH 適用 PAS の目標位置収束性の考察

調整係数 $\beta > 0$ のとき PAS 先端部は OPMH 適用前の挙動と異なる。ここでは、OPMH によって PAS の運動中に補正を加え続けた場合でも PAS 先端部が目標位置に到達可能であることを確認する。操作者は操作力 $\mathbf{F}_h$ を現在の PAS 先端部 $\mathbf{r}_{p3}^*$ から目標位置 $\mathbf{r}_t$ へ向かう方向に、次式のような力フィードバックをかけながら操作入力 $\mathbf{F}_h$ を入力すると仮定する。

$$\mathbf{F}_h = k_F(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_{p3}^*) \quad (5.17)$$

ここで、 $k_F[\text{N/m}]$ は力フィードバックゲイン（本シミュレーションでは $k_F = 100$ ）、 $\mathbf{r}_t$ は PAS 手先目標位置である。この操作入力 $\mathbf{F}_h$ を用いて、2 章での実験に用いた目標位置 $\mathbf{r}_{tn}$ へ到達可能かをシミュレーションにて確認したところ、どの目標位置についても 3s 以内に 1mm 近傍に収束した。これにより、OPMH による干渉力軽減の補正を加えても、これらの目標位置に到達可能であることを確認した。任意の目標位置に収束可能であることの証明は今後の課題とする。

5.3 OPMH 操作性評価シミュレーション

2 章における操作性評価実験と同様に、OPMH 適用 PAS のシミュレーションを行う。操作点干渉力の軽減効果及び、PAS 先端部の目標経路追従誤差、操作点アシスト比を評価する。操作者は PAS 先端部から $\mathbf{r}_{tn}$ に向かう方向に操作力 $\mathbf{F}_h$ を入力する。増力比 $\alpha = 1.0$ として、操作力の大きさは 10N から 40N まで 10N 刻みで行った。各評価指標において操作力の大きさに関わらず、同様の傾向が見られたことから、ここでは操作力の大きさとして 20N を用いた場合の結果を示すものとする。以下の実験結果において、 $\beta_0, \beta_1, \beta_{opt}$ はそれぞれ、操作点干渉力を考慮しない場合 ($\beta = 0$)、操作点干渉力を最大限打ち消した場合 ($\beta = 1$)、先端部挙動誤差を考慮して β を最適化した場合である。

5.3.1 操作点干渉力の軽減

操作点干渉力の大きさの平均 $|\bar{\mathbf{F}}_a|$ を用いて操作点干渉力の軽減効果を確認する。 $|\bar{\mathbf{F}}_a|$ が小さいほど、操作点干渉力が小さく、操作点発揮力と、操作力が協調しているといえる。結果を Fig. 5.12 に示す。

Fig. 5.12 より、目標位置によらず β_{opt} の $|\bar{\mathbf{F}}_a|$ が β_0 の $|\bar{\mathbf{F}}_a|$ よりも小さいことから、OPMH により、操作点干渉力 $|\mathbf{F}_a|$ を軽減できていることが確認できる。各経路を平均して P_1 操作では 15.0%、 P_2 操作では 21.1% の $|\bar{\mathbf{F}}_a|$ の軽減を確認した。このことから OPMH の適用による操作点運動と操作力との協調効果を確認した。

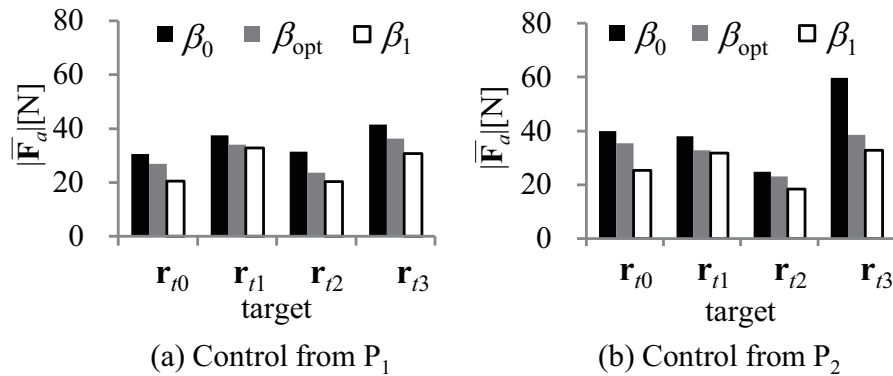


Fig. 5.12: Experimental results of average interference force.

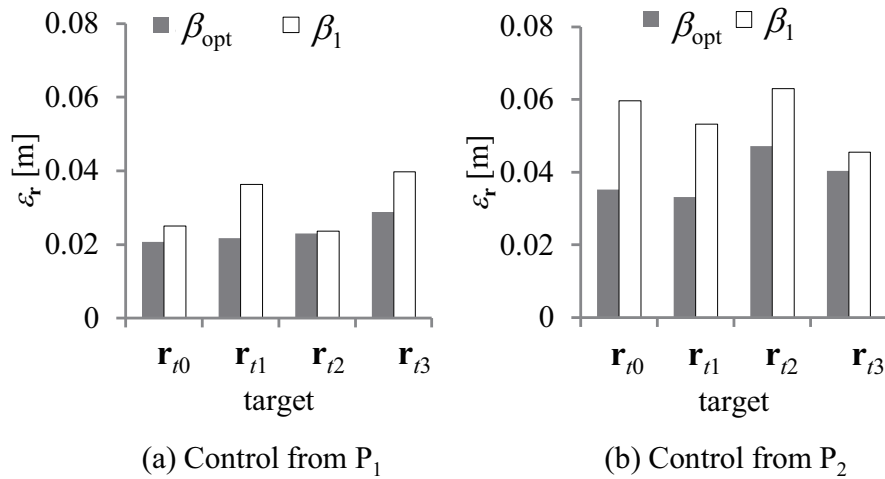


Fig. 5.13: Experimental results of average end-effector motion error.

5.3.2 先端部位置誤差の最適化

OPMH の β 最適化による PAS 先端部誤差の最小化効果を検証する．評価には 2 章の式 (5.5) にて定義した ϵ_r を用いる．結果を **Fig. 5.13** に示す． β_0 はシミュレーションでは 0 となるため，ここでは β_1 及び β_{opt} の結果を示している．**Fig. 5.13** から β_{opt} の ϵ_r が β_1 の ϵ_r よりも小さいため， β 最適化によって PAS 先端部誤差 ϵ_r を抑えていることを確認した．各経路を平均して P_1 操作では 24.4%， P_2 操作では 29.6% の ϵ_r の軽減を確認した．前節の結果を踏まえると，OPMH が操作点干渉力を軽減しながら，PAS 先端部挙動の誤差を最小限に抑えていることを確認した．

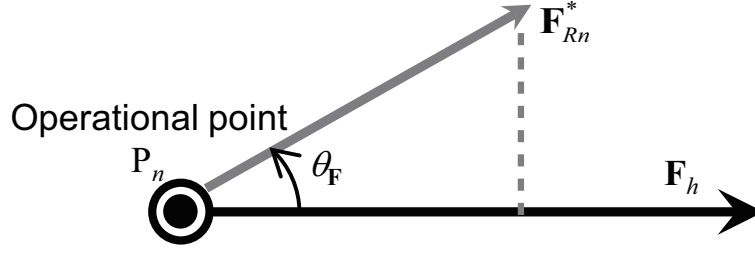


Fig. 5.14: Definition of operational point assist ratio.

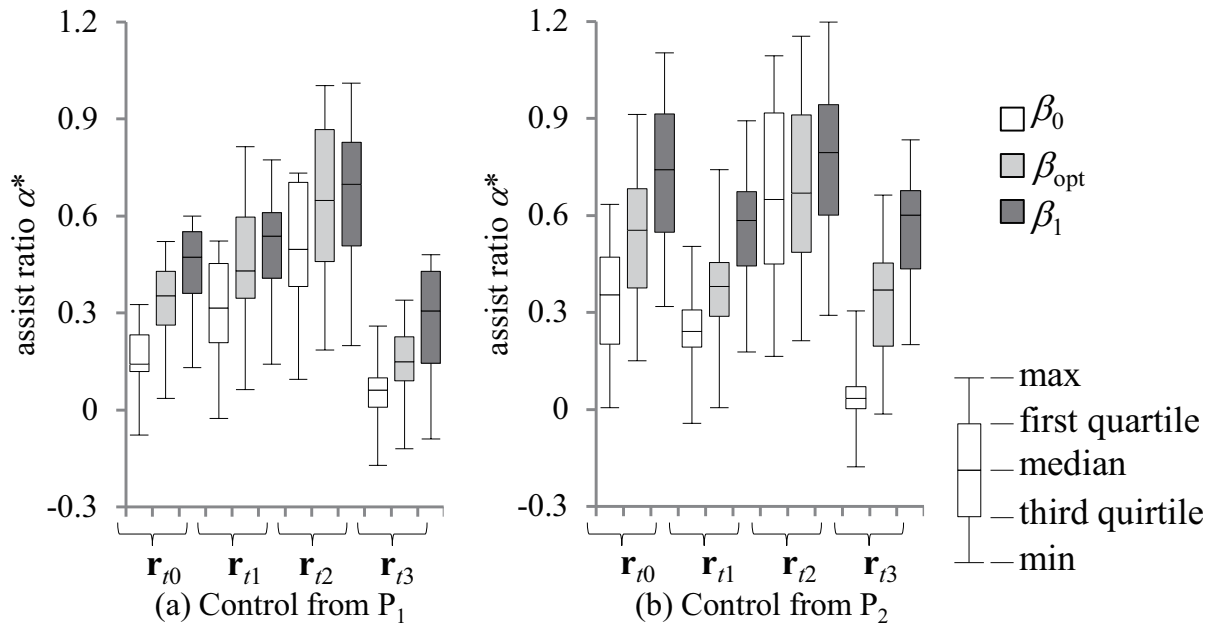


Fig. 5.15: Assist ratio analysis.

5.3.3 操作点アシスト比の補償効果

M-HI では操作点の発揮力が PAS 先端部とは異なるため、操作者に対する PAS のアシスト比が先端部から操作した場合と異なる。M-HI を適用した PAS が所望のアシスト比とどの程度異なるかを、以下に定義する操作点アシスト比によって評価する。操作点アシスト比の定義を Fig. 5.14 に示し、次式のように定義する。

$$\alpha^* = \frac{|\mathbf{F}_{Rn}^*|}{|\mathbf{F}_h|} \cos(\theta_F) \quad (5.18)$$

$$\theta_F = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{F}_{Rn}^* \cdot \mathbf{F}_h}{|\mathbf{F}_{Rn}^*| |\mathbf{F}_h|} \right) \quad (5.19)$$

操作点アシスト比と β の関係を Fig. 5.15 に示すとおり、干渉力を考慮しない場合の操作点アシスト比 α^* の中央値は、元のアシスト比 $\alpha = 1.0$ よりも小さいことが確認できる。しか

し、OPMH を適用することで α^* の中央値が $\alpha = 1.0$ に近づいていることを確認した。各経路を平均して P_1 操作では 14.1%、 P_2 操作では 17.4% の α^* の上昇を確認した。この結果から OPMH によるアシスト比補償効果も期待できることが分かった。

5.4 実機による OPMH 評価実験

Fig. 5.2 に示す PAS 実機を用いて M-HI 及び OPMH を実装し、操作性向上効果を確認する。

1. 基本的な操作として 2 章の実験と同経路を追従し経路追従誤差及び操作点干渉力の大きさをを用いて評価する。
2. β と操作点干渉力の軽減効果の関係を明らかにする。

以下実験結果では、 P_3 から操作した場合を P_3 とし、 β_0 、 β_1 、 β_{opt} はそれぞれ、操作点干渉力を考慮しない場合、操作点干渉力を最大限打ち消した場合、先端部挙動誤差を考慮して β を最適化した場合を示している。また、図中における*、**はテューキーの方法による多重比較の P 値の段階を示しており、それぞれ危険率 5%、1%を示している。

5.4.1 直線経路追従実験

PAS の取り扱いにおける基本的な操作として、2 章の実験と同じ直線経路追従を行う。試行中の平均的な操作点干渉力の大きさと経路追従誤差を用いて評価する。まず、操作点干渉力の軽減効果についての結果を Fig. 5.16 に示す。図より、OPMH 適用時の β_{opt} の $|\mathbf{F}_d|$ の結果が、干渉力非考慮時の β_0 の結果よりも小さくなっていることから、OPMH による操作点干渉力の減少効果を確認した。また実測値がシミュレーションと同傾向であり、 β が大きくなるにつれて干渉力軽減効果も大きくなることを確認した。続いて、PAS 先端部軌跡の目標経路からの追従誤差を ε_r として結果を Fig. 5.17 に示す。Fig. 5.17 より、操作点干渉力を考慮した場合はそうでない場合と比べて ε_r が小さくなっており、OPMH 適用時の β_{opt} の ε_r はテューキーの多重比較より、危険率 5%で干渉力非考慮時の β_0 の結果よりも小さくなり、OPMH による操作性向上効果を確認した。

5.4.2 調整係数 β による操作点干渉力の軽減率の考察

前節において MHI 適用 PAS の実機における OPMH の効果を確認した。ここでは、動作中の β の値に応じて操作点干渉力がどの程度抑えられるかを検証する。ここで動作中の調整係数 β と操作点干渉力の軽減率を解析するため、OPMH 適用時、非適用時の各試行を 0.5s 毎に区切り、その間の平均の β 及び $|\mathbf{F}_d|$ の軽減率をプロットし、Fig. 5.18 に示す。Fig. 5.18 より、 P_1, P_2 それぞれで β と $|\mathbf{F}_d|$ の軽減率に相関が確認できた。実験結果より、 $|\mathbf{F}_d|$ を最も軽減する $\beta = 1$ の場合、 P_1 操作時は約 27%、 P_2 操作時は約 34%の $|\mathbf{F}_d|$ 軽減が期待できる。これらの結果から β を最適化することで OPMH 適用 PAS の 1 試行の間に操作点干渉力 $|\mathbf{F}_d|$ の大小に応じて β を適切に変化させることで、PAS 先端部の挙動誤差を適度に小さく維持しつつ、 $|\mathbf{F}_d|$ を軽減可能であることを確認した。

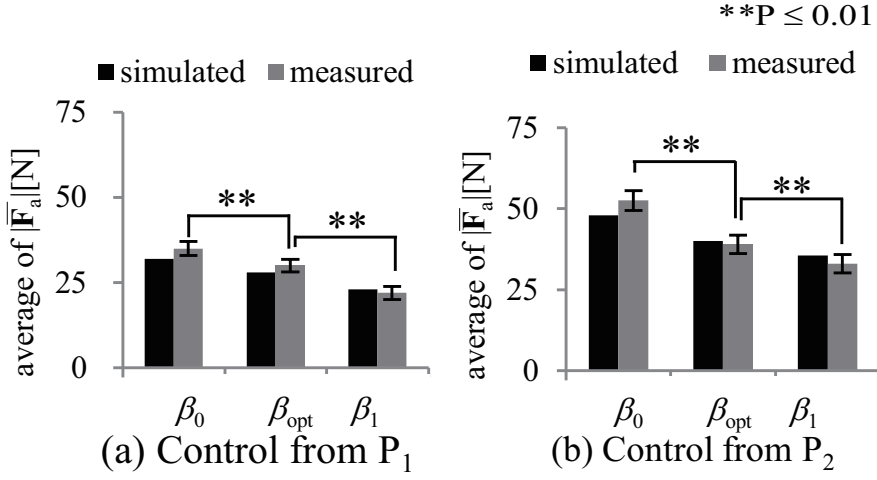


Fig. 5.16: Actual PAS experimental results of interference force $|\bar{F}_a|$.

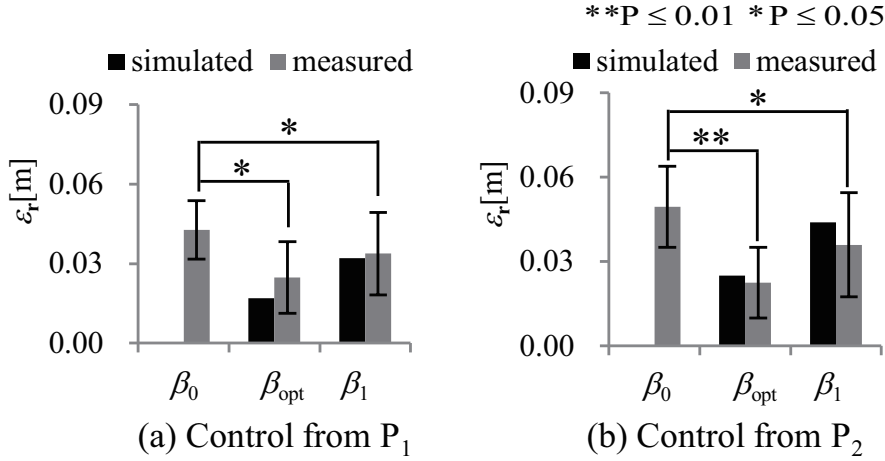


Fig. 5.17: Actual PAS experimental results of end-effector motion error ϵ_r .

5.5 第5章のまとめ

本章では、M-HI を用いた PAS 任意点操作における操作性低下の改善を行い以下に示す 3 つの結論を得た。まず、M-HI 適用 PAS における操作点の運動が操作者に及ぼす操作性低下の問題について考察した。その要因の一つとして操作点の運動が操作者に及ぼす操作点干渉力 $\mathbf{F}_a$ を定義し、操作性計測実験を行った。その結果、PAS 操作中の平均操作点干渉力 $|\bar{F}_a|$ の大きさに伴い PAS 先端部の経路追従誤差が増加し操作性が低下することを実験的に確認した。

次に、操作点干渉力を軽減し操作性を向上させるため、操作点の運動と操作力が協調するように PAS を制御する操作点運動協調化 (OPMH) を提案した。このとき、操作点の運動を補正するほど先端部の挙動に誤差が生じるため、先端部誤差を最小限に抑えつつ、 $|\bar{F}_a|$ の軽減度合いを最適化するように OPMH を設計した。

さらに、OPMH を PAS 実機に実装し操作性評価実験を行った。実験結果から、OPMH

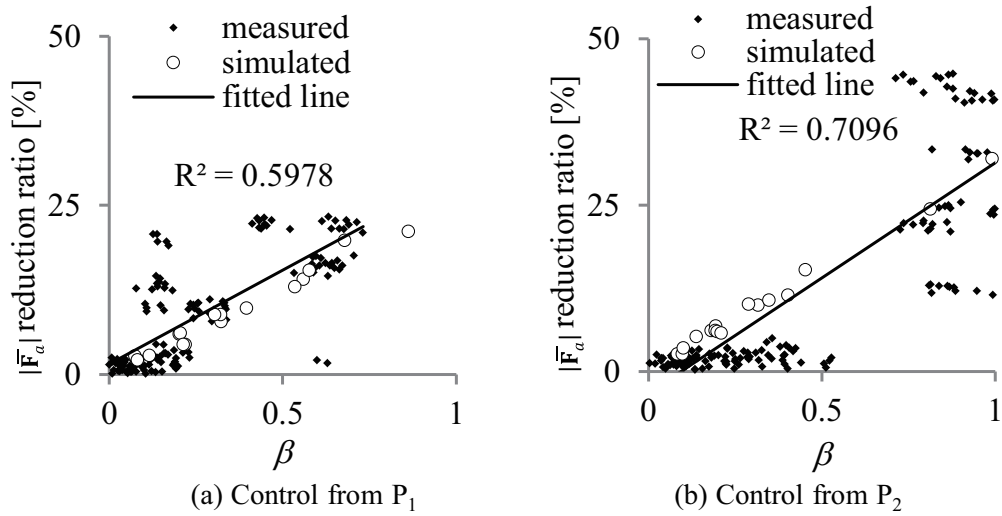


Fig. 5.18: $|F_a|$ reduction ratio analysis by β

を適用した PAS の操作点の干渉力の軽減を確認した．最大で P_1 操作時は約 27%， P_2 操作時は約 34% の $|F_a|$ の軽減効果を期待できる．これより，OPMH によって M-HI 適用 PAS の任意点操作における操作性の低下を軽減可能であることを確認した．また，調整係数 β と干渉力軽減効果について検証し，OPMH における β 最適化の有効性を示した．

本手法の提案に際して定義した PAS 上の任意点における，操作点干渉力の一般化及び定量的評価手法は，M-HI の操作性向上のみならず，HI 固定型 PAS においても，そのインタフェース位置を設計する一つの指標となることが期待できる．

第6章 結論

6.1 まとめ

本論文では、ユーザの力を増幅し且つ作業領域も拡大する人間機械の操作手法として、任意点操作可能な PAS を実現するマルチポータル・ヒューマンインタフェース (M-HI : Multi-portal Human Interface) を提案した。3 自由度マニピュレータを用いた PAS に適用し、各関節位置から PAS 先端部を操作可能にした。本研究での目的として 1 つ目に掲げた「PAS 任意操作点から、PAS 先端部を操作可能にする。」に関して、3 自由度 PAS に対し提案した M-HI を適用し先端部以外の各リンク端から操作可能とした。本実験環境において、1 リンク端からの操作で約 5 倍、2 リンク端の操作で約 2 倍の作業領域の拡大に成功した。

また、M-HI 適用 PAS における操作性低下を確認した。そこで目的として 2 つ目に掲げた「あたかも PAS 先端部から入力し、操作しているような操作感を実現する。」に関してヒトの特性及び、人間機械系の観点から、以下 3 点の操作性改善手法を開発し、その性能を確認した。

PAS 操作における操作者の視線と操作力の関係を明らかにし、視線を考慮した PAS への操作入力の安定化手法 F-FS-VS を提案し、その有効性を確認した。操作者の視線と操作力の関係に関しては、操作力方向を計測し操作者の視線を考慮して解析を行った。PAS 操作入力の解析の結果、操作力方向のばらつきが操作者の視線によってその安定性が変化することを確認した。その性質を余弦関数を用いてモデル化した。ファジィ回帰分析に基づき操作者の視線と操作力方向のばらつきの関係から操作力方向を安定化する手法 F-FS-VS を提案した。2 リンク 2 自由度マニピュレータを用いた PAS における F-FS-VS 適用例を示し、その性能評価を行った。操作力方向の安定化実験において、F-FS-VS を適用した場合とそうでない場合と比較して、操作力方向のばらつきを評価指標とし 41% の操作力安定化を実現した。

実験的に M-HI を適用した 3 リンクマニピュレータにおいて、PAS の第 2 リンク端位置である P_2 点からの操作性が、先端部 P_3 からの操作よりも低下することを実験的に確認した。そこで、我々は新たに操作点 P_2 のインピーダンスに着目し、計算の結果、 P_3 に設定したインピーダンスパラメータから大きく異なることを確認した。さらに、操作点のインピーダンスの修正を提案し、今回は完全に理想的なインピーダンスを P_2 に設定し、操作性がどのように変化するかを確認する実験を行った。結果として、 β 最適化時において 34% の目標点到達時間の短縮を確認した。よって本実験により操作点のインピーダンスを修正し、またその修正量を逐次最適化することで、操作性を向上させる可能性があることを確認した。

M-HI 適用 PAS における操作点の運動が操作者に及ぼす操作性低下の問題について考察した。その要因の一つとして操作点の運動が操作者に及ぼす操作点干渉力 F_a を定義し、

操作性計測実験を行った。その結果、PAS 操作中の平均操作点干渉力 $|\bar{\mathbf{F}}_d|$ の大きさに伴い PAS 先端部の経路追従誤差が増加し操作性が低下することを実験的に確認した。

操作点干渉力を軽減し操作性を向上させるため、操作点の運動と操作力が協調するよう PAS を制御する操作点運動協調化 (OPMH) を提案した。このとき、操作点の運動を補正するほど先端部の挙動に誤差が生じるため、先端部誤差を最小限に抑えつつ、 $|\bar{\mathbf{F}}_d|$ の軽減度合いを最適化するよう OPMH を設計した。

OPMH を PAS 実機に実装し操作性評価実験を行った。実験結果から、OPMH を適用した PAS の操作点の干渉力の軽減を確認した。最大で P_1 操作時は約 27%、 P_2 操作時は約 34% の $|\bar{\mathbf{F}}_d|$ の軽減効果を期待できる。これより、OPMH によって M-HI 適用 PAS の任意点操作における操作性の低下を軽減可能であることを確認した。また、調整係数 β と干渉力軽減効果について検証し、OPMH における β 最適化の有効性を示した。

6.2 今後の展望

今後の課題として以下のような項目が挙げられる。

1. 3つの操作性改善手法の同時適用。
2. PAS 先端部の外部環境接触作業。
3. PAS 動作空間の3次元拡張とより高自由度の PAS への適用

1. に関しては、本論文において提案した3種の M-HI 適用 PAS の操作性改善手法を2種あるいは全て同時に適用した場合、それぞれの効果が独立して正しく発揮可能か検証する必要がある。3章で示した FFSVS は PAS 入力側であり、4章で示したインピーダンス修正及び、5章で示した OPMH は出力側であるため大きな競合は無いと考えられるが、検証の必要がある。また、インピーダンス修正と OPMH は動作中の PAS の動きに変更を加えるため、同時に適用する際にどの程度効果を発揮することができるか検証する必要がある。

2. に関しては、本論文における実験では PAS 先端部を思い通りに操作可能であることを評価するため、無負荷状態での PAS 先端部の動作を用いて操作性を評価した。M-HI を実際の PAS に応用し作業するためには、外部環境との接触を想定し操作性を評価する必要がある。

3. に関しては、現在 M-HI 適用 PAS の動作確認は矢状面上の2次元空間のみで行っている。現場への実用を考えると3次元空間を動作可能な PAS に適用する必要がある。そのためには、PAS を構成するマニピュレータのリンクパラメータ、動力学パラメータが既知であることが必要である。また、操作点の位置及びユーザーの位置あるいは視線が計測もしくは推定可能であることが必要であるが、これらの条件を満たすことで、M-HI 及び提案した操作性改善技術を適用可能である。ただし、安全に考慮し運用するにあたり、次の2点について考える必要がある。1点目は、ユーザと PAS の操作点以外での物理的干渉についての考慮の必要性である。我々の提案手法では、PAS 先端部及び操作点の運動を制御対象としており、その他の部分の運動がユーザと衝突する可能性などについては考慮していない。そのため、M-HI 適用 PAS を3次元空間内で動作させるためには、PAS 全体の運動及びユーザの存在する空間についての検討が必要となる。2点目は、より高自由度 PAS

において 3 次元空間内で動作させるにあたって、操作点の位置・姿勢によっては、ユーザの可動空間内であっても操作インタフェースを把持できない場合が考えられる。この問題は、ユーザの操作可能な姿勢を考慮した作業空間の確認と、その空間上に操作点が動作するよう制御を加えることで解決できるものとする。

参考文献

- [1] A. E. McMichael. “Army Materiel Handling Accident Analysis”. *Proc. of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting 1988*, pp. 889–891, 1988.
- [2] 大道武生, 樋口雄, 大西献. “極限作業ロボットマニピュレータの設計法に関する研究 (その2) —低拘束多本指マスタマニピュレータの設計法—”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 16, No. 7, pp. 942–950, 1998.
- [3] 大道武生, 樋口雄, 大西献. “極限作業ロボットマニピュレータの設計法に関する研究 (その3) —多感覚バイラテラル制御の設計法—”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 5, pp. 658–669, 1999.
- [4] Rod McGregor and Layi Oshinowo. “Flight 6A:Deployment and Checkout of the Space Station Remote Manipulator System(SSRMS)”. *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics and Automation in Space*, June 2001.
- [5] 浅田稔. “岩波講座ロボット学4 ロボットインテリジェンス”, 第4巻. 岩波書店, 2006.
- [6] 新保淳. “科学技術社会における身体性の基軸形成の必要性”. 静岡大学教育学部研究報告. 教科教育学篇, Vol. 37, pp. 127–134, 2006.
- [7] 浅田稔. “ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 28, No. 4, pp. 386–393, 2010.
- [8] サンドラブレイクスリー, マシューブレイクスリー. “脳の中の身体地図-ボディ・マップのおかげで、たいていのことがうまくいくわけ”. インターシフト, 2009.
- [9] L. Cardinali, F. Frassinetti, C. Brozzoli, C. Urquizar, A. C. Roy, and A. Farnè. “tool-use induces morphological updating of the body schema”. *Current Biology*, Vol. 19, No. 12, pp. R478–R479, 2009.
- [10] 谷田公二, 舟橋健司, 近江政雄, 楠見昌司. “バーチャルリアリティ技術を用いた道具に関する身体性評価: 脳内血流変化からの評価”. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 12, No. 1, pp. 3–10, 2007.
- [11] 深沢浩洋, 石垣健二. “スポーツにおける意味生成論—拡大体験の可能性とその契機—”. *体育学研究*, Vol. 55, pp. 97–110, 2010.
- [12] 榎本玲子, 山上精次. “空間認知の身体化仮定とその機序をめぐって”. *専修人間科学論集 心理学偏*, Vol. 1, No. 1, pp. 61–69, 2011.

- [13] H. Lee, T. Takubo, H. Arai, and K. Tanie. “Control of Mobile Manipulators for Power Assist Systems”. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 17, pp. 469–477, 2000.
- [14] 池浦淳. “人間とロボットによる協調作業”. システム/制御/情報, Vol. 44, No. 12, pp. 682–687, 2000.
- [15] T. Miyoshi, A. Niinuma, K. Terashima, and Y. Miyashita. “Development of Industry Oriented Power-Assisted System and Comparison with Conventional Machine”. *Int. J. Automation Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 692–699, 2009.
- [16] H. Kawamoto and Y. Sankai. “Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person”. *Proc. of the 8th Int. Conf. on Computers Helping People with Special Needs*, pp. 196–203, 2002.
- [17] H. Kazerooni. “Human Extenders”. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 281–291, 1993.
- [18] 高本陽一. “レスキューロボット「援竜」”. 建設の施工企画, Vol. 659, pp. 55–56, Jan. 2005.
- [19] 藤田志朗, 須藤大策. “大型レスキューロボットの開発 : T-52 援竜”. 建設の施工企画, Vol. 681, pp. 40–44, Nov. 2006.
- [20] A. Ishii. “Operating System of a Double-Front Work Machine for Simultaneous Operation”. *Proc. of Int. Symp. Automation and Robotics in Construction*, pp. 539–542, 2006.
- [21] 岩田, 亀崎, 菅野. “双腕建機のための操作者支援システムの開発設計”. 建設の施工企画, pp. 60–66, 2008.
- [22] 上野浩史. “国際宇宙ステーションにおけるロボット技術”. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 5, pp. 498–501, 2009.
- [23] C. G. Burgar. “Development of robots for rehabilitation therapy: The Palo Alto VA/Stanfordexperience”. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 37, No. 6, pp. 663–673, 2000.
- [24] Y. Yokokohji. “Bilateral Control of Master-slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling”. *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 849–852, 1992.
- [25] Jacques Marescaux and Francesco Rubino. “the zeus robotic system: experimental and clinical applications”. *Surgical Clinics of North America*, Vol. 83, No. 6, pp. 1305–1315, 2003.
- [26] “intuitive surgical”. <http://www.intuitivesurgical.com/> 2014 年 1 月 20 日に閲覧.
- [27] GP. Haber, MA. White, R. Autorino, P. Escobar F, MD. Kroh, S. Chalikonda, R. Khanna, S. Forest, B. Yang, F. Altunrende, et al. “novel robotic da vinci instruments for laparoscopic single-site surgery”. *Urology*, Vol. 76, No. 6, pp. 1279–1282, 2010.

- [28] 今西勁峰, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史. “マスタースレーブ型ロボット手術のための力覚ナビゲーション手法”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp. 321–328, 2003.
- [29] 小菅一弘. “ロボット制御の理論とシステム・インテグレーション”. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 375–377, 2009.
- [30] F.Shibukawa, T.Tanaka, and S.Kaneko. “Multi-portal Human Interface”. *Proc. of the Int. Conf. IEEE Industrial Electronics*, pp. 4259–4264, 2009.
- [31] T. Sugimoto, H. Fukusho, and T. Koseki. “calculation of the maximum force distribution of an index finger by using liner programming method”. In *Proc. Int. Symp. Appl. Biomech. Contr. Syst. Precis. Eng*, pp. 210–215, 2010.
- [32] H. Kazerooni, J.-L. Racine, H. Lihua, and R. Steger. “On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)”. *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 4353–4360, 2005.
- [33] K. Kanaoka and M. Uemura. “Virtual Power Limiter System which Guarantees Stability of Control Systems”. *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1392–1398, 2005.
- [34] H. Seki, M. Iso, and Y. Hori. “How to Design Force Sensorless Power Assist Robot Considering Environmental Characteristics - Position Control Based or Force Control Based -”. *Proc. of The Int. Conf. IEEE Industrial Electronics*, pp. 2255–2260, 2002.
- [35] T. Ohno. “One-Point Personal Calibration and Its Applications”. *IPSJ SIG Technical Report*, pp. 67–68, 2006.
- [36] 大野建彦. “1 点キャリブレーションによる視線計測とその応用”. 情報処理学会研究報告, Vol. 23, No. 4, pp. 408–410, 2005.
- [37] 大野建彦. “2 点補正による簡易キャリブレーションを実現した視線測定システム”. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, pp. 1136–1149, 2003.
- [38] N. Takesue, H. Murayama, K. Fujiwara, K. Matsumoto, H. Konosu, and H. Fujimoto. “Kinesthetic Assistance for Improving Task Performance -The Case of Window Installation Assist -The Case of Window Installation Assist-”. *Int. J. Automation Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 1688–1703, 2009.
- [39] 武居直行, 村山英之, 藤本英雄. “操作力方向に依存して可変する手ぶれ補正アシスト”. 第 26 回 日本ロボット学会学術講演会講演予稿集 DVD-ROM, pp. 3C3–04, 2008.
- [40] 鶴原亜紀, 金子寛彦. “姿勢制御と知覚に対する広視野刺激の傾きの影響”. *VISION*, Vol. 18, No. 2, pp. 81–90, 2006.
- [41] 山口大志, 金子寛彦. “ヘッドポインティング課題における頭部・眼球の物理的位置の影響”. 日本光学誌, Vol. 5, No. 36, pp. 280–288, 2007.

- [42] A. Y. Chow and C. R. Dickerson. “Shoulder Strength of Females While Sitting and Standing as a Function of Hand Location and Force Direction”. *Applied Ergonomics*, Vol. 40, pp. 303–308, 2009.
- [43] K. Kiguchi. “An Exoskeleton for Human Shoulder Rotation Motion Assist”. *Proc. of Int. Conf. Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, pp. 1092–1099, 2004.
- [44] T. Flash and N. Horgan. “The Coordination of Arm Movements: an Experimentally Confirmed Mathematical Model”. *Journal of Neuroscience*, Vol. 5, pp. 1688–1703, 1985.
- [45] M. Siegel and S. Nagata. “Just Enough Reality: Comfortable 3-D Viewing via Microstereopsis”. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 387–396, 2000.
- [46] A. Watanabe, T. Mori, S. Nagata, and K. Hiwatashi. “Spatial Sine - Wave Responses of The Human Visual System”. *Vision Research*, Vol. 8, pp. 1245–1263, 1968.
- [47] H. Hirakoso, T. Nagumo, , and S. Hasegawa. “A Study of Depth Spatial Frequency Response : Asymmetric property of LSF in Depth Caused by Dominant Eye”. *ITEJ Technical Report*, Vol. 19, No. 6, pp. 13–18, 1995.
- [48] S. Kaneko and H. Tanaka. “Hierarchical 3-D Object Models based on Human Depth Perception”. *ITEJ Technical Report*, Vol. 20, No. 50, pp. 19–24, 1996.
- [49] C. Winkelholz, M. Kleiber, and C. M. Shilck. “Modeling the Cognitive Representation of Basic Three-Dimensional Spatial Relations in Visual Short-term Memory”. *Proc. of IEEE Int. Conf. System, Man and Cybernetics*, pp. 1838–1845, 2010.
- [50] H. Toyohiko and S. Shinya. “Mechanism and Cause of Depth Perception (Depth Perception and Three-Dimensional Display)”. *The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan*, Vol. 43, No. 8, pp. 755–762, 1989.
- [51] 畑田豊彦, 斎田真也. “奥行き知覚の要因とメカニズム”. *テレビジョン学会誌*, Vol. 43, No. 8, pp. 755–762, 1989.
- [52] H. Tanaka, S. Uejima, and K. Asai. “Linear Regression Analysis with Fuzzy Model”. *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics*, Vol. 12, No. 6, pp. 903–907, 1982.
- [53] C. M. Lim and T. Hiyama. “Application of Fuzzy Logic Control to a Manipulator”. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 5, pp. 688–691, 1991.
- [54] K. Tanaka. “Advanced Fuzzy Control of a Trailer Type Mobile Robot-stability Analysis and Model-Based Fuzzy Control”. *Proc. of 6th Int. Conf. Tools with Artificial intelligence*, pp. 205–221, 1994.
- [55] 水本雅治. “ファジィ制御向きのファジィ推論法”. *計測と制御*, Vol. 28, No. 11, pp. 959–963, 1989.

- [56] 田中一男. “アドバンストファジィモデルに基づく制御ーファジィモデルに基づく制御”. システム制御情報学会誌, Vol. 48, No. 1, pp. 4–9, 2004.
- [57] 竹中悠, 小濱剛, 吉田久, 戸田尚宏. “統計モデルによるマイクロサッカード前後のドリフト眼球運動に及ぼす視覚的注意の影響解析”. 社団法人映像メディア学会技術報告, Vol. 33, No. 17, pp. 61–64, 2009.
- [58] T. Tsuji, Y. Tanaka, , and M. Kaneko. “Biomimetic Trajectory Generation Based on Human Movements with a Nonholonomic Constraint”. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 32, No. 6, pp. 773–779, 2002.
- [59] 田中良幸, 辻敏夫, 金子真. “人間の上肢運動を模擬したロボットの軌道生成法”. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 699–705, 2000.
- [60] 樋口正浩. “視覚系と運動系の3次元位置の対応付け”. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 86, pp. 33–39, 1987.
- [61] RK.Luneburg. “the metric of binocular visual space”. *JOSA*, Vol. 40, No. 10, pp. 627–640, 1950.
- [62] C. Prablanc, JF. Echallier, E. Komilis, and M. Jeannerod. “optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target”. *Biological cybernetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 113–124, 1979.
- [63] 重信石神. “視空間認知障害とリハビリテーション”. リハビリテーション医学：日本リハビリテーション医学会誌, Vol. 28, No. 9, pp. 675–681, sep 1991.
- [64] 西應浩司, 材野博司, 松原斎樹, 藏澄美仁, 森田孝夫. “空間認識のストラテジーから見た男女差：街路空間の連続的認識における個人差 その2”. 日本建築学会計画系論文集, No. 547, pp. 169–176, sep 2001.
- [65] 前田太郎, 舘暉. “視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合”. 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 201–210, 1993.
- [66] “Interference Force Reduction for Assist Systems Controlled at Arbitrary Operational Point”. *Proc. of IARIA CENTRIC2012 : The Fifth International Conference on Advances in Human-oriented and Personalized Mechanisms, Technologies, and Services*, pp. 133–138, 2012.
- [67] 川崎晴久, 清水年美. “ロボット数式処理”, 第5章, pp. 38–50. 昭晃堂, 2000.
- [68] 大谷, 柿崎, 中川. “多関節マニピュレータの動力学パラメータ同定に関する実験的検討”. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 1083–1092, 1993.
- [69] K. Otani, T. Kakizawa, and M. Nakagawa. “Dynamic Parameter Identification of an Industrial Robot and Its Application to Trajectory Controls”. *Proc. of the 1992 IEE/RSJ Interantional Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 990–997, July 1992.

- [70] H. Kazerooni. “Human- Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals”. *IEEE Trans. Systems, Man , and cybernetics*, Vol. 20, No. 2, pp. 450–463, 1990.
- [71] T. Koyama, M. Q. Feng, and T. Tanaka. “Development and Motion Control of a Wearable Human Assisting Robot for Nursing Use”. *Human Friendly Mechatronics(ICMA 2000)*, pp. 105–110, 2001.
- [72] N. Jarrassé and G. Morel. “ Connecting a Human Limb to an Exoskelton”. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, Vol. 28, No. 3, pp. 697–709, JUNE 2012.
- [73] 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一. “ファジィ回帰分析による視空間認識の分解能を考慮したパワーアシストシステムの操作力安定化”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 4, pp. 420–427, 2012.
- [74] 辻敏夫, 赤松寛優, 原田研介, 金子真. “ニューラルネットによるロボットインピーダンスのオンライン学習”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 2, pp. 234–241, 1999.
- [75] 井上康之, 舘暉, 荒井裕彦. “マスタースレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一方方法”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 10, No. 4, pp. 490–500, 1992.
- [76] 山根克, 中村仁彦. “ヒューマンフィギュアの全身運動生成のための協応構造化インタフェース”. *日本ロボット学会誌*, Vol. 20, No. 3, pp. 335–343, 2002.

謝辞

本論文は筆者が北海道大学大学院 情報科学研究科 システム情報科学専攻 博士課程において行った研究をまとめたものである。論文執筆に際して、大変大くの方々からのご指導、ご協力を頂きましたことをこの場を借りて深く感謝致します。本論文の執筆にあたり、ご指導していただいた北海道大学 大学院情報科学研究科 システム制御情報学研究室 田中孝之准教授、金子俊一教授に心から感謝いたします。

田中先生におきましては、指導教員として技術的な指導や、論文執筆のための指導だけでなく、研究への取り組み方や技術者・研究者としての哲学を示していただきました。また社会に積極的に関わり、人々の本当の役に立つ技術を追い求める姿勢は、これからの筆者自身の技術・研究者人生の理想像として心に刻んでいこうと思っています。心より感謝致します。

金子先生におきましては、普段のゼミでは重要な点をご指摘いただき、常に研究の本質対して問いかけることを意識付けることができました。また、学生生活においても、日々学生の様子を気にかけていただき、また論文執筆から英語学習や資料の集め方など研究生生活にまつわる様々な事柄に対して、いくつものご助言をいただけたこと、心より感謝致します。

小野里雅彦教授におきましては、副査として研究室での議論とは異なる視点から、より広い視野での様々な指摘・意見をいただきました。研究をしている内にどうしても狭くなりがちな視野・自分の研究への客観的な捉え方・よりの確な研究の伝え方に関する助言には心より感謝しています。

松下昭彦助教におきましては、ゼミでの鋭いご指摘をいただくとともに、講義でも筆者にティーチングアシスタントとしてお手伝いさせていただき、貴重な体験をさせていただくことができました。

研究員の奈良博之博士におきましては、日々、研究生活だけに留まらず様々な知識・経験・技術を教えて頂きました。また、研究員の松尾祥和博士におきましては、博士取得直後の研究者像をこれ以上無いほど近くで見せて頂けたこととても感謝しています。研究員のお二方には、技術的・精神的に支えて頂いたとともに、垣間見える様々な才能に憧れさせていただいております。心より感謝致します。

秘書の吉川様、橋本様におきましては、様々な手続きの至る所でお世話になりました。学会参加を始めとして、様々な手続きのおかげで今日まで研究生活に専念し、多くの経験を得ることができました。また、いつも明るく、お忙しいときにも優しく気遣いの言葉をかけていただけたこと本当に感謝しています。

同じ境遇、違う境遇様々でありながら意見交換しながらお互いに励ましあった同研究室の先輩方、同輩方、後輩方にも心から感謝いたします。

特に同期の今村由芽子学術振興会研究員には、学部一年の同学科英語講義から始まり、

9年間もの長い付き合いとなりました。研究でも、私生活でも様々な相談に乗ってくれたこと、常に支え合い、励まし合い、邪魔し合えたこと感謝しています。あと発表資料デザインが上手くて、とても参考にさせていただいてました。

同じく同期の日下聖学術振興会研究員には、学部時代の課外活動で、一緒にものづくりをしたときからの付き合いで、高専出身の、優秀な、技術にまっすぐな、理学一工学の興味を同じくする、筆者より遥かに深い知識の持ち主として、

二人とも筆者には獲得できなかった学術振興会研究員の座を勝ち取り、優秀な成果を残し、嫉妬しつつも日々励まされてきました。筆者の人生の中で間違いなく最高に長く・深く没頭した研究活動とそれを取り巻く研究生活を、この二人とともに続けてこれたことを誇りに、そして大切に思っています。心から感謝致します。

研究やそれ以外のこのメンバーでやってきた沢山の思い出がこれからまた頑張っていく励みになります。

また、室蘭工業大学大学院 工学研究科もの創造系領域 高氏秀則准教授におきましては、所属が変わってからもミーティングや合宿等さまざまなところで、鋭い指摘、助言をいただき、心より感謝しております。

インターンシップにて短期間ながら共に研究に取り組んだ旭川高専専攻科の橋本光太郎氏には、本研究の基礎となる計測実験や、個人差を考慮する上での貴重なデータの取得、議論を行うことができました。心から感謝致します。

Center for Sensory-Motor Interaction Aalborg University の Natalie Mrachacz-Kersting 先生、Uwe Kersting 先生には、デンマークへ留学の際に大変にお世話になりました。ヒューマン・アシストの研究をする上で、その基礎となる人体特性の専門家との研究、ディスカッション、レクチャーを受ける貴重な経験を頂きました。また、留学の際お世話になった SMI 研究員および、デンマーク中の調査協力していただいた医療・福祉施設の皆様に心より御礼申し上げます。

両親には、長い学生生活の間大変苦勞をかけてしまいましたが、生活面・精神面で支えとなっただき心より感謝致します。弟の哲也・卓也には、それぞれの道での活躍を耳にし、何度も励まされました。最後に、長い研究生活の間、将来がどうなるかもわからない不安や、上手くいかずに悩んでいるときも、絶えず支え励まし続けてくれた婚約者の竹中春奈に、心より感謝致します。

研究業績目録

1. 論文

I 査読付学会誌等

- (1) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “ファジィ回帰分析による視空間認識の分解能を考慮したパワーアシストシステムの操作力安定化”, 日本ロボット学会誌, vol.30, no.4, pp.420-427, Apr. 2012
- (2) 渋川文哉, 田中孝之: “任意点で操作可能な多リンクパワーアシストシステムの操作点運動協調化制御”, 日本ロボット学会誌, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.9, pp.936-943, Nov. 2013

II 査読付国際会議プロシーディング

- (1) F.Shibukawa, T.Tanaka and S.Kaneko: “An Impedance Modification on Operational Point for Multi-link Power Assist System Controllable from Arbitrary Point by Using Multi-portal Human Interface”, Proc. Of IEEE International Workshop on Human-Machine Systems, Cyborgs and Enhancing Devices, pp.9-10, Oct. 2013, Manchester, UK
- (2) F.Shibukawa, T.Tanaka and S.Kaneko: “Multi-portal Human Interface for Multi-link Power Assist System”, Proc. Of IEEE International Workshop on Human-Machine Systems, Cyborgs and Enhancing Devices PhD Track, pp.37-40, Oct. 2013, Manchester, UK
- (3) F.Shibukawa, T.Tanaka and S.Kaneko: “Interference Force Reduction for Assist Systems Controlled at Arbitrary Operational Point”, Proc. of IARIA CENTRIC2012: The Fifth International Conference on Advances in Human-oriented and Personalized Mechanisms, Technologies, and Services, pp.133-138, Nov. 2012, Lisbon, Portugal
- (4) F.Shibukawa, T.Tanaka and S.Kaneko: “Operation Stability of Power Assist System with Multi-portal Human Interface”, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2010, pp.179-184, Dec. 2010, Tianjin, China
- (5) F.Shibukawa, T.Tanaka and S.Kaneko: “Multi-portal Human Interface”, Proc. of IEEE IECON2009, pp.4259-4264, Nov. 2009, Porto, Portugal

III 査読付国内講演会プロシーディング

- (1) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一, 梶原秀一, 吉藤拓土: “多リンクパワーアシストシステムの任意操作点からの直感的操作手法”, 第16回ロボティクスシンポジウム, pp.219-224, Mar. 2011, 指宿

- (2) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “パワーアシストシステムの任意点操作におけるインピーダンス修正量の最適化”, 第19回ロボティクスシンポジウム, Mar. 2014, 神戸 (採択決定)

2. 講演論文

- (1) 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点インピーダンス修正による操作性向上” 第6回 日本ロボット学会 北海道ロボット技術研究専門委員会学術講演会, 2014. Mar, 札幌 (発表予定)
- (2) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “任意点操作可能な多リンクパワーアシストシステムの操作点インピーダンス修正のための一手法”, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013 CD-ROM 2h2-01, Sep. 2013, 東京
- (3) F.Shibukawa, T.Tanaka, S.Kaneko: “Maneuverability Evaluation Considering Operational Point Impedance of Multi-link Power Assist System”, 北海道大学情報系若手連携シンポジウム, Mar. 2013, Sapporo
- (4) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “多リンクパワーアシストシステムの操作点インピーダンス調整”, 第30回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2012 CD-ROM 2H1-6, Sep. 2012, 札幌
- (5) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “任意点操作可能な多リンクパワーアシストシステムのための操作点作用力を考慮した操作性向上” 第4回日本ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会学術講演会 pp.94-97, Mar. 2012, 札幌
- (6) F.Shibukawa, T.Tanaka, S.Kaneko: “Operation Point Harmonization Control to Cancel Interference Force for Power Assist Systems with Multi-portal Human Interface”, Proc. of GCOE-NGIT 2012, pp.207-208, Jan. 2012, Sapporo, Japan
- (7) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “多リンクパワーアシストシステムにおける任意点操作手法 -操作力の干渉を軽減する操作点協調化制御-” 第54回自動制御連合講演会, CD-ROM 2J101, Nov. 2011, 豊橋
- (8) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “多リンクパワーアシストシステムの任意点操作における操作点運動協調制御”, 若手研究者支援のための産学共同 GCOE 国内シンポジウム ダイジェスト集, pp.97-98, Oct., 2011, 札幌
- (9) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “多リンクパワーアシストシステムの任意操作点における操作干渉力を考慮した直感的制御手法” 第16回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集 CD-ROM G4, Sep. 2011, 高知工科大学
- (10) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一, 梶原秀一, 吉藤拓土: “パワーアシストシステムの多点操作入力における操作点での干渉力軽減”, 第43回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp.57-58, Mar. 2011, 札幌
- (11) 日下聖, 中野基輝, 渋川文哉, 近藤香織, 小林範行, 佐野竜一, 田中孝之, 金子俊一: “福祉活動を啓蒙するロボットコンテストの一手法”, ROBOMECH2008, 2A1-I21, 2008, 長野

-
- (12) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一 “マルチポータルヒューマンインタフェース-操作安定性を考慮した操作力ファジィ推定-”, CDROM(1A2-G13), ROBOMECH2010(北海道), Jun. 2010, 旭川
 - (13) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “ マルチポータルヒューマンインタフェース ”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2009AC3C3-07, Sep. 2009, 横浜
 - (14) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “ パワーアシストシステムにおけるマルチ-ポータルヒューマンインタフェースの提案 ”, 第 1 回若手研究者による知の創出のための異分野共同セミナー予稿集, p.54, Mar. 2009, 札幌
 - (15) 渋川文哉, 田中孝之, 金子俊一: “ パワーアシストシステムの有効作業領域拡張のための基礎研究 ”, 2008 年度北大教育 GP 卒論ポスター発表会 , Mar. 2009, 札幌