OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	官能性能設計を取り込んだ建設機械の機械・制御系の設計手法に関する研究
Author(s)	大林, 薫
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105441
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

官能性能設計を取り込んだ建設機械の機械・制御系の設計手法に関する研究

大　林　薫

2026 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

1　序論 5

1.1　本研究の背景 5

1.2　研究課題の明確化 7

1.3　本研究の目的 8

1.4　論文の構成 8

2　関連研究 10

2.1　官能性能設計のための官能要因の抽出 10

2.2　遠隔操作の操作性向上 11

2.3　半自動制御へのオペレータの経験則の反映 13

3　油圧ショベルの操作性に影響する官能要因の抽出 16

3.1　はじめに 16

3.2　実験概要 16

3.3　実験 1 単軸操作を対象とした官能要因の抽出実験 18

3.3.1　実験条件 18

3.3.2　実験方法 21

3.3.2.1　参加者および実験装置 21

3.3.2.2　実験フロー 22

3.3.3　上下方向操作に関する実験結果 23

3.3.3.1　上下方向操作（基礎実験）の実験結果 23

3.3.3.2　ブーム単独操作（油圧ショベル実験）の実験結果 29

3.3.4　左右操作に関する実験結果 33

3.3.4.1　左右操作（基礎実験）の実験結果 33

3.3.4.2　旋回操作（油圧ショベル実験）の実験結果 40

3.3.5　実験 1 の考察 46

3.3.5.1　上下方向操作を対象とした実験結果の考察 46

3.3.5.2　左右方向操作を対象とした実験結果の考察 49

3.3.5.3　総合考察 51

3.4　実験 2 複合操作を対象とした官能要因の抽出実験 53

3.4.1　実験 2-1 複合操作におけるむだ時間の影響評価 53

3.4.1.1　実験条件 53
3.4.1.2　実験装置 54
3.4.1.3　実験方法 55
3.4.1.4　実験結果 55
3.4.1.5　実験 2-1 の考察 58
3.4.2　実験 2-2 複合操作における視覚情報の影響評価 59
3.4.2.1　実験条件 59
3.4.2.2　実験装置 59
3.4.2.3　実験方法 59
3.4.2.4　実験結果 60
3.4.2.5　実験 2-2 の考察 64
3.5　本章のまとめ 65
4　通信遅延の影響を抑止する遠隔操作手法の提案 67
4.1　はじめに 67
4.2　制御手法の提案 67
4.2.1　提案手法 1：仮想映像の提示 68
4.2.2　提案手法 2：操作入力の補正 68
4.2.3　提案手法 3：仮想映像の補正 69
4.3　提案手法の検証 70
4.3.1　検証の目的 70
4.3.2　検証方法 70
4.3.3　検証環境 72
4.3.4　検証結果 77
4.3.4.1　提案手法 1 の検証結果 77
4.3.4.2　提案手法 2 の検証結果 79
4.3.4.3　提案手法 3 の検証結果 80
4.4　本章のまとめ 82
5　オペレータの経験則を反映した半自動制御手法の提案 84
5.1　はじめに 84
5.2　制御手法の提案 84
5.2.1　実験装置 85

5.2.2　バケットの抽出と刃先位置の推定 87
5.2.3　オペレータモデルの作成 89
5.3　提案手法の検証 92
5.3.1　検証の目的 93
5.3.2　検証方法 93
5.3.3　検証結果 94
5.3.3.1　検証 1：経験則の反映に関する検証結果 94
5.3.3.2　検証 2：マニュアル操作の模擬に関する検証結果 96
5.4　本章のまとめ 102
6　総括 104
参考文献 106
研究業績 112
謝辞 113

1　序論

1.1　本研究の背景

製造業においては，製品の高機能化，複雑化が加速しており，それに伴って増大する開発工数の効率化が求められている．この課題への対応策として，モデルベース開発（Model-Based Development：以下 MBD）の活用が進んでいる[1,2]．MBD とは，開発の上流工程でシミュレーションによる事前検討を行うことで，下流工程での手戻りを防止し，開発の効率化，ひいては品質の向上を実現する開発手法である[3]．自動車業界をはじめ多くの製造業で MBD の活用が進んでおり，筆者は国内建設機械メーカーにおいて MBD の活用を推進してきた．建設機械においても，自動化や遠隔化など製品に対する要求が高度化しており，MBD の適用による開発の効率化や品質の向上が期待されている．1DCAE（1-Dimensional Computer Aided Engineering）を用いたトランスミッション制御の検討をはじめ，さまざまな性能検討に MBD を適用してきた[4,5]．しかし，官能評価に関わる性能設計においては，依然として実機を用いた試験員による評価が主流である．官能評価とは，人間の五感（視覚，聴覚，嗅覚，味覚，触覚）に基づき，対象物の特性を評価する手法を指す[6]．例えば，自動車業界では官能評価の一つとして，快適性に関連する乗り心地の評価が行われている[7]．自動車の発進時や走行時に生じる振動を，試験員が五感に基づいて感覚的に評価することで，乗り心地の良否が判定される．建設機械においても，操作入力に対する動き出しの滑らかさといった操作性に関する評価[8]や，作業中の操縦席の振動[9]や音[10]などの快適性に関する官能評価が行われている．これらの官能評価に関わる官能性能を設計するためには，官能評価に影響する特徴量（以下，官能要因）を明らかにし，定量的な評価指標に落とし込む必要がある．しかしながら，官能評価は人間の主観的な評価であるため，官能要因を明確化することが難しく，試験員による評価に依存しているのが現状である．したがって，官能性能設計においては，官能要因を抽出し，それに基づいた性能設計手法を確立することが課題となっている．

車両系の機械の官能評価には，前述のとおり操作の容易さや乗り心地など多種多様な評価項目が含まれるが，その中でも，建設機械のような操作系の機械においては操作の容易さ，つまり操作性は重要な品質の一つである．建設機械の操作は，制御工学的な視点でみると，オペレータを制御器，建設機械を制御対象と捉えることができ

る．通常の操作において，制御器であるオペレータは，五感を通じて制御対象および周辺環境のさまざまな情報を受け取り，操作意図に基づいて操作量を決定している（図 1.1）．例えば，作業機の位置を調整する際には，作業機の位置情報だけでなく，レバー操作に対する応答性などを考慮してレバー操作量が決定される．さらに，操作性の評価においては，意図どおりの作業ができたかという作業精度だけでなく，操作をスムーズに行えたかという作業負荷の観点でも評価を行っている．そのため，制御対象のむだ時間が大きい場合に，むだ時間への対応が困難となり，頻回に修正操作が行われると，作業精度を維持できたとしても，作業負荷が高いことにより，操作性の評価が低下する．したがって，操作性の良い建設機械を設計するためには，操作に影響する官能要因を明らかにし，それらを適切にコントロールする制御手法を構築することが求められる．

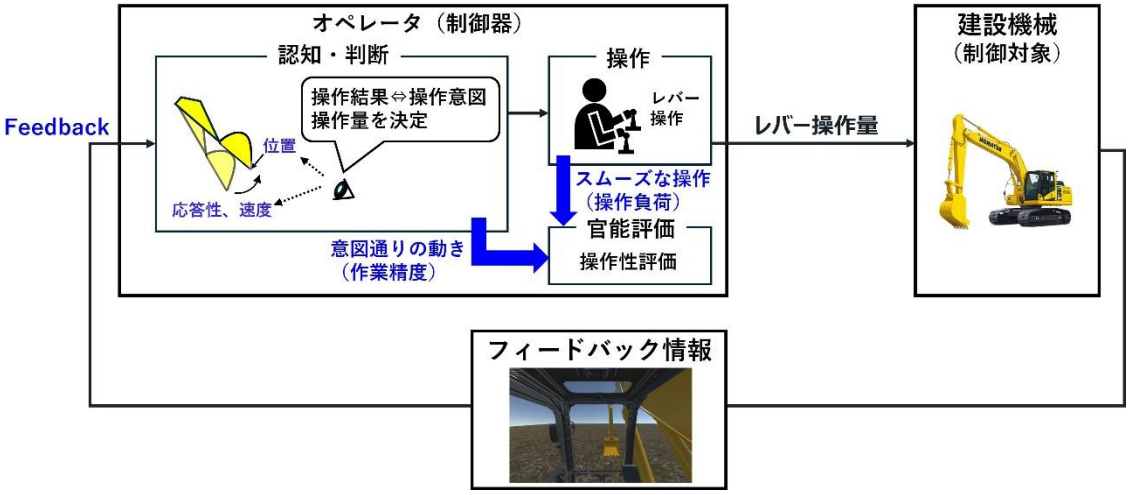


図 1.1 オペレータによる建設機械の操作

しかし，オペレータの操作に影響する官能要因については，いまだ十分な知見が蓄積されていないのが現状である．ホイールローダを対象とした調査実験では，最大牽引力の設定値がオペレータの操作に影響することが明らかになっており[11]，官能要因に関する知見は蓄積されつつあるが，官能要因として想定されるパラメータは制御対象の車体特性だけでなく，外部環境の変化など多岐にわたるため，全体像の解明には至っていない．そこで筆者は，代表的な建設機械の一つである油圧ショベルの操作性に着目し，オペレータの操作における官能要因を明らかにすることで，官能性能設計手法の確立，ひいては官能性能設計への MBD の適用による開発の効率化および品質の向上に貢献することを目指すこととした．

1.2　研究課題の明確化

1.1 節において，官能要因を明らかにすることの意義について述べた．しかし，官能要因に関する知見に基づいて具体的な制御例を述べなければ，その知見がどのように社会で活用されるのか，すなわち社会的な価値を示したとは言えない．そこで，本研究では，建設機械の操作性に影響する官能要因を明らかにし，その知見に基づいて具体的な制御例を提案することによって，官能性能設計手法のフレームワークを示す．具体的には，官能要因に関する知見に基づいて，遠隔操作手法および半自動制御手法を提案する．以下に，遠隔操作と半自動制御の二つのカテゴリに分けて，官能要因に関する知見との関係性について整理する．

一つ目のカテゴリである建設機械の遠隔操作は，少人数で複数現場の作業を同時に行えることから，建設業における労働者不足への対応策として期待されている[12]．また，危険な現場や月面などの立ち入ることが困難な環境であっても，現場に立ち入ることなく安全に作業を行うことが可能になる[13,14]．しかし，一般的な遠隔操作は通信を介して遠隔地の機械を操縦するため，通信遅延の影響により操作性が悪化し，作業効率が低下することが課題となっている[15]．また，作業環境の情報が不足することによる作業効率の低下も課題となっており，オペレータに力覚をフィードバックすることで作業効率を改善する手法が提案されている[16]．したがって，建設機械の遠隔操作においても，操作性を向上するためには，操作に影響する官能要因を明確化する必要があり，官能要因に関する知見を蓄積することは遠隔操作の操作性改善に寄与する．

二つ目のカテゴリである建設機械の半自動制御は，遠隔操作と同様に，労働者不足への対応策として近年開発が加速しており，一部の操作を自動化することで，経験の浅いオペレータでも熟練オペレータ相当の作業を実現する ICT 建機が製品化されている[17]．しかし，これらの半自動制御システムは，作業精度の評価に主眼を置いており，手動操作を担うオペレータの操作性は十分に評価されていない．作業精度に問題がなかったとしても，自動制御に対してオペレータに違和感が生じる場合は，操作負荷が高まり操作性が悪化する可能性がある．この課題に対して，半自動制御における自動制御部分が，オペレータの操作を模擬することができれば，手動で操作するオペレータの違和感を低減する効果が期待できる．このようなオペレータの操作を模擬するという課題に対しても，官能要因に関する知見は有効である．官能要因を明らかに

するためには，それらの因子を基に，オペレータがどのような認知，判断を介して操作を行ったのかを明らかにする必要があり，そのようなオペレータの操作に関する知見は，オペレータの操作を模擬するという技術課題に適用可能だからである．

これらの観点から，本研究では，官能要因に関する知見に基づいて遠隔操作手法および半自動制御手法を提案し，操作性に関する官能性能設計手法を具体的に示すことで，官能性能設計を取り込んだ建設機械の設計手法の確立に貢献することを目指す．

1.3　本研究の目的

本研究では，建設機械の操作性に影響する官能要因を抽出することと，その知見に基づいて官能性能設計のフレームワークを示すことを目的とする．建設機械には用途に応じてさまざまな種類の機械が存在するが，その中でも主要な建設機械の一つである油圧ショベルを研究対象とした．油圧ショベルの作業機は，ブーム，アーム，バケットから構成されており，これらの動作が操作性に大きく影響する（図 1.2）．そこで，本研究では，油圧ショベルの操作性に影響する官能要因を抽出するための実験を行い，その知見に基づいて，遠隔操作および半自動制御を対象とした具体的な官能性能設計手法を示す．

以上を整理すると，本研究の目的は以下の二点に要約できる．

1）　油圧ショベルの操作性に影響する官能要因の抽出

2）　官能要因に関する知見に基づく油圧ショベルの制御手法の提案



図 1.2 油圧ショベルの構成部品

1.4　論文の構成

本論文の構成を，以下に示す．

第 1 章では，研究の背景，目的および論文の構成について述べる．第 2 章では，第 3 章から第 5 章に示す研究に関連する先行研究を紹介する．

第 3 章から第 5 章の研究の関連性を，図 1.3 に示す．第 3 章では，油圧ショベルの操作性に影響する官能要因の抽出に関する研究の結果を示す．

第 4 章と第 5 章では，第 3 章で明らかとなった官能要因に関する知見に基づいて，遠隔操作手法および半自動制御手法を提案する．第 3 章の研究の結果，制御対象のむだ時間と視覚情報が，操作性に影響する官能要因であることが明らかとなった．この知見に基づき，第 4 章では，遠隔操作においてむだ時間に相当する通信遅延の影響を抑止することで，操作性を改善する遠隔操作手法を提案し，シミュレーションによる検証結果を示す．

第 5 章では，オペレータの経験則を反映したすきとり操作の半自動制御手法を提案し，シミュレーションによる検証結果を示す．第 3 章の研究により，ブームとアームを同時に操作するすきとり操作において，オペレータは視認したバケットの面積情報を基にブームの操作を行っていることを明らかにした．この知見を踏まえ，オペレータの経験則に基づいてブームの操作を自動化することで，オペレータの自動制御に対する違和感を低減し，操作性を向上するすきとり操作の半自動制御手法を提案する．

最後に，第 6 章では，本論文の研究結果を総括し，今後の展望を述べる．



図 1.3 研究の構成

2　関連研究

本章では，関連研究を概観し，本研究の位置づけを明確にする．本研究においては，油圧ショベルの操作性に影響する官能要因を抽出し，その知見に基づいて遠隔操作手法および半自動制御手法を提案することで，官能性能設計のフレームワークを示すことを目的とする．以上の目的を踏まえ，まず官能要因の明確化に関する関連研究を整理する．次に，遠隔操作および半自動制御に関する関連研究を，官能性能設計の観点から整理し，本研究の意義を明確にする．

2.1　官能性能設計のための官能要因の抽出

官能性能を設計するためには，官能評価に影響する官能要因を明確化することが不可欠である．官能要因を適切に制御することで，所望の官能性能を実現できるためである．さらに，官能要因に基づいて設計指標を定義できれば，シミュレーションによる机上検討が可能となり，MBD の適用による開発の効率化や品質の向上が期待できる．齋藤らは，シミュレータを用いてホイールローダの変速ショックの評価を試みたが，シミュレータでは実車試験と同等の評価結果が得られず，その要因として，変速ショックに影響する官能要因がシミュレータに十分反映されていなかったことを指摘している[18]．このことは，官能性能を設計するためには，官能要因の明確化が不可欠であることを示唆している．

自動車の開発において，ドライバビリティ評価に影響する官能要因と評価員による官能評価結果との関係性を機械学習によりモデル化し，そのモデルを車両運動のシミュレーション結果に適用することで，仮想環境における官能評価を可能とする手法が提案されている[19]．さらに，制御パラメータの最適化を組み合わせることで，官能性能設計の自動化も実現されている[20]．これらの研究は，官能要因に基づいて官能評価指標を定義することで，バーチャルでの官能性能設計が可能であることを示している．建設機械の分野においても，油圧ショベルの作業機操作を対象に，遅れやむだ時間といった車体特性と操作性評価の関係性を分析した研究が報告されている[8]．しかし，これらの研究は，官能要因と官能評価結果の相関関係を扱っており，官能要因がオペレータの操作にどのように作用して操作性が評価されているのかというメカニズムについては十分に解明されていない．

操作性評価のメカニズム解明を目的として，ホイールローダを対象に，オペレータ操作の変化点の総数と操作性の評価結果の関係性を分析した研究が報告されている[11，21]．これらの研究では，車体特性の一つである最大牽引力の設定値を変更すると，オペレータの操作における変化点の数が変化し，それが操作性評価に影響を与えることが示されている．しかし，分析対象は牽引力に限定されており，その他の官能要因の影響を考慮した評価は十分に行われていない．この課題を解決するためには，官能要因と想定される複数の車体特性や外部環境条件を変更し，それらの影響を評価する実験を行う必要がある．しかし，実機を用いて多数の車体特性を任意に変更し，組み合わせを考慮した多様な条件で実験を行うことや各条件で外部環境を統一，もしくは変更することは現実的に極めて困難である．

このような課題に対する対応策として，官能要因に関する調査的な研究に，バーチャルリアリティ（VR）技術を活用した研究が報告されている．障害物を回避しながら自動車を運転するシナリオをバーチャル空間上に再現することで，車速などの車体特性だけでなく車線境界線の違いのような外部環境の影響についても考慮した多面的な分析が可能となっている[22]．物体との接触回避のように実環境では危険を伴うシナリオに対して，VR 技術を用いることで安全性を確保しつつ実験データを収集し，回避行動における人間の認知判断のメカニズムを解明する研究も行われている[23]．さらに，VR 環境における自動車運転で頭部の動きと運転操作の相関を明らかにし，頭部の動きを利用したインターフェースによる操作性向上手法の提案も報告されている[24]．これらの研究は，車体特性や外部環境の変更，それらの影響評価を実環境と比較して容易に実現できる VR 技術が，官能要因に関する調査的実験に対して有用であることを示している．したがって，本研究では，油圧ショベルのシミュレータを用い，仮想空間上で複数の車体特性や視覚情報を変更することにより，操作性に影響を与える官能要因を明確化する．

2.2　遠隔操作の操作性向上

遠隔操作システムは，危険な場所や月面など，人が容易に立ち入ることができない環境においても，遠隔地からの操縦により安全な作業を可能にする．そのため，建設機械の分野においてもその活用が期待されている．建設機械の遠隔操作は，目視距離での遠隔操作から始まり，1990 年代以降はカメラ映像を用いた遠隔操作が一般的となった[25]．しかし，遠隔操作は搭乗時と比較すると約 5 割程度作業効率が低下するこ

とが報告されている[26]．これは，通信を介した操作に起因する通信遅延により，オペレータの操作と実機の動作にタイムラグが生じ，作業効率や操作性が悪化するためである．さらに，カメラ画像では視覚情報に加え，音や振動などの作業環境情報が搭乗時と異なること，またレバーの配置などのインターフェースの違いが作業効率に影響を及ぼすことが指摘されている[27]．

自動車の分野においては，通信遅延への対応策として，通信遅延を補償する予測映像をオペレータに提示することで，操作性を改善する手法が研究されている[28-30]．この手法では，車両の運動モデルを用いて通信遅延を考慮した位置情報や姿勢を予測し，外部環境との位置関係も反映した予測映像を生成する．オペレータに遅延を補償した予測映像を提示することで，通信遅延による操作の違和感を軽減し，安定した操作を実現している[28]．しかし，予測映像の生成には高い計算負荷を要することが課題となっている．このため，予測映像を提示するのではなく，予測した車両の位置や姿勢などの車両情報のみを補助的に映像に重畳する手法も提案されている[31,32]．この手法は，運転パフォーマンスの改善に加え，予測映像を提示する手法と比較して計算負荷を低減できる．建設機械においても，油圧ショベルの旋回操作に対し，作業機の予測位置を補助的に重畳することで，作業効率が改善することが報告されている[33]．しかし，予測位置を重畳する際に，元画像の車体映像と重なることで，視認性が低下するという課題があり，提示方法について操作性に配慮した検討が今後の課題となっている．そこで，本研究では，オペレータは実環境ではなく仮想空間上の油圧ショベルを見て操作を行い，操作量のみを通信を介して実機に送信する遠隔操作手法を提案する．本手法は，予測映像の提示や車両の予測位置を重畳することなく，通信遅延の操作に対する影響を抑止できる．結果として，計算負荷を抑え，映像の複雑さによる操作性の悪化を低減できる．

医療分野では，視覚情報を補完するために，術野の立体映像を提示することで操作精度が向上したことが報告されている[34]．建設機械においても，医療分野と同様に高度な空間知覚が求められるため，視覚情報の補完は重要である．この課題に対して，奥行き情報を補完するために運動立体視を再現し，立体感を知覚可能な映像を提示すること[35]や作業環境を CG 画像で再現すること[36]で，作業効率を改善したことが報告されている．また，オペレータの操作をアシストする自動制御により作業効率を向上させる手法が提案されている[37]．この手法では，目標軌道に作業機を自動

的に誘導し，目標位置で的確に排土できるようオペレータ操作を補助することで，視覚情報の欠如による作業効率の低下を改善している．

さらに，作業環境の情報として力覚をフィードバックする手法も提案されている．医療分野においては，力覚フィードバックにより操作精度を高め，安全性を向上する手法が報告されている[38]．建設機械においても同様に，作業機に作用する反力をオペレータにフィードバックすることで，作業機に過大な負荷を与えず，安全かつ効率の良い作業が可能となることが示されている[39]．また，建設機械では，作業現場の状況に応じて車体が傾斜し，操縦席に振動が生じる．この揺動感をフィードバックする操縦システムを構築することで，より現実に近い操作環境を再現した事例も報告されている[40]．しかし，これらの手法は通信遅延により不安定になる点が課題となるため，設計においては作業情報の補完だけではなく，通信遅延の影響低減も併せて考慮することが必要である[41]．さらに，建設機械は山間部など通信インフラが整っていない環境で稼働するため，通信遅延の影響低減は依然として課題である．加えて，建設機械の今後の課題として，月面施工への対応が挙げられる．月面施工を対象とした遠隔操作では，通信遅延による作業効率の低下だけでなく操作負荷の増大による操作性の悪化が課題となる．このことから，本研究では，通信遅延が操作負荷に与える影響に着目し，通信遅延の影響を低減することで遠隔操作の操作性を向上する制御手法を提案する．

2.3　半自動制御へのオペレータの経験則の反映

近年，建設現場の生産性向上や熟練オペレータの不足といった課題が深刻化しており，その課題への対応策として，建設機械の自動化技術が急速に進展している[42]．すでに，一部の操作を自動化した ICT 建機が開発されており[17,43]，経験の浅いオペレータでも熟練オペレータ相当の作業精度を実現できるようになった．しかし，これらの制御は，作業精度を主な評価指標としており，オペレータの操作性は十分に考慮されていない．そこで，本研究では，半自動制御の自動制御部にオペレータの経験則を反映させることで，オペレータの自動制御に対する違和感を低減し，操作性を向上する半自動制御手法を提案する．自動車の分野においては，ドライバの操作の個性に適応的に対応することで操作性を向上する運転支援システムの開発が，今後の開発課題の一つとして示されている[44]．このことから，建設機械の半自動制御において

も，自動制御による運転支援に対するオペレータの違和感を低減することは重要な技術課題であると考えられる．

自動化の将来像として，建設機械の完全自動化による施工現場の無人化が目指されている[45]．しかし，建設機械の作業パターンは多岐にわたり，作業環境も複雑に変化するため，これらに対応できる自動制御システムの開発が課題となっている[46]．例えば，代表的な建設機械である油圧ショベルの掘削作業では，掘削対象の形状がサイクルごとに変化し，土壌特性も多様である[47,48]．そのため，目標軌道に沿って作業機を自動制御しても，障害物による負荷など予期せぬ事象が発生し，目標軌道から大きく逸脱して作業効率が悪化する場合がある[49]．この課題に対し，人間の操作を模倣するオペレータモデルを自動制御システムに組み込む手法が提案されている[50,51]．Huh らは，人間が外部環境の変化に応じて柔軟に操作量を調整し，多様に変化する作業現場に対応している点に着目した．その認知，判断，操作に基づく経験則を機械学習によりモデル化し，自動制御に組み込むことで，人間と同様に環境変化に対応可能な自動掘削システムの構築が目指されている．また，Bradley らはオペレータの掘削作業結果をもとに目標軌道を自動算出し，障害物が存在した場合には回避可能なシステムを提案している[52]．これらの研究は，人間の操作が自動制御における操作の指針になり得ることを示唆しているが，依然として対応可能な条件は限定的であり，さまざまな土壌条件や障害物回避のパターンに対応するためには，操作に関する知見の蓄積とさらなる学習の強化が課題である．

オペレータの操作を模擬する方法として，ファジィロジックを用いた研究も報告されている[53-55]．人間の認知，判断，操作にはあいまいさが存在し，その特徴を表現する方法としてファジィロジックのメンバーシップ関数が用いられている．Lever らは，ファジィロジックを用いて構築したオペレータモデルを自動制御に適用し，掘削作業を問題なく実施できることを示した[56]．しかし，掘削対象の粒子が大きくなると目標軌道に対する精度が低下するという課題も報告されている．これは，多様な土質に対応するためには，掘削対象の特性とオペレータ操作の関係性を，背景にある経験則も踏まえてより深く分析し，操作メカニズムを明確化する必要があることを示唆している．そこで，本研究では，第 3 章の研究の結果から得られたオペレータの操作に関する知見に基づき，その経験則を半自動制御に適用することとした．オペレータの経験則を半自動制御に組み込むにあたっては，機械学習を用いた手法と比較して，

メンバーシップ関数の方が操作における認知，判断の根拠を理解しやすいことから，ファジィロジックを用いた[57]．

さらに，先行研究では，ストロークセンサなどのセンサ情報から車体姿勢を推定して制御を行っているのに対し，本研究では，人間の操作と同様にオペレータ視点の画像情報から車体姿勢を推定する．人間が空間を知覚する際，五感の中でも視覚情報が最も支配的であることが知られており[58]，第 3 章の研究結果からも，視覚情報がオペレータの操作に大きく影響することが明らかとなったためである．先行研究では，土質の判断[59]や障害物の有無などの周辺環境の把握[60]を目的として画像情報が用いられているのに対して，本研究では制御量を決定するための主要な入力情報として画像情報を用いる．すなわち，画像情報から操作に必要な情報を抽出し，オペレータの経験則に基づいて操作量を決定するオペレータモデルを組み込んだ半自動制御手法を提案する．

3　油圧ショベルの操作性に影響する官能要因の抽出

3.1　はじめに

建設機械の官能性能を設計するためには，官能評価に影響する官能要因を明確化し，それらを適切に制御する手法を構築しなければならない．したがって，本研究では操作性に着目し，油圧ショベルの操作に影響する官能要因を抽出するとともに，その知見に基づいた油圧ショベルの制御手法を提案することで，官能性能設計のフレームワークを示すことを目的とした．本章では，一つ目の課題である官能要因の抽出に関する研究について述べる（図 3.1）．



図 3.1 研究の目的

油圧ショベルは，作業機を構成するブーム，アーム，バケットを同時に操作する掘削操作や上部旋回体を左右に回転させる旋回操作など，操作パターンが多岐にわたる．そのため，本研究では，実験 1 として単軸のみを操作する単軸操作と実験 2 として二軸を同時に操作する複合操作に分けて，官能要因に関する知見を積み上げることとした．実験では，官能要因と想定される車体特性や視覚情報を変更し，それらのレバー操作に対する影響を評価する．このような実験では，実物の車両よりもシミュレータの方がパラメータ設定の変更が容易であることから，実験にはシミュレータを活用した．

本章は続く 3.2 節にて実験の概要を説明する．さらに，3.3 節にて単軸操作を対象とした実験（実験 1）について，3.4 節にて複合操作を対象とした実験(実験 2)について実験の概要と結果および考察を述べる．最後に，3.5 節にて本章をまとめる．

3.2　実験概要

油圧ショベルの操作パターンは多岐にわたるため，単軸操作（実験 1）と，複合操作（実験 2）に分けて実験を行った．

実験 1 では，油圧ショベルのブーム操作と旋回操作のそれぞれ単独操作を対象とした．ブームを単独で操作するとバケットが上下方向に移動し，旋回操作を単独で行うと油圧ショベルの上部旋回体が左右に回転するため，バケットは水平方向に移動する（図 3.2）．したがって，ブーム操作はバケットを上下方向に動かす操作，旋回操作はバケットを左右方向に動かす操作と捉えることができる．

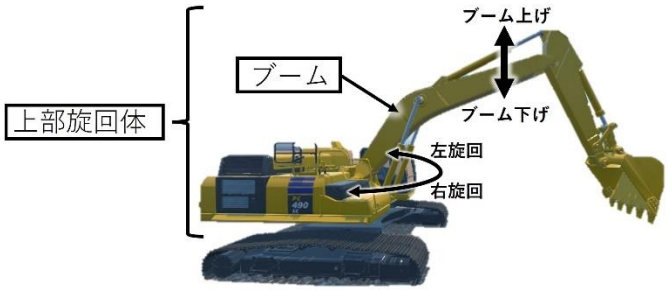


図 3.2 ブーム単独操作と旋回単独操作

実験 2 では，油圧ショベルの官能評価項目の中でも代表的なすきとり操作を対象とした．すきとり操作は，ブームとアームを同時に操作し，バケット先端の刃先を地面に沿って水平に移動させて整地する操作である（図 3.3）．掘削操作も油圧ショベルの主要な操作であるが，ブーム，アーム，バケットの三軸が動作し，さらに土壌から受ける反力の影響も考慮する必要があるため，解析が非常に複雑になる．そのため，本研究では，よりシンプルなすきとり操作から知見を蓄積することとした．

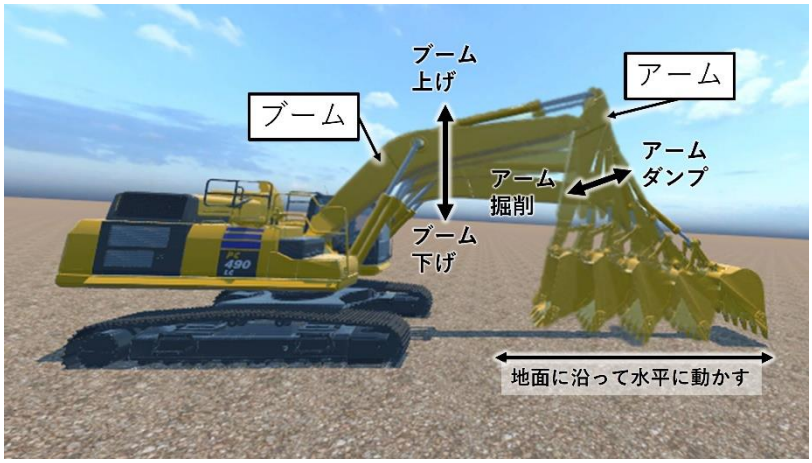


図 3.3 すきとり操作

各実験で分析対象としたパラメータを，表 3.1 に示す．実験 1 では，制御対象の動特性や静特性，入力インターフェースの違いや操作する手の左右差の影響を評価した．さらに，油圧ショベルの視覚情報の影響を評価するために，バケットを簡略化した四角形の物体を操作する実験も並行して実施した．

実験 1 の結果，むだ時間と視覚情報が油圧ショベルの操作に影響する官能要因であることが明らかになった．このことから，実験 2 では，すきとり操作に対するむだ時間（実験 2-1）と視覚情報（実験 2-2）の影響評価を行った．

表 3.1 各実験の操作パターンと分析対象

<table>
<tr><th>実験種別</th><th colspan="2">実験No.</th><th>操作パターン</th><th>分析対象</th></tr>
<tr><td rowspan="2">単軸操作</td><td colspan="2" rowspan="2">実験1</td><td>ブーム単独操作</td><td rowspan="2">・制御対象の動特性と速度
・入力インターフェース
・操作する手の左右差
・視覚情報</td></tr>
<tr><td>旋回単独操作</td></tr>
<tr><td rowspan="2">複合操作</td><td rowspan="2">実験2</td><td>実験2-1</td><td rowspan="2">すきとり操作</td><td>むだ時間</td></tr>
<tr><td>実験2-2</td><td>視覚情報</td></tr>
</table>

3.3　実験 1 単軸操作を対象とした官能要因の抽出実験

本節では，油圧ショベルの単軸操作に影響する官能要因を抽出するための実験について，その概要および結果を示す．

3.3.1　実験条件

本実験では，単軸操作としてブーム単独操作と旋回単独操作を対象とした（図 3.2）．油圧ショベルのシミュレータを用いた実験（以下，油圧ショベル実験）に加え，バケットを模した黄色い四角形の物体を操作する実験（以下，基礎実験）も実施した．これは，作業機などの視覚情報が操作に与える影響を評価するためである．

本実験における実験パラメータを表 3.2 に示す．制御対象の特性値として，動特性に該当する遅れとむだ時間，静特性に該当する速度設定を実験パラメータとした．さらに，操作条件として入力インターフェースと操作する手の左右も変更して実験を行った．ただし，被験者への負担を考慮し，インターフェースの影響評価は基礎実験に限定した．

表 3.2 実験パラメータ

No.	実験パラメータ	条件		
1	遅れ[ms]	0	100	300
2	むだ時間[ms]	0	100	300
3	速度設定	1	1.5	
4	入力インターフェース	Gamepad	Joystick	
5	操作する手の左右差	右手	左手	

本実験では，油圧ショベルの作業機動作および旋回動作を，むだ時間を含む一次遅れ系（式 3.1）でモデル化した．動特性に該当する遅れ(T)およびむだ時間(L)の影響を評価するために，それぞれ 0ms，100ms，300ms の 3 条件を設定した（表 3.3）．なお，基礎実験において制御対象とした物体も，油圧ショベルと同様にむだ時間を含む一次遅れ系で表現した（式 3.1）．

$$\boldsymbol{G(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls}} \qquad \boldsymbol{(3.1)}$$

一般的に，制御対象の動特性は操作性に影響を及ぼすことが知られている．例えば，むだ時間が大きい場合，操作入力から制御対象が動き始めるまでのタイムラグが増加し，操作性が悪化する可能性がある．よって，本実験ではこれらのパラメータが油圧ショベルの操作に与える影響を実験的に明らかにするために，実験条件として設定した．ただし，設定値を大きくしすぎると，むだ時間と遅れの影響を切り分けて評価することが困難になるため，最大値を 300ms とした．

さらに，速度感の影響を評価するために，速度設定も実験パラメータとして変更した．速度の設定値は，式 3.1 のゲインKを調整し，標準条件では$K = 1.0$，高速条件では 1.5 倍速となるように$K = 1.5$とした（表 3.3）．標準条件は，バケットが上下および左右方向に動く際の実機の速度に相当する値を採用した．

表 3.3 制御対象の特性値に関するパラメータ条件

特性値ID	遅れ[ms]	むだ時間[ms]	速度設定
P-01	100	0	標準
P-02	300	0	標準
P-03	0	100	標準
P-04	0	300	標準
P-05	100	0	高速
P-06	300	0	高速
P-07	0	100	高速
P-08	0	300	高速

入力インターフェースや操作する手の左右の違いが操作に与える影響を評価するため，これらの操作条件も実験パラメータとして変更した（表 3.4）．

入力インターフェースは，ゲームパッド（Logicool F310r）とゲーム用のジョイスティック（Thrustmaster T.1600M FCS）の二種類を用いた．ゲームパッドは一般的にゲームなどで広く利用されており，被験者は実機のレバーに近いゲーム用のジョイスティックよりもゲームパッドに慣れ親しんでいる可能性が高いと考えられる．そこで，本研究では，これら 2 種類のインターフェースを用いて操作への影響を比較評価した．

操作方法は，以下のとおりである．ゲームパッドでは，スティックの上下操作が制御対象の上下動作に対応し，奥に倒すと上方向，手前に倒すと下方向に制御対象が移動する．一方，ジョイスティックでは，油圧ショベルの実機操作に準じ，レバーを奥に倒すと下方向，手前に倒すと上方向に制御対象が移動する．旋回操作は，両インターフェースともスティックまたはレバーの左右操作に対応し，右に倒すと右方向，左に倒すと左方向に制御対象が移動する．なお，二種類のインターフェースを用いた実験は基礎実験のみとし，油圧ショベル実験では実機操作に近いジョイスティックのみを使用した．実験では，表 3.4 に示した操作条件ごとに，表 3.3 の 8 条件で被験者に操作を行わせ，各パラメータが操作に及ぼす影響を評価した．

表 3.4 操作条件

操作ID	実験種別	モデル	操作方向	インターフェース	操作する手
Ope-01	基礎実験	簡易	上下	Gamepad	右手
Ope-02					左手
Ope-03				Joystick	右手
Ope-04					左手
Ope-05	油圧ショベル実験	油圧ショベル	ブーム単独操作	Joystick	右手
Ope-06					左手
Ope-07	基礎実験	簡易	左右	Gamepad	右手
Ope-08					左手
Ope-09				Joystick	右手
Ope-10					左手
Ope-11	油圧ショベル実験	油圧ショベル	旋回単独操作	Joystick	右手
Ope-12					左手

3.3.2 実験方法

本実験の方法を，以下に示す.

3.3.2.1 参加者および実験装置

本実験には，23 歳から 38 歳（平均：29.8 歳，標準偏差：6.0）の 10 名の被験者（男性 8 名，女性 2 名）が参加した．実験開始前に，すべての参加者に試験手順を説明し，事前に実験参加への同意を得た．被験者は正常な視覚及び身体能力を有していた．被験者のうち 4 名は建設機械の運転免許を保有し，日常的な運転は行っていないものの，複数回の運転経験があった．その他の 6 名は免許を保有していないが，そのうち 2 名は一度のみ運転経験があった.

実験に使用したコンピュータは，CPU に Xeon(R) Gold 6234(3.3GHz)を搭載したものと，同等のスペックである Xeon(R) Gold 5222(3.8GHz)を搭載した二台のコンピュータを使用した．いずれもメモリ容量は，32GB であった．映像提示には 27 インチの ASUS ゲーミングモニタ PG259QN を用い，フレームレートは 360Hz に設定した．基礎実験の環境は Unity を用いて作成し，油圧ショベル実験の環境は AGX Dynamics と Unity を連成させて構築した．モニタは被験者の正面に設置し，ジョイスティックは左右に一台ずつ配置した．ジョイスティックの位置は，被験者が操作しやすい位置に固定し，実験中に位置変更は行わなかった．入力インターフェースは，すべて有線でコンピュータに接続した．本実験では，操縦席周辺の環境は調査対象とせず，入力

インターフェースのみを評価対象とした．そのため，被験者はキャスターのない椅子に着座し，机上に設置したモニタを見ながら操作を行った．

3.3.2.2　実験フロー

本実験のフローを，図 3.4 に示す．実験では，表 3.4 に示す Ope-01 から Ope-12 までの操作条件ごとに，表 3.3 の P-01 から P-08 までの 8 条件で制御対象の特性値を変更し，被験者に操作を行わせた．被験者の負担軽減のため，各操作条件終了後には休憩を設けた．また，操作条件に対する慣れの影響を排除するために，各操作条件の開始前に練習時間を設けた．表 3.4 の各操作条件の実験に約 20 分を要するため，被験者の負担を考慮し，練習時間は約 4 分（実験時間の 20%）とした．練習における操作回数は，表 3.3 の各条件の操作回数（12 回）の 3 倍にあたる 36 回とした．練習終了後には練習量に不足がないことを被験者に確認し，不足を訴えた被験者はいなかった．練習時の制御対象の特性値は，むだ時間と遅れは 0ms とし，速度設定は標準条件とした．

練習終了後，表 3.3 の 8 条件で制御対象の特性値を変更して操作を行わせた．各条件の実施前には，基準条件で試験条件と同様に 12 回操作を行わせ，その後に該当条件で実験を実施した．操作終了後には，操作性評価のためのアンケートを実施し，直前に操作した基準条件と比較して評価を行わせた．基準条件は，基礎実験では遅れおよびむだ時間をそれぞれ 0ms とし，速度設定は標準条件とした．一方，基礎実験の結果から速度設定の影響がなかったため，油圧ショベル実験では基準条件の速度設定を標準条件と高速条件の 2 条件でランダムに設定した．また，各操作条件における P-01 から P-08 の実施順序についても，試験順の影響を排除するため，Ope-01 から Ope-12 の操作条件ごとにランダム化した．アンケートでは，基準条件と比較して，操作性を 1 点から 5 点の間で被験者に評価させた（図 3.5）．操作性が基準条件と同等の場合は中間の 3 点とし，基準条件よりも操作性が良い場合は 3 点から 5 点，悪い場合は 1 点から 3 点の間で操作性の程度に応じて点数による定量評価を行わせた．

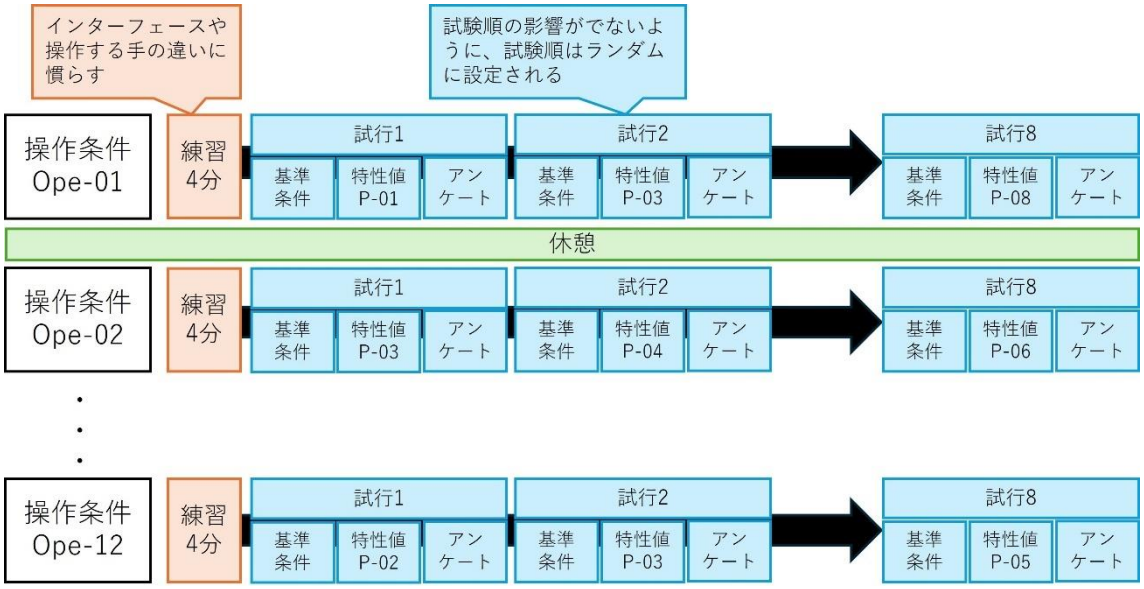


図 3.4 実験フロー

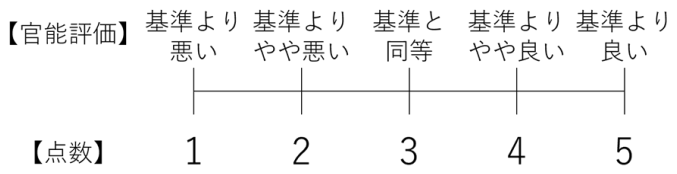


図 3.5 アンケートにおける操作性の評価基準

3.3.3 上下方向操作に関する実験結果

制御対象を上下方向に移動させる操作（表 3.4 の Ope-01 から Ope-06）に関する実験結果を，基礎実験（表 3.4 の Ope-01 から Ope-04），油圧ショベル実験（表 3.4 の Ope-05 および Ope-06）の順に以下に示す.

3.3.3.1 上下方向操作（基礎実験）の実験結果

上下方向にバケットを模した物体を移動させる基礎実験について，実験の概要と結果を以下に示す.

3.3.3.1.a 実験シナリオ

実験課題は，二次元平面上でバケットを模した四角形の物体を上下方向に移動させ，モニタ画面の左から接近する障害物を回避するものとした．実験で提示した映像の一例を，図 3.6 に示す．制御対象の物体の大きさは一辺 0.8m の正方形とし，これは

アームを最も伸ばした際にオペレータ席から視認されるバケットと同等の大きさである．障害物の配置は，次の回避位置までの移動距離が長距離の条件と短距離の条件が混在するように設計した．障害物の回避範囲は 2.5m とし，被験者には回避範囲の中心に制御対象の中心を一致させることを指示した．ポジショニング操作を意識させるために，障害物回避時に物体の中心位置が回避範囲の中心位置に対して±0.2m 以内に収まった場合，加点される仕組みを設けた．なお，障害物の移動速度は 1.0m/s の一定速度とし，3.3.2 節に示した実験方法に準じて実験を実施した．

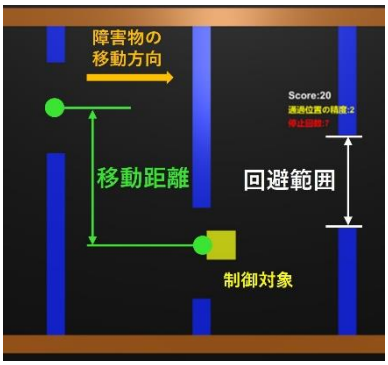


図 3.6 基礎実験（上下方向操作）のモニタ提示映像

3.3.3.1.b　実験結果

実験データは，物体の移動方向（上方向，下方向）および移動距離（長距離，短距離）に基づき，表 3.5 に示す 4 条件の分析条件に分類し，実験パラメータの操作に対する影響を分析した．具体的には，表 3.6 に示した因子 A から因子 D がレバー操作およびポジショニング精度に与える影響を，分散分析により評価した．レバー操作については，操作意図を考慮するため，操作の結果として得られる制御対象の移動量を分析対象とした．移動量は，障害物間の移動時間に基づいて移動区間を 2 分割し，区間ごとに算出した（図 3.7）．前半は物体を移動させることが主となるためアプローチ区間（以下，AP 区間），後半はポジショニングが主となるためポジショニング区間（以下，PO 区間）と定義した．例えば，PO 区間の移動量が AP 区間よりも多い場合，操作が後半に偏ったと判断できる．このように，操作の特徴を踏まえた分析を実施するために，影響因子として移動区間の差異（因子 D）を加えた．さらに，修正操作量も評価するために，物体を進行方向とは逆方向に移動させ，位置を修正した量を修正量として AP 区間と PO 区間に分けて算出した．

ポジショニング精度は，被験者が目標とした位置とポジショニング結果の差異と定義した．本実験では，障害物の回避範囲の中心位置に目印を配置していないため，被験者が目標とした位置には基準条件で得られたポジショニング結果を用いた．

なお，移動量，修正量，およびポジショニング精度はすべて被験者全員の平均値を算出した．また，基礎実験では基準条件の速度設定を標準条件に限定したため，分散分析の実施にあたり，解析上の制約から動特性と速度設定を統合して扱った．

表 3.5 上下方向操作の分析条件

上下分析No.	移動方向	移動距離
1	上	長距離
2	下	長距離
3	上	短距離
4	下	短距離

表 3.6 基礎実験で考慮した影響因子

記号	因子
A	動特性と速度設定の条件
B	操作する手の左右差
C	インターフェースの差異
D	移動区間の差異

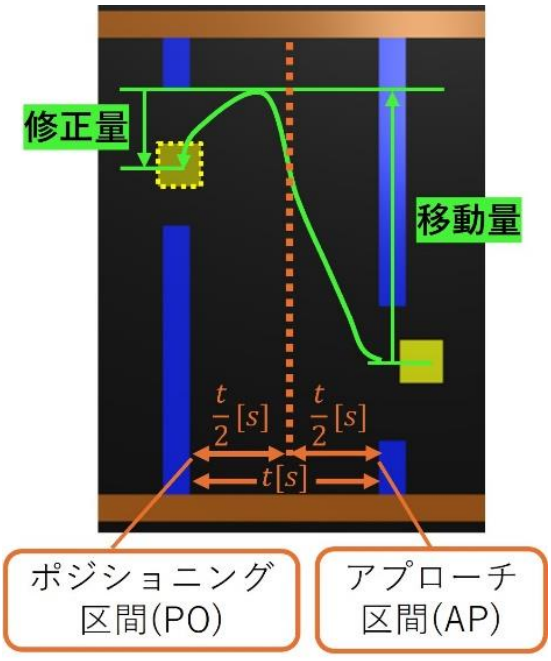


図 3.7 移動区間の分割

移動量を対象とした分散分析の結果，すべての分析条件において因子 A，C および D の交互作用が見られた（表 3.7）．なお，多重比較の結果，因子 A に含まれる速度設定の影響は確認されず，因子 A の影響は主に動特性（遅れ，むだ時間）の違いによるものであった．

表 3.7 移動量の分散分析結果（上下方向操作）

上下分析No.	因子ACDの交互作用		
1	$F(8,6328) = 12.08,$	$p = 0.0000$	***
2	$F(8,5048) = 3.86,$	$p = 0.0002$	***
3	$F(8,1208) = 3.46,$	$p = 0.0006$	***
4	$F(8,1208) = 1.95,$	$p = 0.0493$	*

$* \ p < 0.05$　　$** \ p < 0.01$　　$*** \ p < 0.001$

移動量に対する因子 A，C および D の影響を評価した結果を，図 3.8 に示す．縦軸には移動量を設定し，AP 区間と PO 区間のデータをプロットすることで因子 D の影響を評価した．横軸には，因子 A の影響を評価するために，動特性の設定値を配置した．遅れとむだ時間の条件が同じ場合は，同一軸上にデータをプロットするため，それぞれの移動量に対する影響度合いを比較評価できる．さらに，因子 C の影響を評価するため，データをインターフェースの種類に分けてプロットした．これにより，動特性だけでなくインターフェースの差異による影響を可視化した．

図 3.8 のグラフ（A）は上下分析 No.1 の結果を示している．グラフ上の上下の分布はそれぞれ AP 区間と PO 区間のデータであり，PO 区間の移動量が AP 区間よりも多い傾向が見られた．また，ゲームパッドによる操作結果について PO 区間に着目すると，むだ時間 300ms 条件（*1）は遅れ 300ms 条件（*3）よりも，基準条件（*0）に対する移動量の差異が大きかった．さらに，むだ時間 300ms 条件では，ジョイスティック（*2）と比較してゲームパッド（*1）の方が基準条件に対する移動量の差異が大きく，インターフェースの操作に対する影響が確認された．以降の分析についても，主効果もしくは交互作用が見られた因子に限定してグラフ化し，分析を実施した．

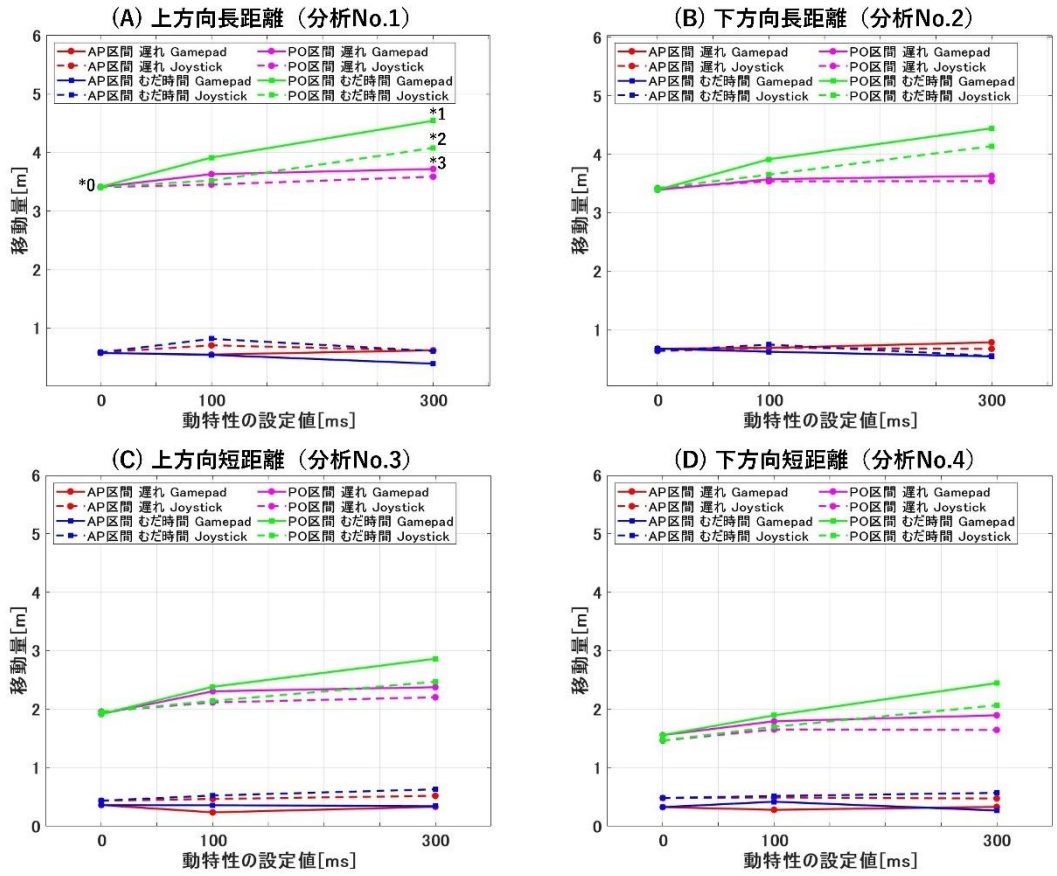


図 3.8 移動量と因子 ACD の交互作用（上下方向操作基礎実験）

PO 区間の移動量が AP 区間よりも多い傾向は，すべての分析条件で確認された．上下分析 No.2 においては，PO 区間のむだ時間条件で基準条件よりも移動量が増加する傾向が見られ，ゲームパッドによる操作の方がジョイスティックよりも基準条件に対する移動量の差異が大きかった（図 3.8(B)）．上下分析 No.3 および No.4 についても，むだ時間条件では基準条件よりも移動量が増加し，遅れ条件と比較するとむだ時間条件の方が基準条件との差異が大きかった（図 3.8(C)および(D)）．一方，多重比較を実施した結果，インターフェースの影響は見られなかった．

さらに，移動量に対する影響が確認された因子 A，C および D について，修正量への影響を評価した．結果を図 3.9 に示す．図の縦軸には修正量を設定し，移動量と同様の観点で分析した．その結果，すべての分析条件において，むだ時間 300ms 条件でゲームパッドによる操作を行った場合に，PO 区間の修正量が最も多くなった．

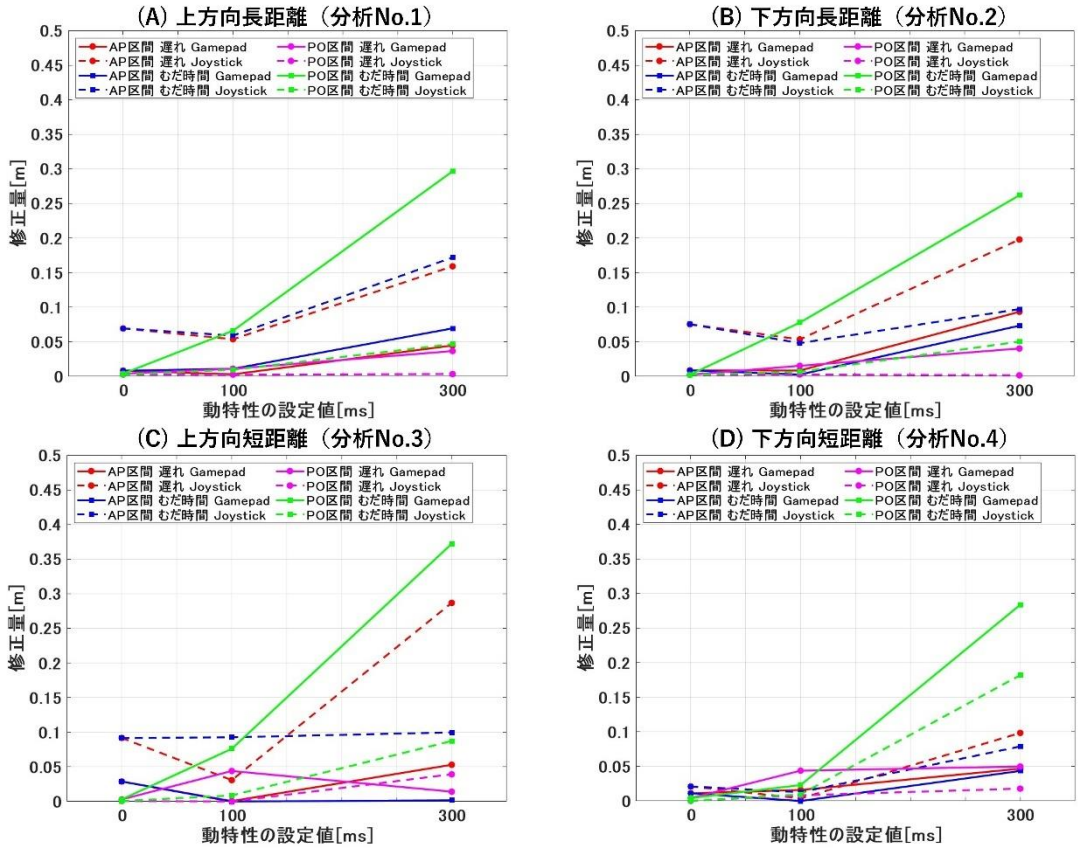


図 3.9 修正量と因子 ACD の交互作用（上下方向操作基礎実験）

次に，ポジショニングの精度に対する因子 A，B および C の影響を，分散分析により評価した．ポジショニング精度には移動区間の差異（因子 D）は影響しないため，分析対象から除外した．分散分析の結果，上下分析 No.1 および No.4 において因子 A の主効果が確認された（表 3.8）．

表 3.8 ポジショニング精度の分散分析結果（上下方向操作）

上下分析No.	因子Aの主効果	
1	$F(8,3164) = 13.43,\quad p = 0.0000$	***
2	$F(8,2524) = 0.98,\quad p = 0.4465$	
3	$F(8,604) = 1.28,\quad p = 0.2526$	
4	$F(8,604) = 3.33,\quad p = 0.0010$	**

$*\ p < 0.05$　　$**\ p < 0.01$　　$***\ p < 0.001$

上下分析 No.1 および No.4 について，ポジショニング精度に対する因子 A の影響を評価した結果を図 3.10 に示す．縦軸には，障害物回避範囲の中心と制御対象のポジショニング結果との差異を示した．上下分析 No.1（図 3.10（A））では，縦軸の正の値が進行方向を示す．一方，上下分析 No.4（図 3.10(B)）は移動方向が逆であるため，

縦軸の負の値が進行方向を示す．進行方向の違いを考慮して分析した結果，むだ時間300ms 条件では目標位置（基準条件）を大きく超過しているのに対し，遅れ 300ms 条件では目標位置よりもやや手前で停止する傾向が共通して見られた．さらに，遅れ条件と比較してむだ時間条件の方が目標位置との差異が大きく，ポジショニング精度が悪化した．

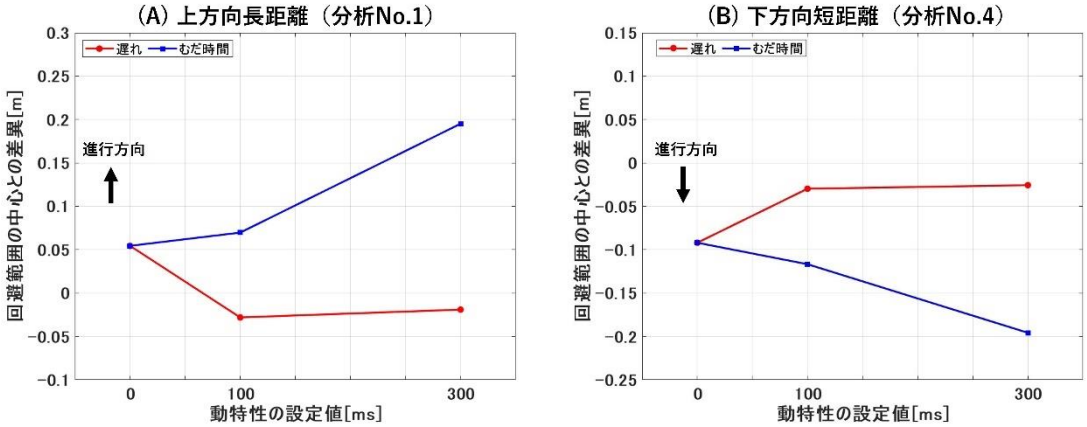


図 3.10 ポジショニング精度と因子 A の主効果（上下方向操作基礎実験）

3.3.3.2　ブーム単独操作（油圧ショベル実験）の実験結果

ブーム単独操作を対象とした油圧ショベル実験について，実験の概要と結果を以下に示す．

3.3.3.2.a　実験シナリオ

実験課題は，油圧ショベルのブームの単独操作によりバケットを垂直方向へ移動させ，モニタ画面の左側から接近する障害物にバケットが接触しないように回避するものとした．実験で提示した映像の一例を，図 3.11 に示す．作業機の姿勢は，アームシリンダが最縮の状態とした．障害物の回避範囲は，被験者に最も近い位置（図 3.11 の白矢印）が基礎実験と視覚的に同等の大きさになるように 4.0m に設定した．被験者には，回避範囲の中心にバケットの中心を一致させるようにポジショニング操作を指示した．その他の設定条件および実験シナリオは基礎実験と統一し，3.3.2 節に示した実験方法に準じて実験を実施した．

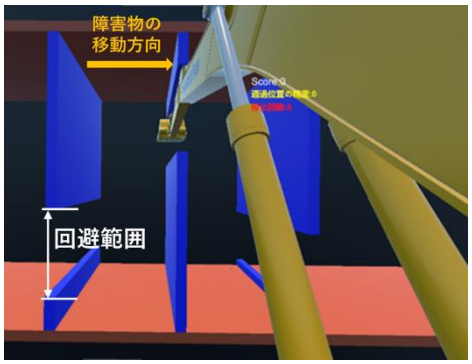


図 3.11 油圧ショベル実験（ブーム）のモニタ提示映像

3.3.3.2.b　実験結果

油圧ショベル実験においても，実験データを表 3.5 の分析条件に分け，基礎実験と同様の観点で分析を行った．移動量に対する表 3.9 の因子の影響を分散分析により評価した結果，すべての分析条件において因子 a および d の交互作用が確認された（表 3.10）．

表 3.9 油圧ショベル実験で考慮した因子

記号	因子
a	動特性の条件
b	速度の設定条件
c	操作する手の左右差
d	移動区間の差異

表 3.10 移動量の分散分析結果（ブーム）

上下分析No.	因子adの交互作用		
1	$F(4,3160) = 43.14,$	$p = 0.0000$	***
2	$F(4,2520) = 37.25,$	$p = 0.0000$	***
3	$F(4,600) = 7.05,$	$p = 0.0000$	***
4	$F(4,600) = 3.15,$	$p = 0.0139$	*

$*\ p < 0.05$　　$**\ p < 0.01$　　$***\ p < 0.001$

移動量に対する因子 a および d の影響を評価した結果を，図 3.12 に示す．すべての分析条件で，PO 区間の方が AP 区間より移動量が少なく，基礎実験とは相反する結果となった．また，上下分析 No.1（図 3.12(A)）および No.2（図 3.12(B)）では，PO 区間において遅れ 300ms 条件およびむだ時間 300ms 条件で基準条件よりも移動量が

増加し，むだ時間条件の方が基準条件との差異が大きかった．上下分析 No.3（図 3.12(C)）では多重比較の結果，PO 区間のむだ時間 300ms 条件で基準条件との有意差が確認され，むだ時間の影響が見られた．一方，上下分析 No.4（図 3.12(D)）では多重比較の結果，動特性の影響は見られなかった．

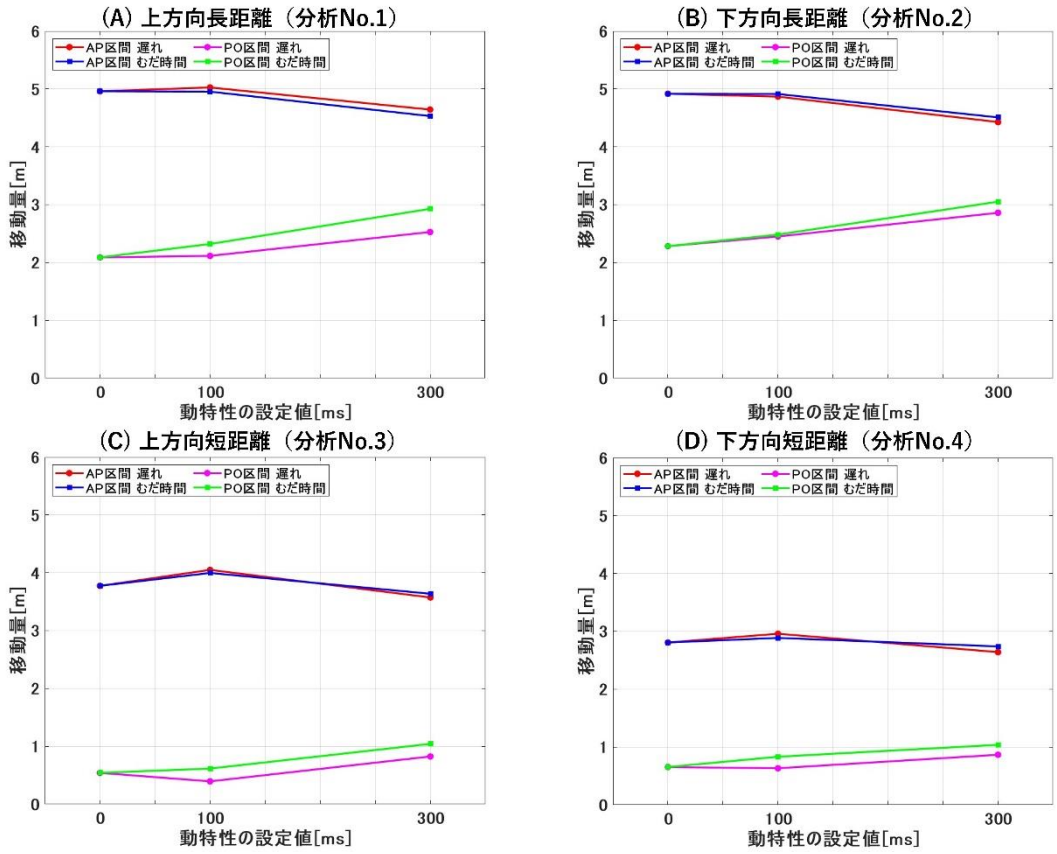


図 3.12 移動量と因子 ad の交互作用（ブーム単独操作）

油圧ショベル実験においても，基礎実験と同様に修正量に関する分析を実施した．移動量に対して因子 a および d の交互作用が見られた上下分析 No.1，No.2 および No.3 について，修正量に対する因子 a および d の影響を評価した．分析の結果，図 3.13 に示すとおり，すべての条件において PO 区間のむだ時間 300ms 条件で修正量が最も多くなった．

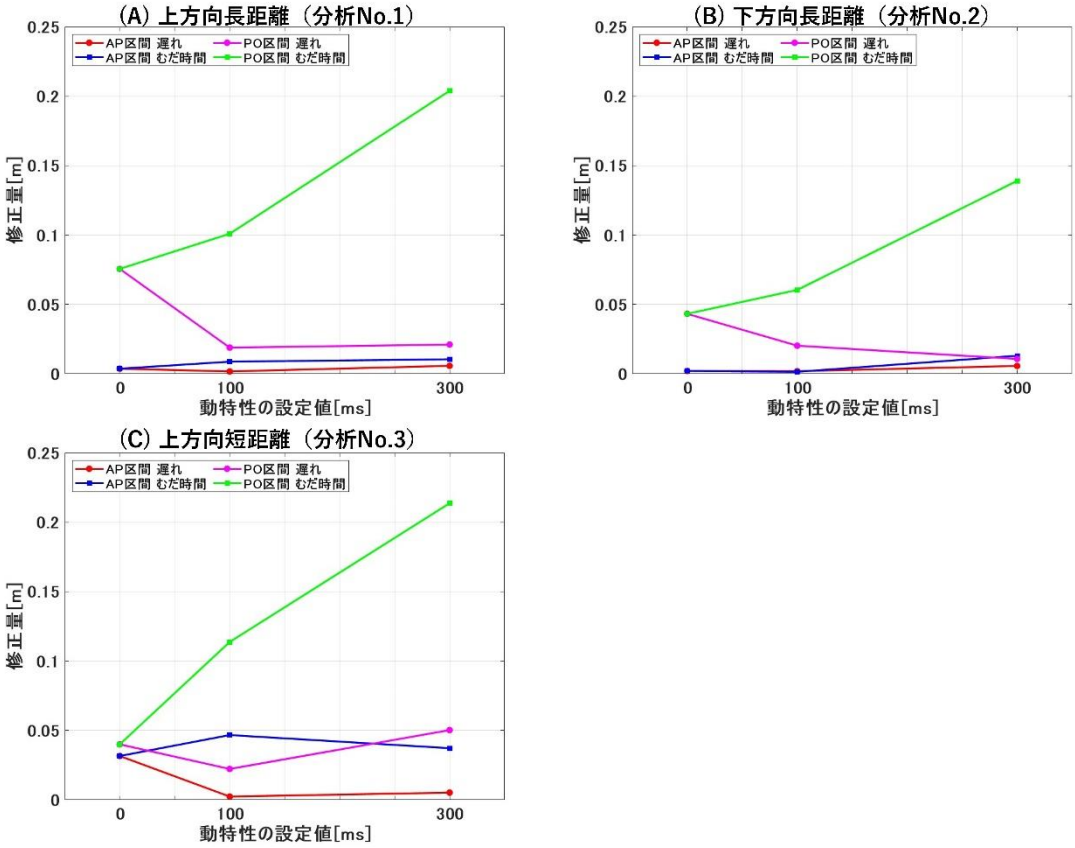


図 3.13 修正量と因子 ad の交互作用（ブーム単独操作）

次に，ポジショニング精度に対する表 3.9 の因子 a，b および c の影響を，分散分析により評価した．その結果，上下分析 No.1，No.2 および No.4 において因子 a の主効果が確認された（表 3.11）．

表 3.11 ポジショニング精度の分散分析結果（ブーム）

上下分析No.	因子aの主効果		
1	$F(4,1580) = 2.61,$	$p = 0.0342$	**
2	$F(4,1260) = 5.72,$	$p = 0.0001$	***
3	$F(4,300) = 1.13,$	$p = 0.3406$	
4	$F(4,300) = 3.15,$	$p = 0.0023$	**

$*\ p < 0.05$　　$**\ p < 0.01$　　$***\ p < 0.001$

上下分析 No.1，No.2 および No.4 について，ポジショニング精度に対する因子 a の影響を評価した結果を図 3.14 に示す．上下分析 No.1（図 3.14(A)）と No.4（図 3.14(C)）では，むだ時間 300ms 条件で基準条件との差異が見られた．上下分析 No.2（図 3.14(B)）では，むだ時間 100ms および 300ms 条件で基準条件との差異が確認された．上下分析 No.1 では，縦軸の正の値が進行方向を示す．むだ時間 300ms 条件で

は目標位置（基準条件）を通過した位置で停止しており，遅れ条件でも目標位置を超過したが，むだ時間条件の方が目標位置との差異が大きく，ポジショニング精度が悪化した．上下分析 No.2 および No.4 では移動方向が反転するため，縦軸の負の値が進行方向を示す．これらの条件でも，むだ時間条件の方が遅れ条件よりも目標位置を超過する傾向が強く，ポジショニング精度が悪化した．

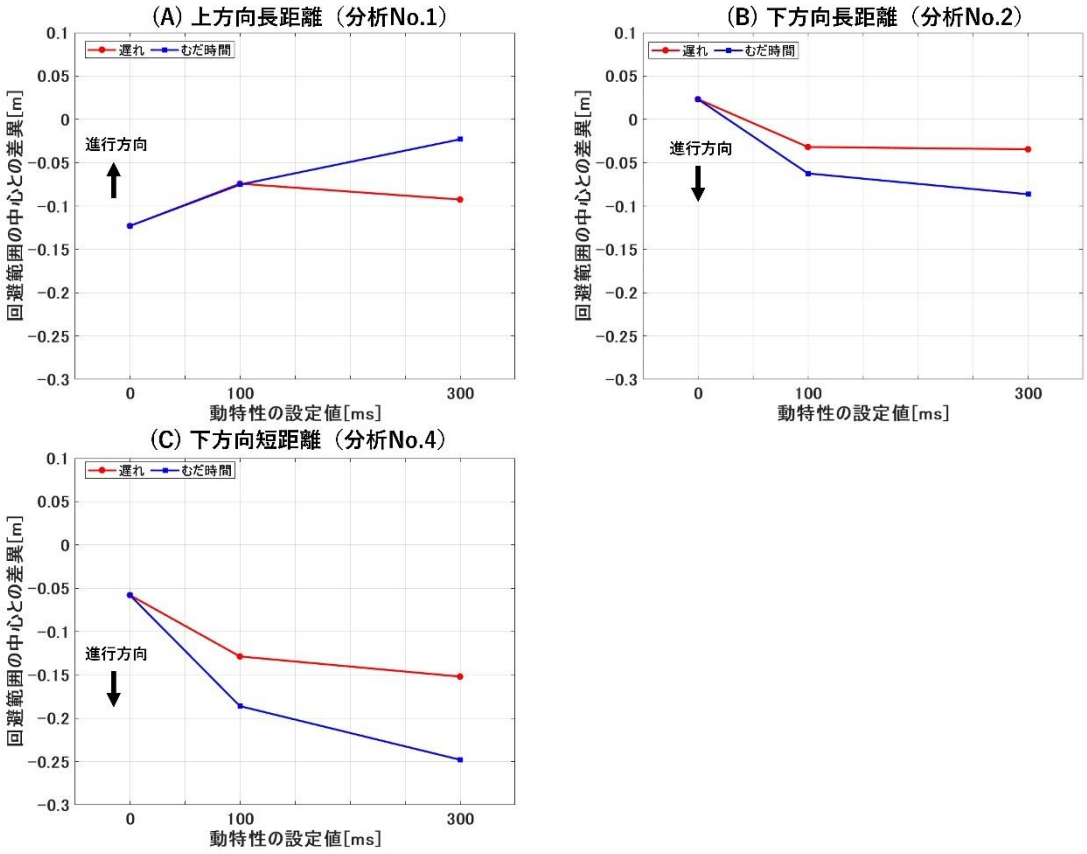


図 3.14 ポジショニング精度と因子 a の主効果

3.3.4　左右操作に関する実験結果

制御対象を左右方向に動かす操作（表 3.4 の Ope-07 から Ope-12）に関する実験結果を，基礎実験（表 3.4 の Ope-07 から Ope-10），油圧ショベル実験（表 3.4 の Ope-11 および Ope-12）の順に以下に示す．

3.3.4.1　左右操作（基礎実験）の実験結果

左右方向にバケットを模した物体を移動させる基礎実験について，実験の概要と結果を以下に示す．

3.3.4.1.a　実験シナリオ

実験課題は，二次元平面上でバケットを模した四角形の物体を左右方向に移動させ，モニタ画面の上部から接近する障害物を避けるものとした．実験で提示した映像の一例を，図 3.15 に示す．制御対象の物体は，上下方向操作と同様に一辺 0.8m の正方形とし，回避する障害物の回避範囲は 2.5m に設定した．その他の設定条件および実験シナリオについても上下方向操作の実験と統一し，3.3.2 節に示した実験方法に準じて実験を実施した．

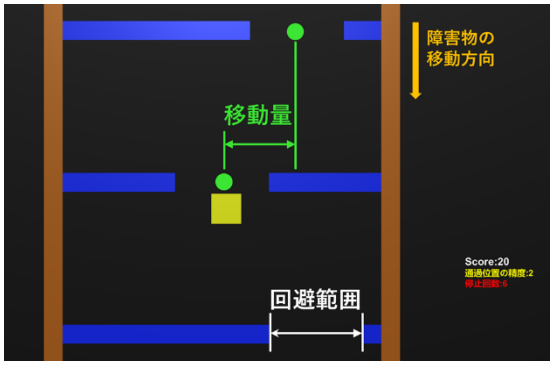


図 3.15 基礎実験（左右方向操作）のモニタ提示映像

3.3.4.1.b　実験結果

上下方向操作の分析と同様に，物体の移動方向（左方向，右方向）および移動距離（長距離，短距離）に基づき，実験データを表 3.12 に示す 4 条件の分析条件に分類し，実験パラメータの操作に対する影響を分析した．具体的には，表 3.6 に示した因子 A から因子 D がレバー操作およびポジショニング精度に与える影響を分散分析により評価した．

表 3.6 に示した因子が移動量に与える影響を評価した結果を，表 3.13 に示す．分析の結果，左右分析 No.1，No.2 および No.4 の条件において因子 A，C および D の交互作用が確認された．なお，因子 A について速度設定の影響を多重比較により評価した結果，速度設定の影響は見られず，因子 A の影響は主に動特性（遅れおよびむだ時間）の違いによるものであった．

表 3.12 左右方向操作の分析条件

左右分析No.	移動方向	移動距離
1	左	長距離
2	右	長距離
3	左	短距離
4	右	短距離

表 3.13 移動量の分散分析結果（左右方向操作）

左右分析No.	因子ACDの交互作用	
1	$F(8,3768) = 3.93, \quad p = 0.0001$	***
2	$F(8,2488) = 2.44, \quad p = 0.0125$	*
3	$F(8,3768) = 1.65, \quad p = 0.1064$	
4	$F(8,3768) = 4.01, \quad p = 0.0001$	**

$* \ p < 0.05 \quad ** \ p < 0.01 \quad *** \ p < 0.001$

左右分析 No.1，No.2，および No.4 について，移動量に対する因子 A，C および D の影響を分析した結果を図 3.16 に示す．すべての分析条件において，PO 区間の方が AP 区間よりも移動量が多かった．左右分析 No.1 では，PO 区間の遅れ 300ms 条件およびむだ時間条件において，基準条件よりも移動量が増加し，むだ時間条件の方が遅れ条件より基準条件との差異が大きかった（図 3.16(A)）．むだ時間 300ms の条件では，ゲームパッドによる操作の方がジョイスティックよりも移動量が増加した．

左右分析 No.2 では，PO 区間のむだ時間条件では基準条件に対して移動量が増加し，むだ時間 100ms 条件ではゲームパッドによる操作の方がジョイスティックよりも移動量が増加する傾向が見られた（図 3.16(B)）．

左右分析 No.4 では，PO 区間の遅れ 100ms 条件とむだ時間条件で基準条件に対して移動量が増加し，むだ時間条件の方が遅れ条件よりも基準条件との差異が大きかった（図 3.16(C)）．AP 区間の移動量についても，むだ時間 300ms 条件で基準条件よりも移動量が増加する傾向が見られた．さらに，他の分析条件と同様にゲームパッドによる操作の方がジョイスティックよりも移動量が増加し，インターフェースの影響が確認された．

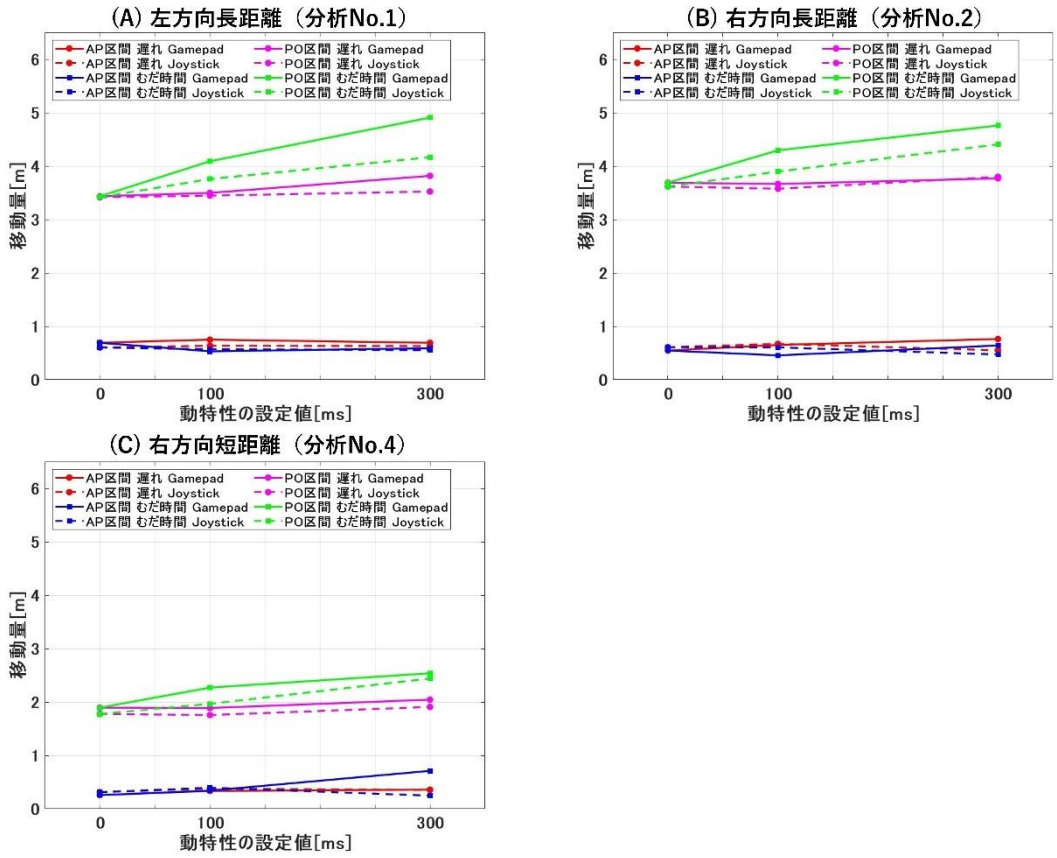


図 3.16 移動量と因子 ACD の交互作用（左右方向操作基礎実験）

次に，左右分析 No.1，No.2，および No.4 において，修正量に対する因子 A，C および D の影響を分析した結果を図 3.17 に示す．分析の結果，すべての条件において，PO 区間のむだ時間 300ms 条件で修正量が最も多くなった．

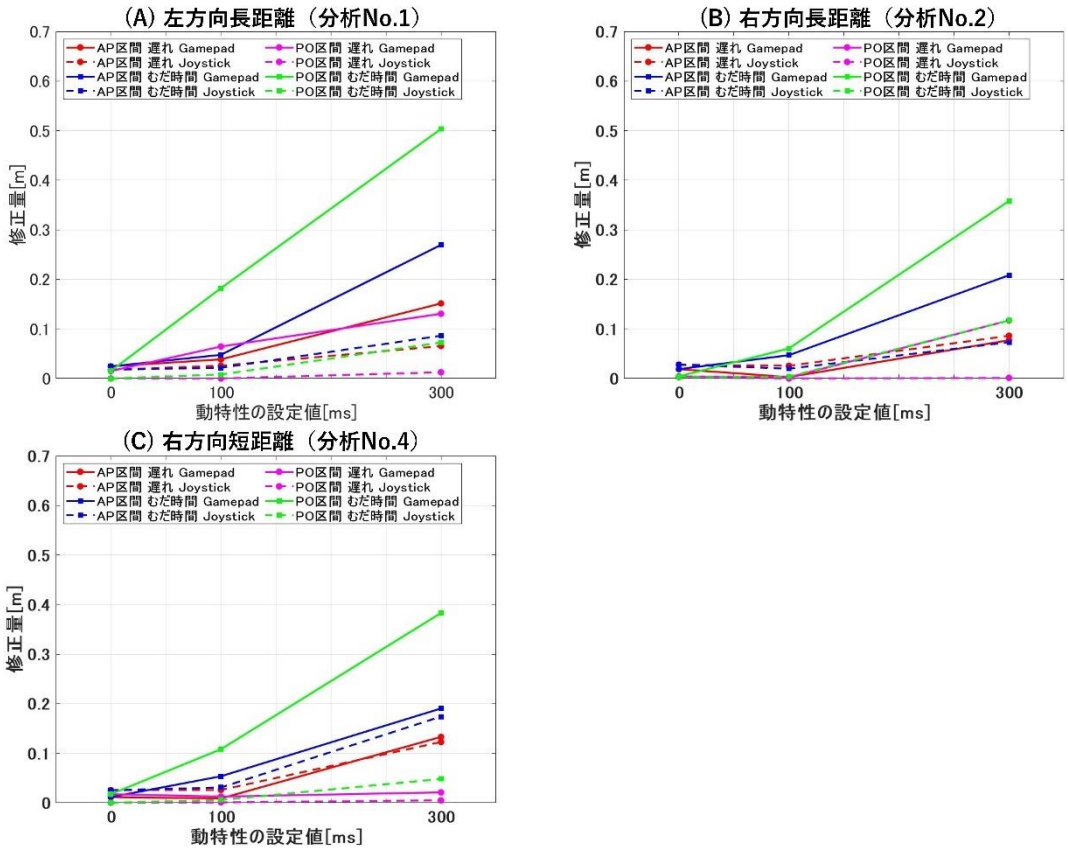


図 3.17 修正量と因子 ACD の交互作用（左右方向操作基礎実験）

左右分析 No.4 においては，因子 A，B および C の交互作用も確認された（$F(8,3768) = 1.94,\quad p = 0.0498$）．移動量に対する因子 A，B および C の影響を評価した結果を図 3.18 に示す．むだ時間 300ms で左手による操作を行った場合に，ゲームパッドによる操作の方がジョイスティックよりも移動量が増加した．

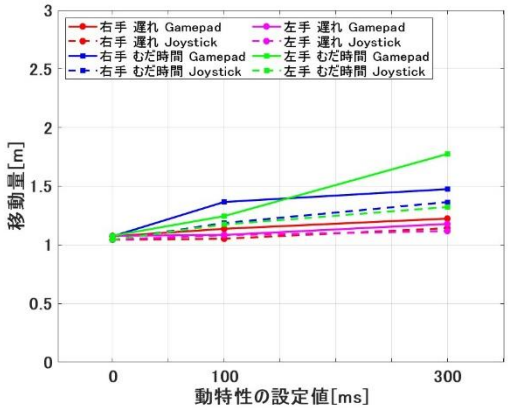


図 3.18 移動量と因子 ABC の交互作用（基礎実験 左右分析 No.4）

さらに，左右分析 No.3 では，因子 A から因子 D のすべての因子について交互作用が確認された（$F(8,3768) = 2.3, \quad p = 0.0188$）．因子数が多いため，因子 D（移動区間の差異）の観点で AP 区間と PO 区間にデータを分けてプロットした（図 3.19）．本分析条件においても，AP 区間（図 3.19(A)）よりも PO 区間（図 3.19(B)）の移動量が多かった．PO 区間の遅れ 100ms 条件とむだ時間条件で基準条件よりも移動量が増加し，むだ時間条件の方が遅れ条件よりも基準条件との差異が大きかった．また，PO 区間のむだ時間条件では，ゲームパッドによる操作の方がジョイスティックよりも移動量が増加する傾向が見られた．さらに，ゲームパッドを用いた条件では操作する手の左右差の影響も見られ，左手による操作の方が右手による操作よりも移動量が多かった．

主に PO 区間で移動量に対する因子 A から D の影響が確認されたことから，PO 区間の修正量に対する各因子の影響も分析した（図 3.20）．その結果，むだ時間 300ms 条件でゲームパッドを左手で操作した場合に，修正量が最も多くなることが明らかになった．

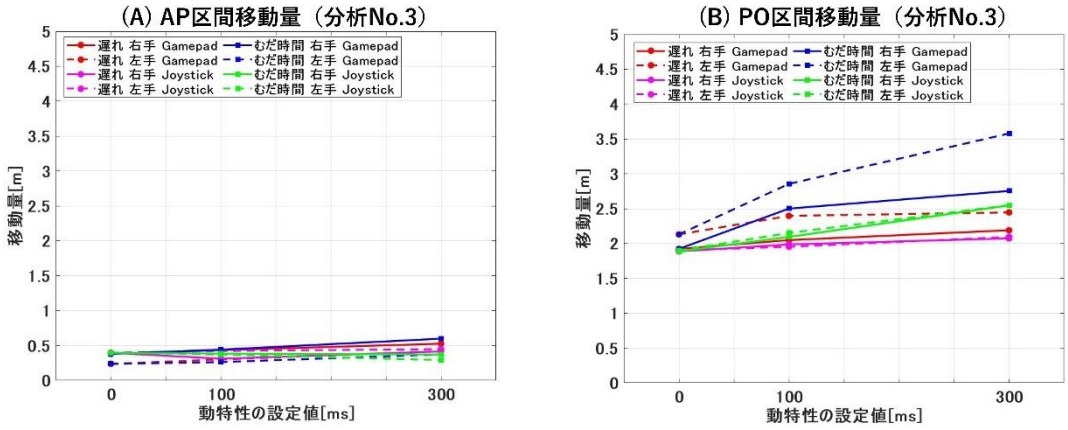


図 3.19 移動量と因子 ABCD の交互作用（基礎実験 左右分析 No.3）

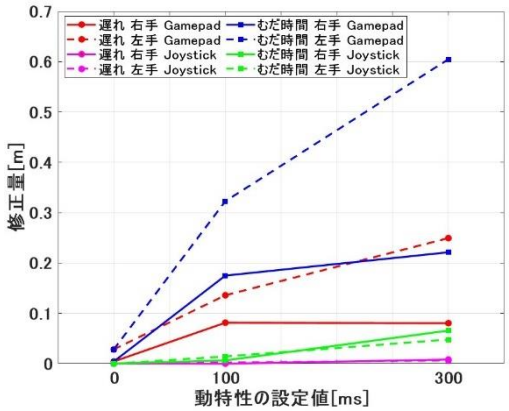


図 3.20 PO 区間の修正量と因子 ABCD の交互作用（基礎実験 左右分析 No.3）

次に，ポジショニング精度について，因子 A，B および C の影響を分散分析により評価した．その結果，すべての分析条件において因子 A の主効果が確認された（表 3.14）．

表 3.14 ポジショニング精度の分散分析結果（左右方向操作）

左右分析No.	因子Aの主効果		
1	$F(8,1884) = 9.14,$	$p = 0.0000$	***
2	$F(8,1244) = 4.48,$	$p = 0.0000$	***
3	$F(8,1884) = 5.73,$	$p = 0.0000$	***
4	$F(8,1884) = 2.31,$	$p = 0.0181$	**

$*\ p < 0.05$　　$**\ p < 0.01$　　$***\ p < 0.001$

ポジショニング精度に対する因子 A の影響を分析した結果を，図 3.21 に示す．左右分析 No.1(図 3.21(A))および No.3(図 3.21(C))では，物体を左方向に移動させたため，縦軸の負の値が進行方向を示す．左右分析 No.1 では，遅れ条件およびむだ時間 300ms 条件で目標位置（基準条件）との差異が見られ，むだ時間条件の方が遅れ条件よりも目標位置との差異が大きく，ポジショニング精度が悪化した．左右分析 No.3 においても，むだ時間 300ms の条件で左右分析 No.1 と同様の結果が得られた．

一方，左右分析 No.2(図 3.21(B))および No.4(図 3.21(D))では進行方向が逆転するため，縦軸の正の値が進行方向を示す．左右分析 No.2 においても，むだ時間 300ms 条件で目標位置との差異が大きく，ポジショニング精度が悪化した．左右分析 No.4 については，分散分析により因子 A の影響が見られたが，多重比較の結果から因子 A の影響はないことが確認された．

さらに，すべての条件において，遅れ条件では目標位置よりも手前で物体を停止させる傾向があるのに対し，むだ時間条件では目標位置を大幅に超過して停止する傾向が見られた．

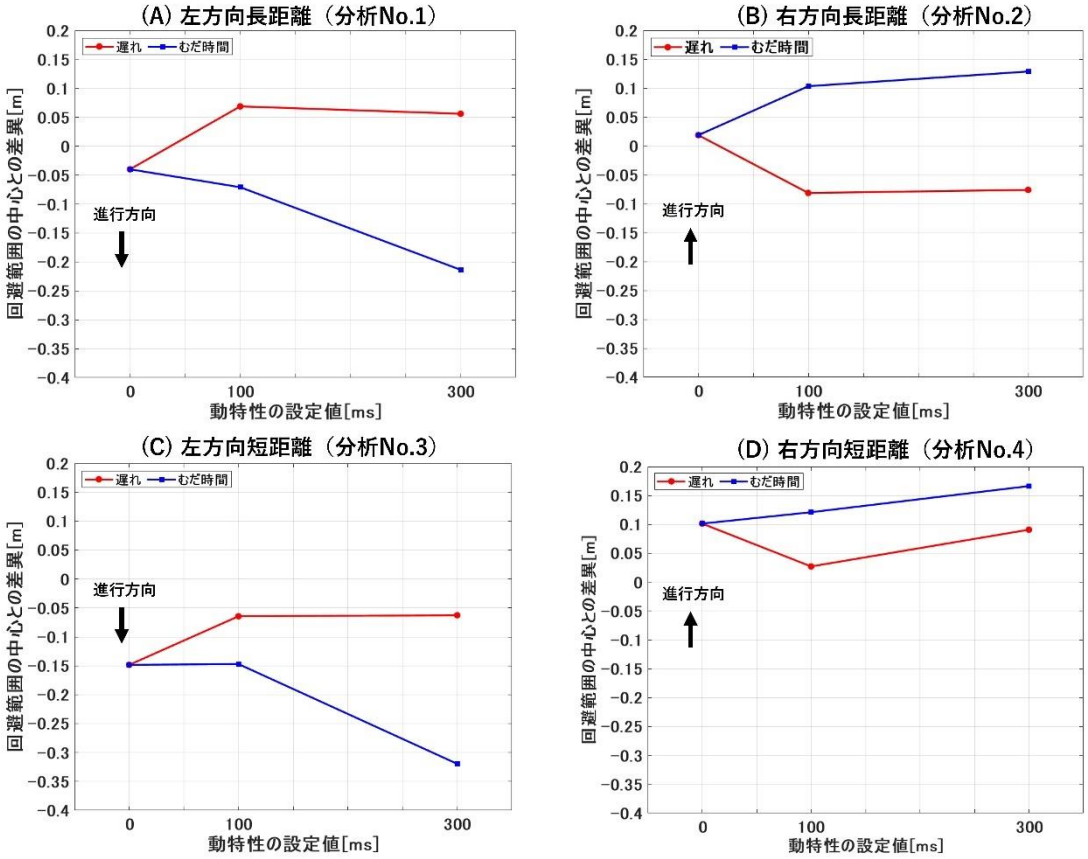


図 3.21 ポジショニング精度と因子 A の主効果（左右方向操作基礎実験）

3.3.4.2　旋回操作（油圧ショベル実験）の実験結果

旋回単独操作を対象とした油圧ショベル実験について，実験の概要と結果を以下に示す．

3.3.4.2.a　実験シナリオ

実験課題は，油圧ショベルの旋回単独操作によりバケットを左右方向へ移動させ，モニタ画面の上部から接近する障害物にバケットが接触しないように回避するものとした．実験で提示した映像の一例を，図 3.22 に示す．作業機の姿勢は，アームシリンダが最縮の状態とした．障害物の回避範囲は，ブーム単独操作の実験と同様に 4.0m とした．被験者には，回避範囲の中心にバケットの中心を一致させるようにポジショニ

ング操作を指示した．その他の設定条件および実験シナリオは基礎実験と統一し，3.3.2 節に示した実験方法に準じて実験を実施した．

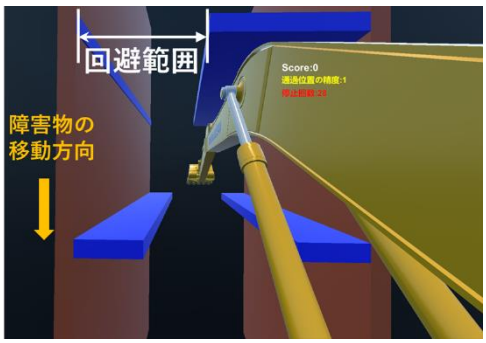


図 3.22 油圧ショベル実験（旋回）のモニタ提示映像

3.3.4.2.b　実験結果

油圧ショベル実験においても，実験データを表 3.12 の分析条件に分けて，基礎実験と同様の観点で分析を行った．移動量に対する表 3.9 の因子の影響を分散分析により評価した結果，すべての分析条件において因子 a および d の交互作用が確認された（表 3.15）．

表 3.15 移動量における因子 ad の交互作用（旋回）

左右分析No.	因子adの交互作用	
1	$F(4,1880) = 19.86,\quad p = 0.0000$	***
2	$F(4,1240) = 5.97,\quad p = 0.0001$	***
3	$F(4,1880) = 10.39,\quad p = 0.0000$	***
4	$F(4,1880) = 9.66,\quad p = 0.0000$	***

$*\ p < 0.05$　　$**\ p < 0.01$　　$***\ p < 0.001$

各分析条件で因子 a および d の影響を評価した結果を，図 3.23 に示す．すべての分析条件で，PO 区間の移動量が AP 区間よりも少なく，基礎実験とは相反する結果となった．また，遅れ条件およびむだ時間条件では基準条件よりも移動量が増加し，むだ時間条件の方が基準条件との差異が大きかった．

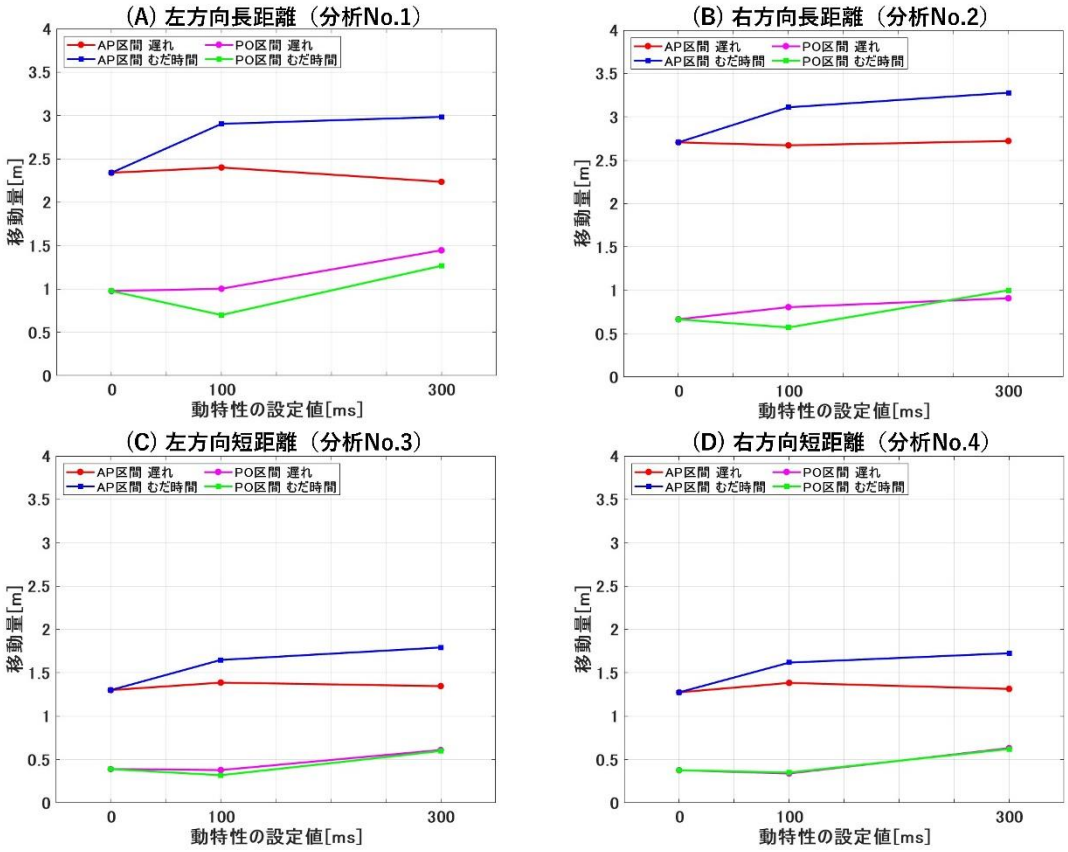


図 3.23 移動量と因子 ad の交互作用（旋回単独操作）

次に，各分析条件における因子 a および d の修正量に対する影響評価の結果を，図 3.24 に示す．分析の結果，すべての分析条件において PO 区間のむだ時間 300ms 条件で修正量が最も多くなる結果が得られた．

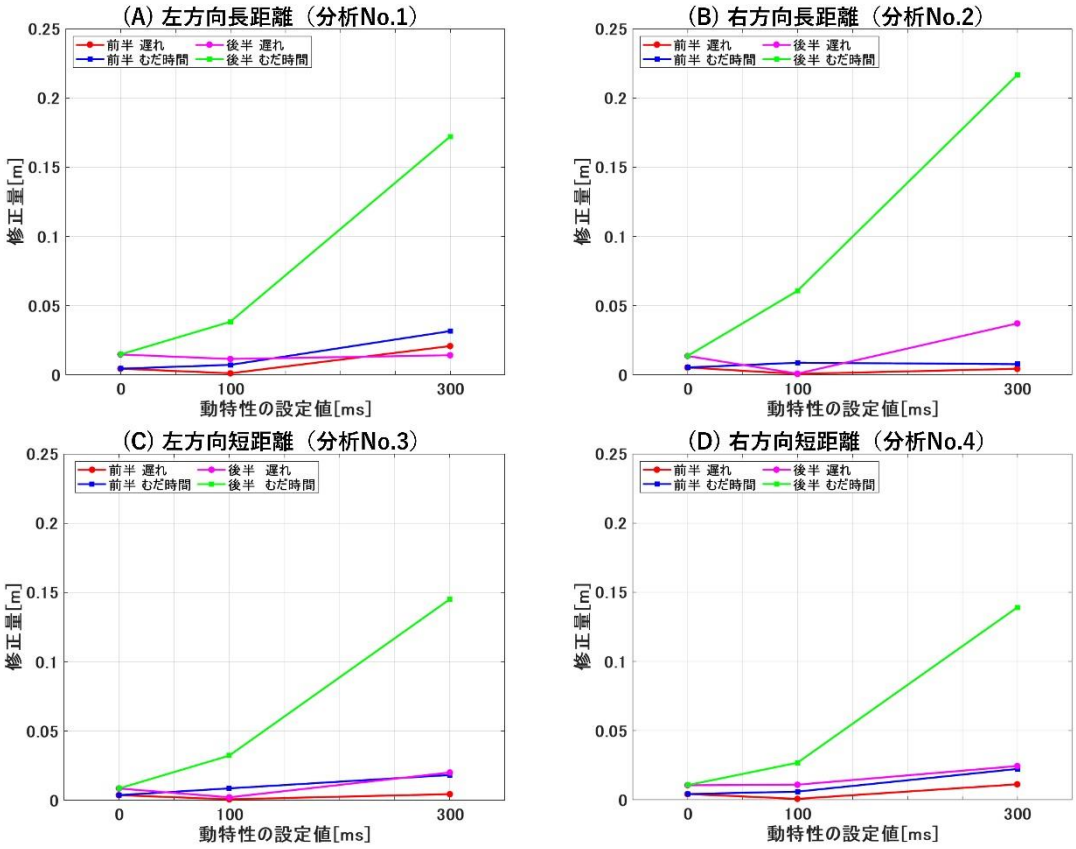


図 3.24 修正量と因子 ad の交互作用（旋回単独操作）

さらに，すべての分析条件において，移動量に対する因子 c および d の交互作用が確認された（表 3.16）．移動量に対する因子 c および d の影響を評価した結果を，図 3.25 に示す．すべての分析条件において，左手による操作の方が右手による操作よりも AP 区間の移動量が多くなり，PO 区間の移動量は左手による操作の方が右手による操作よりも少なくなった．

表 3.16 移動量における因子 cd の交互作用（旋回）

左右分析No.	因子cdの交互作用	
1	$F(1,1880) = 19.48,\quad p = 0.0000$	***
2	$F(1,1240) = 12.18,\quad p = 0.0005$	***
3	$F(1,1880) = 28.28,\quad p = 0.0000$	***
4	$F(1,1880) = 5.07,\quad p = 0.0000$	***

$*\ p < 0.05$　　$**\ p < 0.01$　　$***\ p < 0.001$

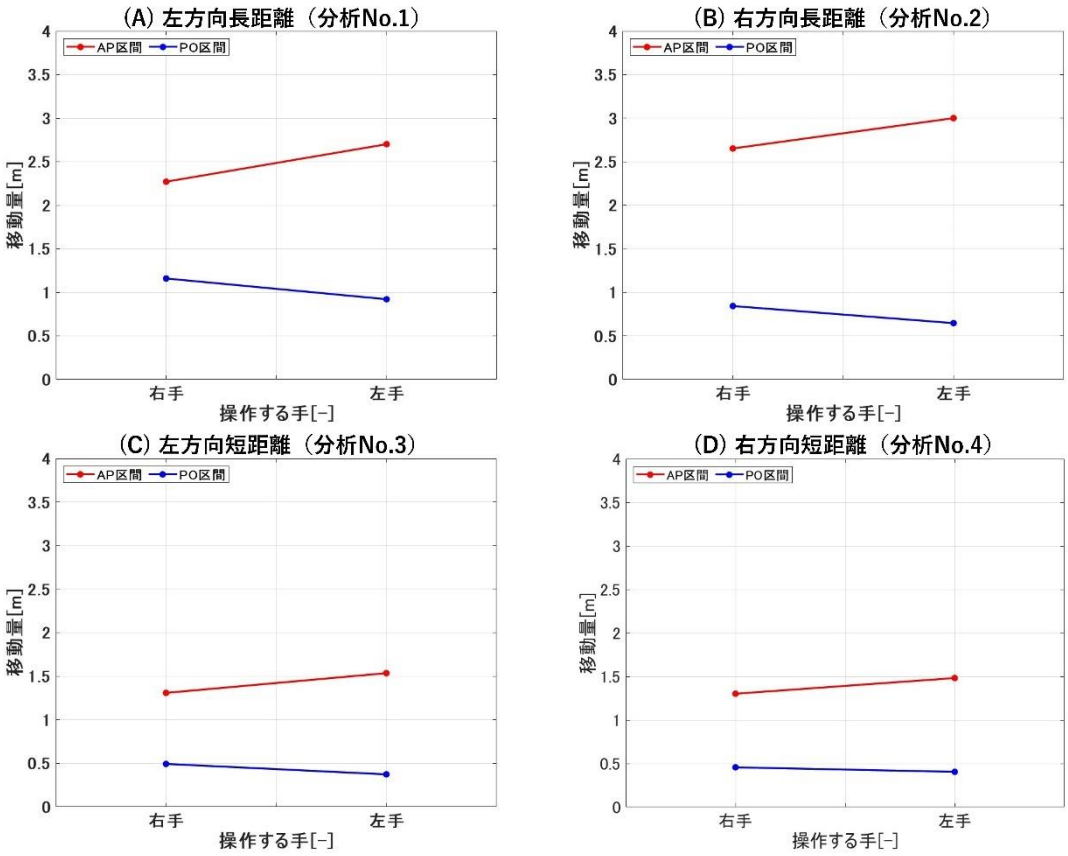


図 3.25 移動量と因子 cd の交互作用（旋回単独操作）

また，左右分析 No.1 では，移動量に対する因子 b および d の交互作用も確認された（$F(1,1880) = 36.71,\quad p = 0.0000$）．因子 b および d の移動量に対する影響を評価した結果を，図 3.26 に示す．旋回速度が高速の条件では，標準条件と比較して AP 区間の移動量が多く，PO 区間では高速条件の方が標準条件より移動量が少なくなった．

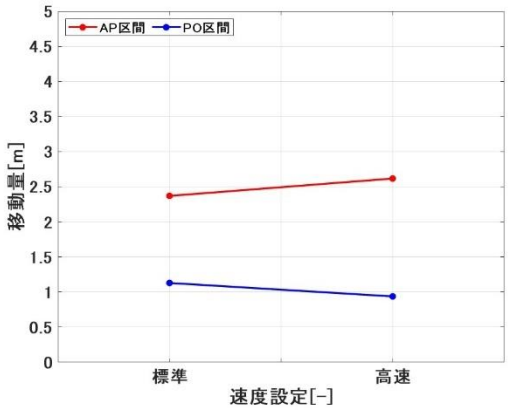


図 3.26 移動量と因子 bd の交互作用（旋回単独操作 左右分析 No.1）

次に，ポジショニング精度に対する因子 a，b および c の影響を分散分析により評価した．その結果，すべての分析条件で因子 a の主効果が見られた（表 3.17）．

ポジショニング精度に対する因子 a の影響を評価した結果を，図 3.27 に示す．左右分析 No.1（図 3.27(A)）および左右分析 No.3（図 3.27(C)）では縦軸の負の値が進行方向を示し，左右分析 No.2（図 3.27(B)）および左右分析 No.4（図 3.27(D)）では縦軸の正の値が進行方向を示す．移動距離が長距離となる左右分析 No.1 および No.2 では，遅れ 300ms 条件とむだ時間条件で目標位置（基準条件）との差異が確認された．一方，移動量が短距離となる左右分析 No.3 および No.4 では，遅れ 300ms 条件とむだ時間 300ms 条件で目標位置との差異が見られた．

さらに，すべての分析条件において，遅れ条件およびむだ時間条件の両方で目標位置を超過して停止する傾向が見られた．しかし，目標位置との差異はむだ時間条件の方が遅れ条件よりも大きく，ポジショニング精度が悪化する結果となった．

表 3.17 ポジショニング精度の分散分析結果（旋回）

左右分析No.	因子aの主効果		
1	$F(4,940) = 27.66,$	$p = 0.0000$	***
2	$F(4,620) = 28.35,$	$p = 0.0000$	***
3	$F(4,940) = 28.28,$	$p = 0.0000$	***
4	$F(4,940) = 11.28,$	$p = 0.0000$	***

$* \ p < 0.05$　　$** \ p < 0.01$　　$*** \ p < 0.001$

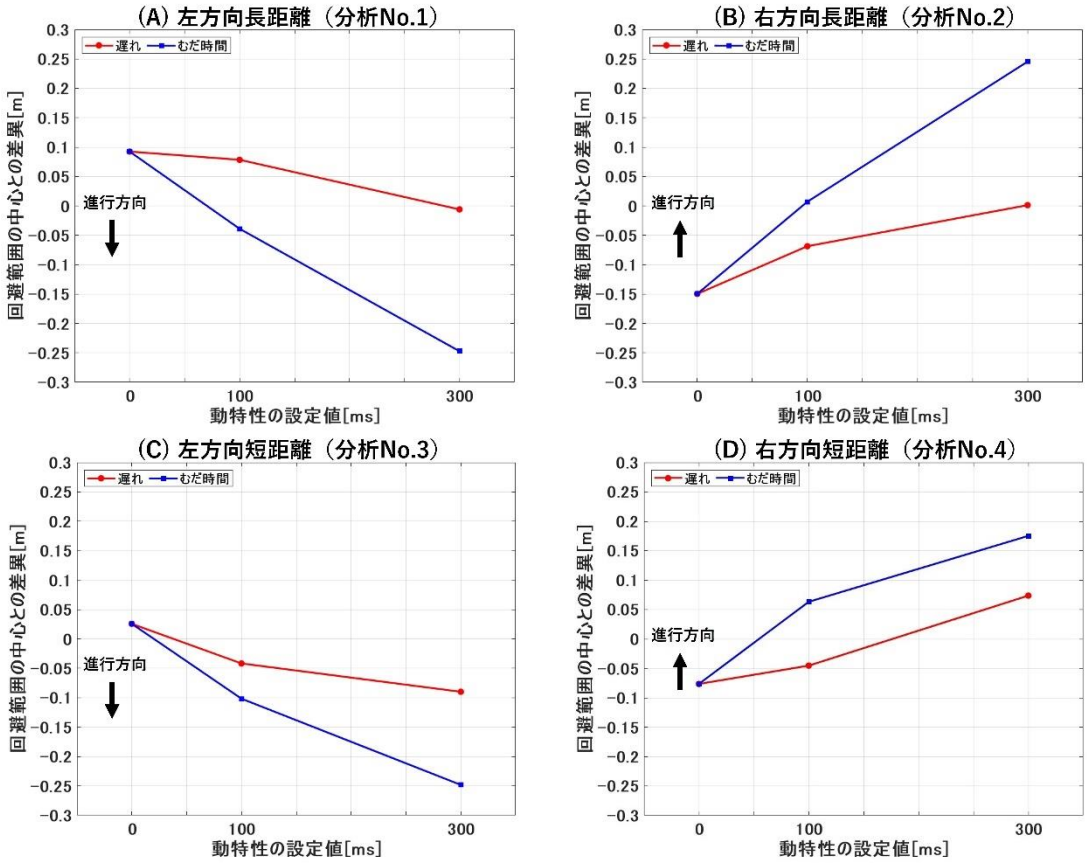


図 3.27 ポジショニング操作と因子 a の主効果（旋回単独操作）

3.3.5 実験 1 の考察

実験 1 の考察について，まず上下方向操作と左右方向操作のそれぞれの結果に対する考察を述べ，最後に総合考察を述べる．

3.3.5.1 上下方向操作を対象とした実験結果の考察

制御対象を上下方向に移動させる基礎実験およびブーム単独操作を対象とした油圧ショベル実験の結果に対する考察を，以下に示す．

移動量に関する考察

基礎実験では AP 区間よりも PO 区間の移動量が多かったのに対し，油圧ショベル実験では AP 区間の方が PO 区間よりも移動量が多かった．このことから，操作に関する判断や実際の操作が，基礎実験では主に PO 区間で行われているのに対し，油圧ショベル実験では AP 区間に偏り，PO 区間におけるポジショニング操作を慎重に行っ

たことが示唆された．ポジショニングにおける慎重な停止操作は，油圧ショベルの作業機の視覚的な重量感が要因となったと考えられる．作業機が与える視覚効果については今後さらなる検証が必要であるが，基礎実験と油圧ショベル実験の操作を比較した結果，視覚情報が操作に影響することが明らかとなった．

動特性（遅れとむだ時間）の影響

基礎実験および油圧ショベル実験において，むだ時間条件では基準条件よりも移動量が増加し，その差異は遅れ条件よりも大きくなる傾向が見られた．修正量についても，むだ時間 300ms 条件で修正量が最も多かった．これは，むだ時間が大きくなったことで操作入力と制御対象の動き出しのズレが大きくなり，むだ時間を考慮した操作が困難になったことから修正操作が増加し，移動量および修正量が増加したと考えられる．ポジショニング精度についても，むだ時間が大きくなると目標位置との差異が大きくなり，精度が悪化した．被験者へのアンケート結果（表 3.18，表 3.19）においても，むだ時間 300ms の条件が最も操作性評価が低く，これは修正操作の増加とポジショニング精度の悪化が要因になったと考えられる．これらの結果から，むだ時間が操作に影響する官能要因であることが明らかとなった．

表 3.18 基礎実験のアンケート結果（上下）

入力 インタフェース	操作する手	むだ時間 100[ms]	むだ時間 300[ms]	遅れ 100[ms]	遅れ 300[ms]
Gamepad	右手	2.62	1.90	2.73	2.43
Gamepad	左手	2.83	1.95	3.47	2.89
Joystick	右手	3.03	2.75	3.08	3.06
Joystick	左手	2.78	2.44	3.44	2.80

表 3.19 油圧ショベル実験のアンケート結果（ブーム）

入力 インタフェース	操作する手	むだ時間 100[ms]	むだ時間 300[ms]	遅れ 100[ms]	遅れ 300[ms]
Joystick	右手	2.76	2.42	2.78	2.81
Joystick	左手	2.71	2.50	2.99	2.62

インターフェースの影響

基礎実験において，長距離を移動する条件でむだ時間が大きくなると，ゲームパッドの方がジョイスティックよりも移動量および修正量が増加する傾向が見られた．こ

れは，ゲームパッドとジョイスティックの操作特性の違いによるものと考えられる．ゲームパッドのスティックは指で操作するため，素早い操作入力が可能だが，指の可動域が狭いためスティックをわずかに傾けただけで入力が大きく変化し，微調整が難しくなる．一方，ジョイスティックは腕全体で操作するため，即座に入力を変更することは難しいが，腕を起点とする広い可動域により微調整が容易である．よって，長距離移動の条件では操作入力が大きくなるため，ゲームパッドでは小さな操作変化が速度の大きな変動に繋がり，ポジショニングにおいて修正操作が増加したと考えられる．被験者へのアンケート結果（表 3.18）においても，ゲームパッドの方がジョイスティックよりも操作性評価が低くなる傾向が見られ，これはゲームパッドによる操作で修正操作が増加したことが要因である．以上より，基礎実験の結果から，インターフェースが操作に影響することが明らかになった．

アンケート結果に関する考察

基礎実験のアンケート結果において評価が 3 以上であり，基準条件相当，もしくはそれ以上に操作しやすいという評価結果が得られた（表 3.18）．これらの条件では，PO 区間の修正量が基準条件と同程度になる傾向が見られたことから，基準条件に近い操作感であったと考えられる．さらに，遅れ 100ms の条件では基準条件よりも操作性が良いと評価されたが，これはポジショニング操作においてその特性を加味した停止操作が容易であったことが影響した可能性がある．むだ時間や遅れがない基準条件では目標位置で即座に停止操作を行わなければならないのに対して，遅れやむだ時間を含む条件は，その動特性を想定して停止位置よりも手前で停止操作を行う．その際に，遅れ 100ms は特性を加味した停止操作が容易であり，基準条件のような目標位置付近での急操作も必要としないことが影響したと考えられる．このことから，基礎実験のように簡易な物体を操作する場合，わずかな遅れを持たせることで操作性が向上する可能性が示唆された．

一方，油圧ショベル実験では基準条件を超えるアンケート結果はみられなかった（表 3.19）．遅れ 100ms の条件では，PO 区間の修正量が基準条件よりも少なくなる傾向が見られたが，アンケート結果では基準条件よりも低い評価となった．これは，修正量などの操作結果よりも視覚情報が影響した可能性がある．基礎実験では四角い物体を動作させるのに対して油圧ショベル実験では作業機という非常に大きな構造物

が動くため，被験者には基礎実験と比較すると制御対象の動きが緩慢に見える．加えて，動的な特性によりさらに緩慢さが増したことが操作のしづらさにつながったと考えられる．このことから，油圧ショベルのような大きな構造物を操作する場合は，遅れなどの動特性が操作感を悪化させる可能性が示唆された．

3.3.5.2　左右方向操作を対象とした実験結果の考察

制御対象を左右方向に移動させる基礎実験および旋回単独操作を対象とした油圧ショベル実験の結果に対する考察を，以下に示す．

移動量に関する考察

上下方向操作と同様に，基礎実験では AP 区間よりも PO 区間の移動量が多く，油圧ショベル実験では AP 区間の移動量の方が PO 区間よりも多かった．これは，3.3.5.1 節にも述べたとおり，作業機の視覚的な重量感が操作に影響し，PO 区間で慎重なポジショニング操作が促されたためだと考えられる．よって，左右方向操作においても，視覚情報が操作に影響することが明らかになった．

動特性（遅れとむだ時間）の影響

上下方向の操作と同様に，基礎実験および油圧ショベル実験において，むだ時間条件では基準条件よりも移動量が増加し，その差異は遅れ条件よりも大きくなる傾向が確認された．修正量についても，むだ時間 300ms 条件で修正量が最も多くなった．これは，3.3.5.1 節にも述べたとおり，むだ時間への対処が難しく，修正操作が増加したことが原因であると考えられる．ポジショニング精度についても，むだ時間が大きくなると目標位置との差異が増大し，精度が悪化した．さらに，アンケート結果（表 3.20，表 3.21）でも，むだ時間 300ms の条件で最も操作性評価が低く，これは修正操作の増加とポジショニング精度の悪化が要因になったと考えられる．したがって，左右方向操作においてもむだ時間が操作に影響する官能要因であることが明らかとなった．

表 3.20 基礎実験のアンケート結果（左右）

入力 インタフェース	操作する手	むだ時間 100[ms]	むだ時間 300[ms]	遅れ 100[ms]	遅れ 300[ms]
Gamepad	右手	2.27	1.73	2.81	2.40
Gamepad	左手	2.50	1.77	2.82	2.36
Joystick	右手	2.99	2.07	3.19	2.59
Joystick	左手	2.71	2.21	3.32	2.55

表 3.21 油圧ショベル実験のアンケート結果（旋回）

入力 インタフェース	操作する手	むだ時間 100[ms]	むだ時間 300[ms]	遅れ 100[ms]	遅れ 300[ms]
Joystick	右手	2.97	1.92	2.92	2.62
Joystick	左手	2.82	2.04	3.07	3.08

インターフェースの影響

基礎実験において，むだ時間が大きくなると，ゲームパッドの方がジョイスティックよりも移動量および修正量が多くなる傾向が見られた．これは，上下方向操作と同様に，ゲームパッドとジョイスティックの操作特性の違いにより，ゲームパッドでは修正操作が増加したためだと考えられる．被験者へのアンケート結果（表 3.20）においても，ゲームパッドの方がジョイスティックよりも操作性評価が低くなる傾向が見られ，ゲームパッドによる操作で修正操作が増加したことが要因である．以上より，左右方向操作の基礎実験においても，インターフェースが操作に影響することが明らかになった．

操作する手の左右差の影響

基礎実験における短距離移動条件で，左手による操作の方が右手による操作よりも AP 区間の移動量が多く，PO 区間の移動量が少なかった．油圧ショベル実験においてもすべての分析条件で，基礎実験と同様の結果が得られた．これは利き手の影響が考えられるが，本実験では被験者 10 名中 9 名が右利きであったため，今後は左利きの被験者を増やし，利き手の違いによる影響を検証する必要がある．

速度感の影響

油圧ショベル実験において，左方向への長距離移動の条件で速度設定の影響が見られた．高速条件の方が標準条件よりも AP 区間の移動量が多く，PO 区間の移動量が少なかった．一方，右方向に移動する条件では影響がなかったことから，油圧ショベル特有の視界性の左右差が速度感覚に影響したと考えられる．よって，視界性の左右差が速度感覚に与える影響については今後検証が必要である．

アンケート結果に関する考察

基礎実験のアンケート結果において，遅れ 100ms 条件でジョイスティックによる操作を行った場合に，基準条件よりも操作性が高く評価された（表 3.20）．これは修正量が基準条件と同程度であったことに加え，上下方向の操作と同様に停止操作に余裕があり，動的な遅れを予測した停止操作が容易であったためだと考えられる．一方，遅れ 300ms は基準条件よりも評価が低かったことから，100ms 程度が適度な遅れ要素であることが示唆された．

油圧ショベル実験においては，遅れ条件で基準条件に近い評価結果が得られた（表 3.21）．これは，遅れ条件では修正量を基準条件と同程度に抑えられたことによると考えられる．このことから，ブーム操作の結果と比較すると，旋回操作においては制御対象が油圧ショベルのような大きな構造物であっても，遅れに対する違和感が少ないことが明らかとなった．以上より，基礎実験のように簡易な物体を操作する条件では，適度な遅れを有することで操作性が良くなる場合があり，油圧ショベルの旋回操作においても，遅れは操作感を悪化させにくいことが示唆された．

3.3.5.3　総合考察

上下方向操作および左右方向操作に関する総合考察を，以下に述べる．

それぞれの操作条件における主な考察結果を，表 3.22 および表 3.23 に示す．これらの結果から，オペレータの操作にはむだ時間が大きく影響しており，操作性に影響する官能要因であることが明らかとなった．一般的に，むだ時間が操作性に影響することが知られているが，本実験により油圧ショベルの操作におけるむだ時間の影響を，実験データとアンケートによる主観評価の両面から明確に示すことができた．

さらに，基礎実験と油圧ショベル実験の比較により，視覚情報が操作に影響することが明らかになった．具体的には，油圧ショベルの作業機が視覚的に与える重量感に

より，PO 区間で慎重なポジショニング操作が行われたと考えられる．また，旋回操作のように左右方向に制御対象を移動させる条件では，油圧ショベル特有の視界性の左右差も影響することが示唆された．視覚情報と操作の関係性については今後さらなる検証が必要であるが，視覚情報はむだ時間と同様に操作に大きく影響する官能要因であることが明らかとなった．

基礎実験に限定される結果であるが，インターフェースが操作に影響することも確認された．インターフェースの操作特性が影響したと考えられることから，油圧ショベルの操作においてもインターフェースを変更する際には，操作特性の影響を考慮する必要があることが示唆された．

左右方向の操作においては操作する手の左右差の影響も確認された．利き手に起因する影響かどうかは今後検証が必要であるが，現状では油圧ショベルの旋回操作は左手に割り当てられているため，割り当ての変更が生じる場合には操作性への影響を考慮した設計検討が求められる．

表 3.22 上下方向操作の考察まとめ

影響因子	結果		考察
	基礎実験	油圧ショベル実験	
移動区間の差異	AP区間よりもPO区間の方が移動量が多い	AP区間よりもPO区間の方が移動量が少ない	油圧ショベルの**視覚的な重量感**により，慎重なポジショニング操作となった
動特性の影響	むだ時間条件の方が遅れ条件よりも，移動量と修正量が基準条件に対して増加した		**むだ時間**を考慮した操作が困難であったため，修正操作が増加し，ポジショニング精度も悪化した
	むだ時間条件では，ポジショニング精度が悪化する傾向が見られた		
インターフェースの差異	ゲームパッドの方がジョイスティックよりも，移動量と修正量が基準条件に対して増加した		ゲームパッドのスティックは可動域が狭いため，微調整が難しく移動量が増加した

表 3.23 左右方向操作の考察まとめ

影響因子	結果		考察
	基礎実験	油圧ショベル実験	
移動区間の差異	AP区間よりもPO区間の方が移動量が多い	AP区間よりもPO区間の方が移動量が少ない	油圧ショベルの**視覚的な重量感**により，慎重なポジショニング操作となった
動特性の影響	むだ時間条件の方が遅れ条件よりも，移動量と修正量が基準条件に対して増加した		**むだ時間**を考慮した操作が困難であったため，修正操作が増加し，ポジショニング精度も悪化した
	むだ時間条件では，ポジショニング精度が悪化する傾向が見られた		
インターフェースの差異	ゲームパッドの方がジョイスティックよりも，移動量と修正量が基準条件に対して増加した		ゲームパッドのスティックは可動域が狭いため，微調整が難しく移動量が増加した
操作する手の左右差	左手による操作と右手による操作で，AP区間とPO区間の移動量の分布に差異が見られた		被験者の利き手の影響が考えられる
速度感の影響	影響なし	左旋回のみ，AP区間とPO区間の移動量の分布に差異が見られた	右旋回では影響が見られなかったことから，油圧ショベルの**視界性の左右差**が影響したと考えらえる

3.4　実験 2 複合操作を対象とした官能要因の抽出実験

本節では，油圧ショベルの複合操作に影響する官能要因の抽出を目的とした実験について，その概要および結果を述べる．実験 1 の結果から，むだ時間と視覚情報が単軸操作に影響することが明らかとなった．そこで，実験 2 として複合操作に対するむだ時間および視覚情報の影響を評価することとした．

複合操作の実験では，すきとり操作を対象とした．すきとり操作とは，ブームとアームを同時に操作し，バケットの刃先を地面に沿って水平に動作させることで整地する操作である（図 3.3）．アームのみを操作するとバケットの刃先が円弧を描くように動作してしまうため，刃先を水平に動かすことができない（図 3.28）．そこで，ブームも同時に操作し，刃先の垂直位置を調整することで刃先を水平に動作させている．

実験 2 では，実験 2-1 においてむだ時間の影響を評価し，実験 2-2 において視覚情報の影響を評価した．それぞれの実験については，3.4.1 節および 3.4.2 節に概要と結果を示す．

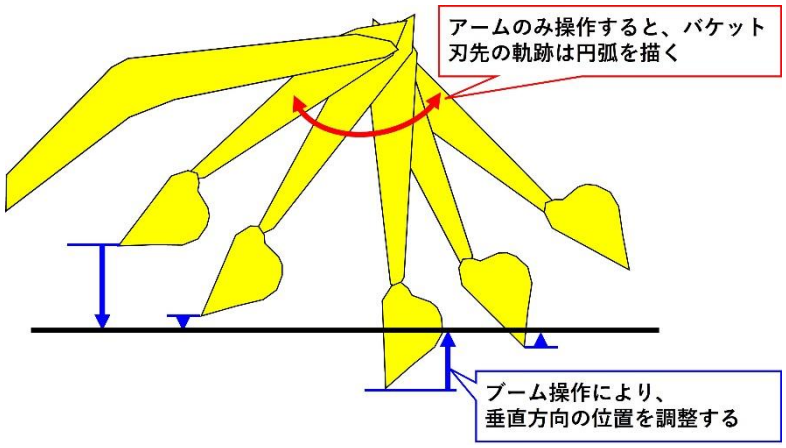


図 3.28 すきとり操作の概要

3.4.1　実験 2-1 複合操作におけるむだ時間の影響評価

すきとり操作に対するむだ時間の影響評価を目的とした実験について，その概要と結果を以下に示す．

3.4.1.1　実験条件

本実験では，すきとり操作に対するむだ時間の影響を評価するために，むだ時間条件，遅れ条件およびむだ時間も遅れも含まない条件の 3 条件を比較した．よって，す

きとり操作はブームとアームの複合操作であることから，レバー入力に対するブームシリンダおよびアームシリンダの動特性について，①むだ時間および遅れがない条件，②遅れのみ 100ms 有する条件，③むだ時間のみ 100ms 有する条件の 3 条件で実験を行った（表 3.24）．また，各実験条件における操作感についてオペレータへのインタビューも行い，オペレータの主観的な操作感に関するデータも取得した．

表 3.24 実験条件

実験 No.	ブームシリンダ特性		アームシリンダ特性	
	遅れ[ms]	むだ時間[ms]	遅れ[ms]	むだ時間[ms]
1	0	0	0	0
2	100	0	100	0
3	0	100	0	100

3.4.1.2　実験装置

本実験では，実機ではなく油圧ショベルのシミュレータを用いて実験を行った（図 3.29）．被験者は HMD（Oculus Rift CV1）を装着し，VR 環境で疑似的に油圧ショベルを操作した．油圧ショベルのモデルは一般的な中型ショベルを模擬しており，被験者は搭乗時と同じ視点で操作できるシステムとなっている（図 3.30）．

実験に使用したコンピュータの CPU は Xeon Gold 6128（3.4 GHz）で，メモリは 256GB を搭載したものを使用した．モニタのフレームレートは 60Hz に設定した．入力インターフェースは，一般的な油圧ショベルを参考にしてゲーム用ジョイスティックを採用した．左右にジョイスティックを設置し，実機と同様に右レバーの上下はブーム操作，左右はバケット操作，左レバーの上下はアーム操作，左右は旋回操作に対応させた．本実験ではブームとアームの操作に被験者が集中できるように，ブーム操作とアーム操作のみ有効となるように設定した．



図 3.29 シミュレータ操作風景



図 3.30 オペ席視点の映像

3.4.1.3　実験方法

被験者にはシミュレータ上で複数回すきとり操作を行わせ，被験者自身がバケットの刃先を目標面である地面に対して水平に動かすことができたと判断した後，数回すきとり操作をしたところで実験を終了した．これは，データ分析において安定した被験者の操作データを用いるためである．なお，被験者は建設機械の運転資格を有しており，数回の油圧ショベルの運転経験がある 1 名を対象とした．

車体の初期姿勢は，一般的なすきとり操作時の姿勢を参考にして，アームを最も伸ばした状態でバケットの刃先を地面から 0.3m の高さに合わせた姿勢とした．

3.4.1.4　実験結果

すきとり操作におけるバケット刃先の軌跡を図 3.31 に示す．横軸が奥行き方向の刃先位置，縦軸が刃先の垂直位置を示している．遅れおよびむだ時間のない実験条件 No.1（None）と，遅れ 100ms の実験条件 No.2（Delay 100ms）での刃先の上下変動は奥行き方向の位置がおよそ 9m に到達するまでにほぼ収束しているが，むだ時間 100ms の実験条件 No.3（Deadtime 100ms）では奥行き 7.5m の位置まで上下変動が続いていた．

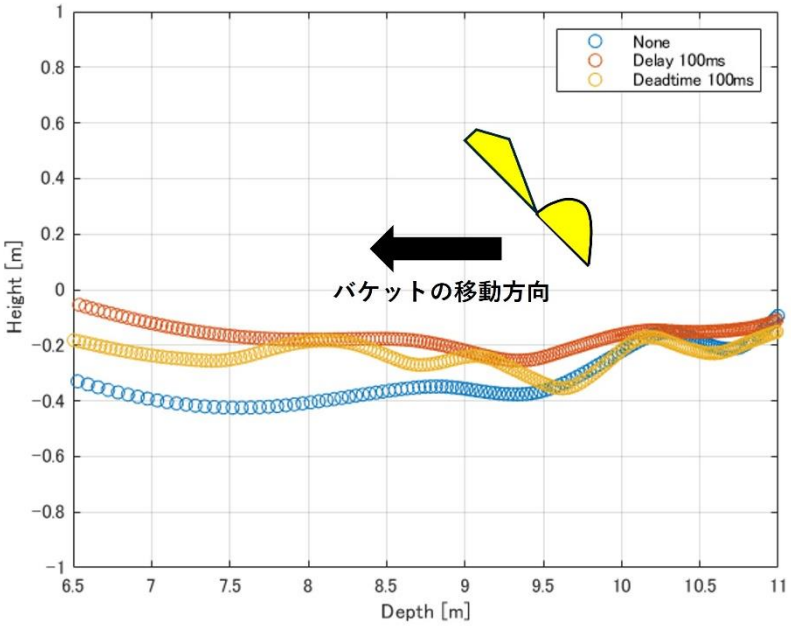


図 3.31 バケット刃先の軌跡

バケット刃先の軌跡は，ブーム操作とアーム操作によるブームシリンダとアームシリンダの複合的な変位の結果として現れている．そこで，ブームとアームについて個別に結果を抽出した．バケット刃先の奥行位置に対するブームとアームの各シリンダ速度を図 3.32 に，ブームとアームの各レバー操作量を図 3.33 に示す.

シリンダ速度の結果に着目すると，アームシリンダ速度（図 3.32(b)）には波形に揺れが見られないのに対して，ブームシリンダ速度（図 3.32(a)）は大小に揺れていることから，図 3.31 のバケット刃先の上下変動はブームシリンダの速度変化に起因していることが示された．さらに，ブーム操作の波形（図 3.33(a)）に着目すると波形に揺れが見られたことから，操作量の調整を繰り返していることがわかり，図 3.32(a)のブームシリンダ速度の変化は被験者自身がブーム操作によって生じさせていることが明らかとなった.

操作に対するむだ時間の影響を分析するために，むだ時間 100ms 条件のブーム操作とシリンダ速度の時刻歴データの一部分を図 3.34 に示す．被験者が操作量（図 3.34(a)）の減少を止めても，むだ時間の影響によりブームシリンダの速度（図 3.34(b)）の低下が進むため，被験者は速度を増加させるべく操作量を増やしていることが確認された．このことから，被験者は十分に練習をしたうえで複数回すきとり操作を繰り返しても，むだ時間を想定した操作が困難であったことが示唆された.

さらに，被験者へのインタビューの結果，複数回にわたる操作の中でむだ時間の影響を感知していたが，むだ時間条件が最も操作しづらかったというコメントを得た．

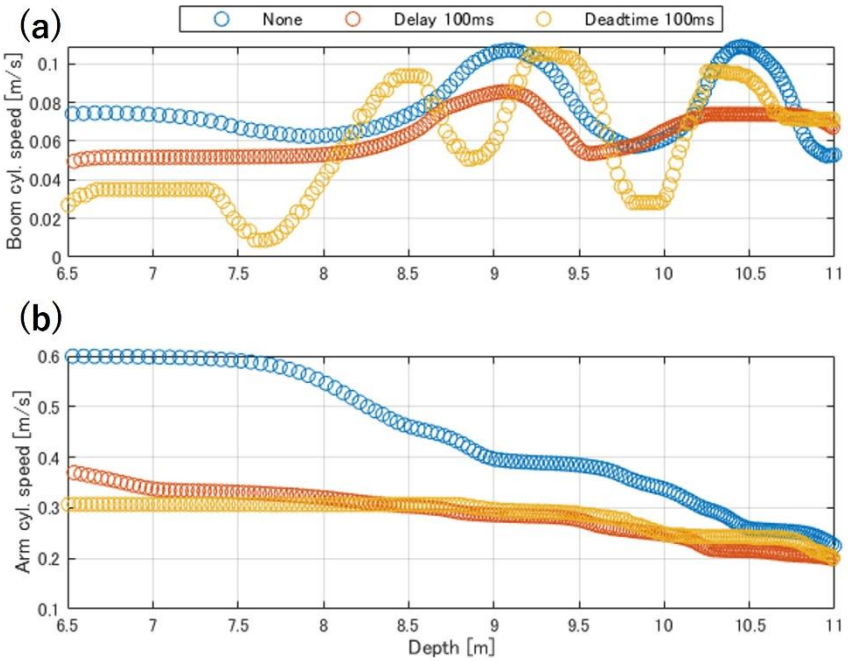


図 3.32 すきとり操作時の各シリンダの速度

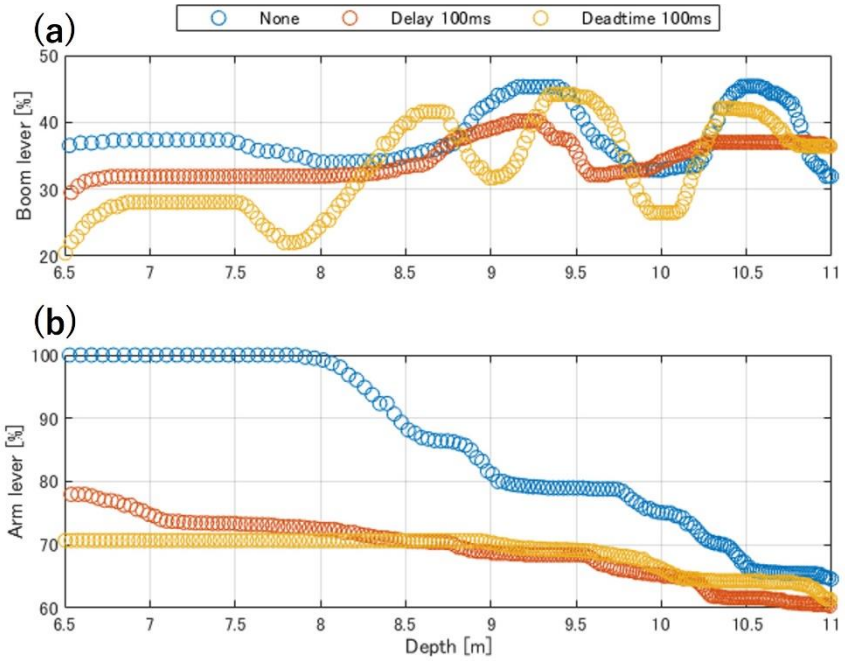


図 3.33 すきとり操作時のレバー操作

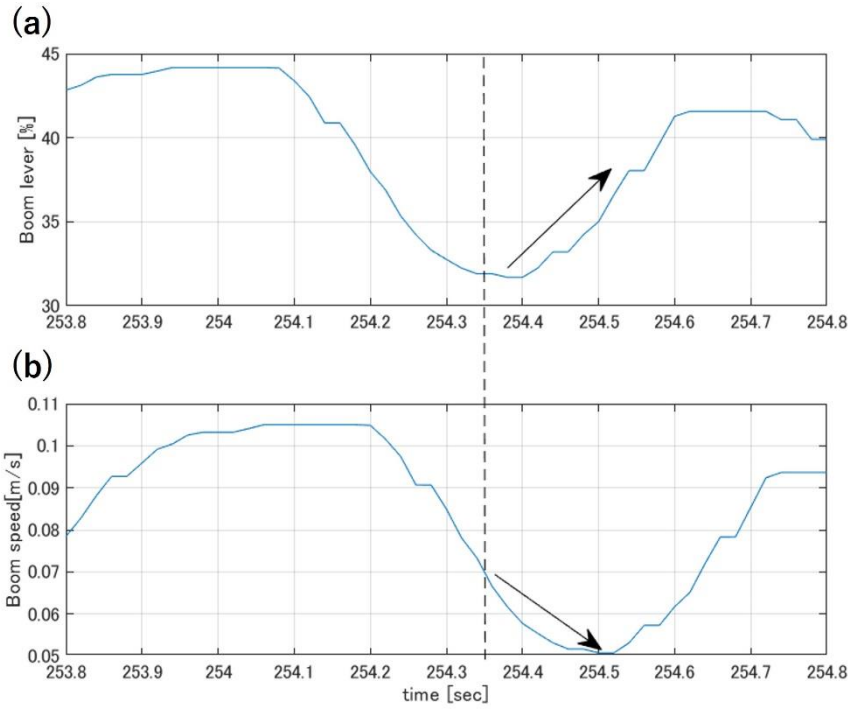


図 3.34 ブームレバー操作とブームシリンダ速度（実験条件 No.3）

3.4.1.5　実験 2-1 の考察

バケット刃先の軌跡のデータにおいて，むだ時間条件が最も刃先の動きを収束させづらかったことから，むだ時間の操作に対する影響が大きいと考えられる．刃先の振動的な動きは，ブーム操作に起因しており，ブームシリンダ速度とブーム操作のデータを分析した結果，むだ時間を想定した操作が困難であったために頻繁にブーム操作量の調整を行っていたことが確認された．これは，むだ時間がオペレータのフィードバックループに介在することで，操作タイミングのズレと過度なブームの調整操作が引き起こされたことを示している．この操作の不安定性と頻繁な修正操作は，オペレータの主観的な操作感の悪化につながった．被験者へのインタビューにおいて，むだ時間条件が最も操作しづらいという評価を得たのは，むだ時間による操作入力から油圧ショベルの動き出しまでに生じる時間的なズレを想定することが困難となり，意図どおりの操作ができなかったことが操作負荷につながったためだと考えられる．

したがって，ブームとアームを複合的に操作するすきとり操作においても，むだ時間が操作の安定性および操作性を悪化させたことから，むだ時間が操作に影響する官能要因であることが明らかとなった．

3.4.2　実験 2-2 複合操作における視覚情報の影響評価

すきとり操作に対する視覚情報の影響評価を目的とした実験について，その概要と結果を以下に示す.

3.4.2.1　実験条件

本実験では，すきとり操作に対する視覚情報の影響を評価することを目的とした．実験 2-1 と同様に，実験にはシミュレータを用いた．車体特性に関するパラメータは評価対象ではないため，アームシリンダおよびブームシリンダの動特性はむだ時間 100ms，遅れ 0ms に固定して実験を実施した.

3.4.2.2　実験装置

実験には，実験 2-1 と同じ装置を用いた．ただし，本実験では被験者の視点変化の影響を一旦排除するために，オペレータの視点は固定し，モニタに投影されたオペレータ視点の映像を見ながら操作するシミュレータを構築した（図 3.35）．入力インターフェースに対する操作の割り当てについては，実験 2-1 と同様に設定した.



図 3.35 シミュレータ操作風景

3.4.2.3　実験方法

被験者にはシミュレータ上ですきとり操作を実施させ，被験者自身がバケットの刃先を目標面である地面に対して水平に動かすことができたと判断した後，数回すきとり操作をしたところで実験を終了した．これは，データ分析において安定した被験者の操作データを用いるためである．オペレータの視覚情報として，すきとり操作中の

オペレータ視点の画像を記録した．なお，被験者は建設機械の運転資格を有しており，数回の油圧ショベルの運転経験がある 1 名を対象とした．車体の初期姿勢は，一般的なすきとり操作時の姿勢を参考にして，アームを最も伸ばした状態でバケットの刃先を地面から 0.3m の高さに合わせた姿勢とした．

3.4.2.4　実験結果

データ分析は，バケットをオペレータから見て手前に動かす方向（以下，掘削方向）と遠ざける方向（以下，ダンプ方向）に分けて実施した．それぞれの操作条件においてブームとアームの操作量を比較した結果を，図 3.36 および図 3.37 に示す．横軸は奥行き方向のバケット刃先の位置を示している．操作の結果から，アーム操作（図 3.36(b)および図 3.37(b)）はほぼ一定であったのに対して，ブーム操作量（図 3.36(a)および図 3.37(a)）を頻回に調整していることが確認された．これは，バケット刃先の水平動作には，ブーム操作が大きく寄与していることを示している．この背景には，図 3.28 に示したとおり油圧ショベルの幾何学的制約がある．アームのみを操作すると，バケットの刃先はブームとアームの接続部を中心とした円弧運動となり，水平にバケット刃先を動作させることができない．オペレータが掘削方向にすきとり操作を行う場合，バケット刃先が最下点に到達するまでは刃先は円弧を描きながら下降する．そのため，アーム操作と同時にブーム上げ操作により，バケット刃先位置を上昇させることで水平動作を実現しており，ブームの操作が大きく寄与しているのである．一方，ダンプ方向の操作においては，アーム操作により刃先が上昇するため，ブーム下げ操作によって刃先位置を降下させる操作が主となる．図 3.36 および図 3.37 の結果からも，前述した操作意図のとおりにオペレータは主にブーム操作量の調整に注力し，刃先の動作方向に応じてブームの操作方向が逆転していることが確認された．

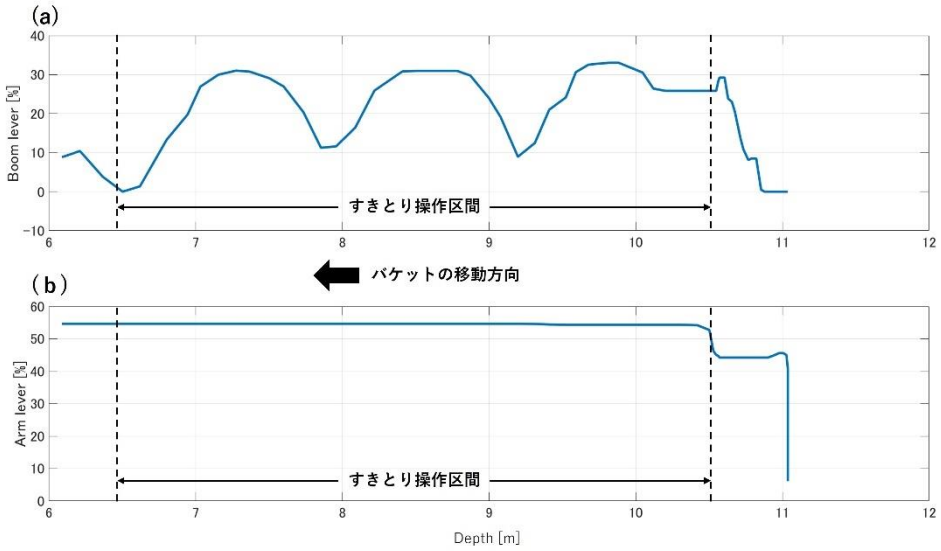


図 3.36 すきとり操作時のレバー操作（掘削方向）

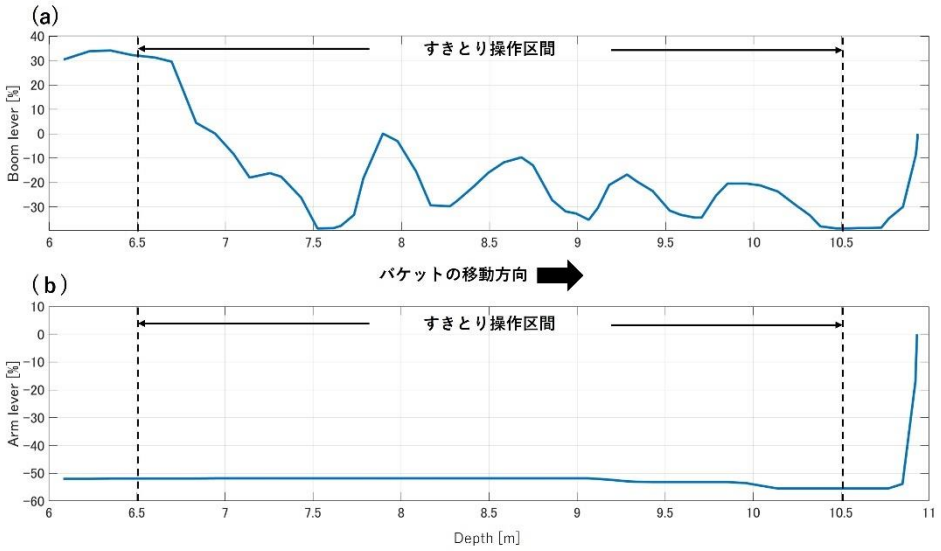


図 3.37 すきとり操作時のレバー操作（ダンプ方向）

すきとり操作においては，ブーム操作量の調整が主たる操作となることから，視覚情報がブーム操作に与える影響を評価した．分析では，オペレータが視認するバケットの面積に着目し，これをオペレータの視覚情報として扱った．すきとり操作中にバケット刃先が地面に食い込むと，オペレータが視認するバケットの面積が減少する（図 3.38）．このことから，オペレータはバケットの面積変化を基に刃先位置を推定し，ブーム操作量を決定しているという仮説を立て，バケットの面積情報がブーム操作に与える影響を分析した．

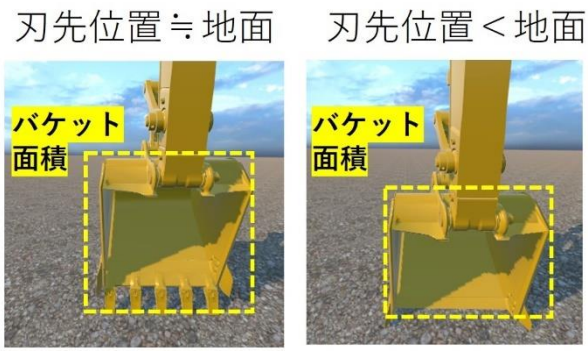


図 3.38 バケット刃先位置に応じたバケットの面積変化

図 3.39 と図 3.40 は，掘削方向の操作とダンプ方向の操作に分けて，バケットの面積変化とブーム操作の関係性を分析した結果を示している．本データは，3 回分のすきとり操作のデータを重ね合わせて表示している．横軸は，奥行き方向のバケット刃先の位置を示している．

掘削方向の操作結果（図 3.39）では，ブームの操作量（図 3.39(b)）について黒色のデータ点がブーム上げ操作量を減量したときのデータ，赤色のデータ点がブーム上げ操作量を増量したときのデータを示している．バケット面積のデータ（図 3.39(a)）上でプロットの色の分布を見てみると，青色の破線付近を境界として，破線よりもバケット面積が小さくなる領域に赤色のプロットが，破線よりも面積が大きくなる領域に黒色のプロットが分布する傾向が見られた．つまり，この破線付近でブーム操作量の増減が切り替わっており，操作意図が変化する領域であることが明らかとなった．

ダンプ方向の操作（図 3.40）では，ブームの操作量（図 3.40(b)）について黒色のデータ点がブーム下げ操作量を減量したときのデータ，赤色のデータ点がブーム下げ操作量を増量したときのデータを示している．掘削方向のすきとり操作と同様に，バケット面積のデータ（図 3.40(a)）上でプロットの色の分布を見てみると，青色の破線付近でプロットの色を分離できる傾向が確認された．しかし，掘削方向の操作と比較すると，破線によるプロットの分離にはややあいまいな個所が見られた．これは，ダンプ方向の操作ではバケットにより目標面が見にくく，掘削方向と比較すると操作しづらくなることから，データのばらつきが大きくなったためであると考えられる．

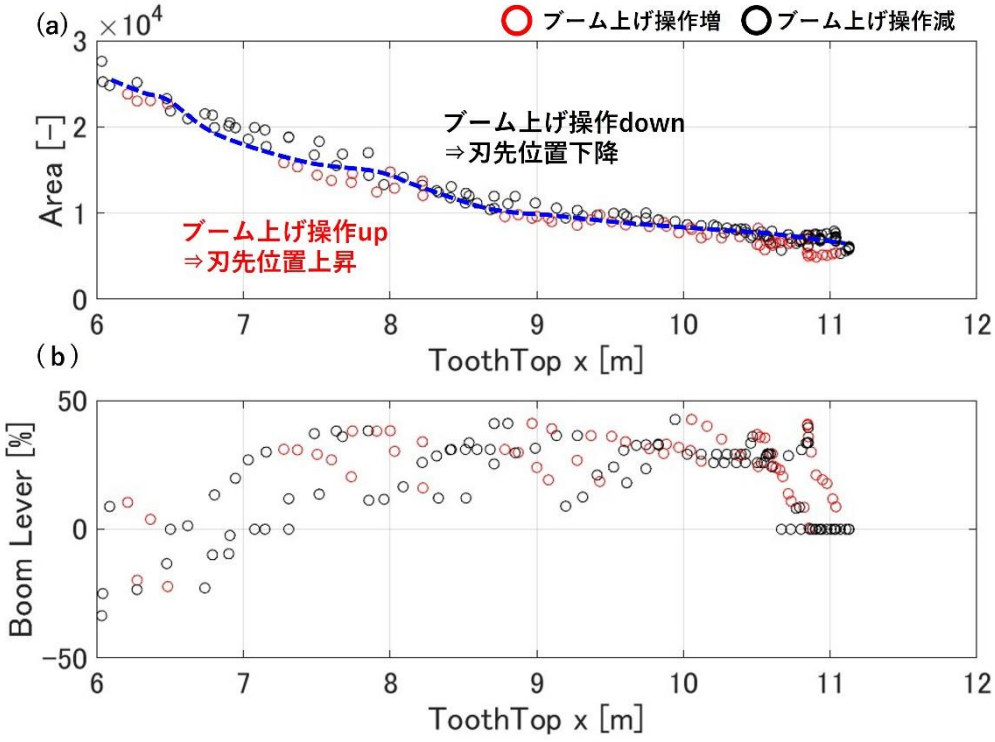


図 3.39 すきとり操作時のバケットの面積変化とブーム操作（掘削方向）

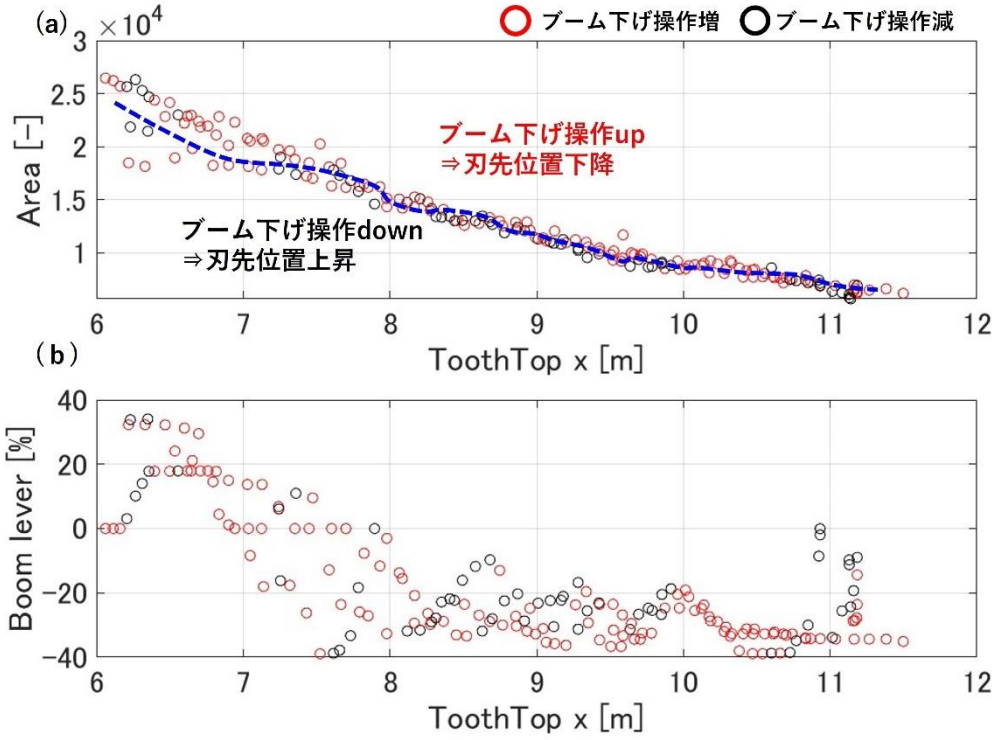


図 3.40 すきとり操作時のバケットの面積変化とブーム操作（ダンプ方向）

3.4.2.5　実験 2-2 の考察

レバー操作の結果（図 3.36，図 3.37）において，オペレータはすきとり操作時にアーム操作はほぼ一定とし，ブーム操作量を頻回に調整していたことから，ブーム操作が主たる操作であることが示された．これは，アーム操作だけではバケットの刃先が円弧を描き水平に動かすことができないため，ブーム操作により垂直方向の位置を調整するという操作意図が反映されている．

オペレータの視覚情報としてバケットの面積に着目し，バケット面積とブーム操作の関係性を評価したところ，バケット面積データ上の破線で示された境界線付近でブーム操作量の増減が切り替わる傾向が見られた（図 3.39，図 3.40）．掘削方向の操作（図 3.39）では，青色の破線よりもバケット面積が小さくなるとブーム上げ操作量を増量し刃先位置を上昇させようとしていることから，オペレータはバケット面積が小さくなったことにより刃先が地面に食い込んだと判断し，刃先位置を上昇させる操作を行ったことが示唆された．一方，破線より面積が大きくなると目標面よりも刃先の位置が高いと判断して，ブーム上げ操作を減量し，アーム操作により刃先位置を下げようとしたと考えられる．したがって，ブーム操作量の増量も減量も必要としない青色の破線部分は，刃先が地面に一致していることにより刃先位置の調整を不要と判断している領域であることが示された．ダンプ方向の操作(図 3.40）でも同様に，青色の破線よりも面積が小さくなったことにより，刃先が地面に接触したと判断し，ブーム下げ操作量を減量することで，アーム操作によって刃先位置が上昇するように対処していると考えられる．

よって，本実験の結果から，オペレータは視認するバケットの面積変化を基にバケットの刃先位置を推定し，ブームの操作量を調整していることが示唆された．したがって，複合操作であるすきとり操作においても視覚情報が操作に影響を及ぼしており，視覚情報が操作性に関する官能要因の一つであることが明らかとなった．

3.5　本章のまとめ

油圧ショベルの操作に影響する官能要因を明らかにするために，単軸操作（実験1）と複合操作（実験 2）に分けて実験を行った．

単軸操作を対象とした実験 1 では，油圧ショベルのブーム単独操作と旋回単独操作に影響する官能要因を抽出するための実験を実施した．実験では，油圧ショベルのシミュレータを用いた．さらに，油圧ショベルの形状が操作に与える影響も評価するために，油圧ショベルのバケット部分を簡略化した四角形の物体を動かす実験も実施した．実験の結果，むだ時間と視覚情報が操作に影響することが確認され，操作性に関する官能要因であることが明らかとなった．

むだ時間の影響については，むだ時間が長くなると，操作中の修正操作が増加し，ポジショニング精度も悪化する結果が得られた．さらに，被験者へのアンケートの結果，むだ時間が大きい条件では操作性の評価が低下する傾向が示された．このことから，修正操作の増加とポジショニング精度の悪化が操作のしづらさにつながったことが実験的に明らかになり，むだ時間が操作に影響する官能要因であることが示された．

視覚情報の影響については，油圧ショベルと簡略化した物体の視覚情報の違いにより，操作の特徴に差異が見られた．具体的には，油圧ショベルの形状が視覚的に重量感を与えたことで，慎重なポジショニング操作が促されたことが示唆された．さらに，油圧ショベルの旋回操作においては，油圧ショベルでは操縦席から見て右側に作業機が取り付けられていることによる視界性の左右差の影響も示唆された．具体的にどの構成部品が油圧ショベルの操作に影響を与えるのかについては，さらなる検証が必要であるが，実験 1 の結果から視覚情報が操作に影響することが明らかになった．

実験 2 では，実験 1 の知見に基づき，むだ時間の影響評価を目的とした実験（実験 2-1）と視覚情報の影響評価を目的とした実験（実験 2-2）に分けて実験を実施した．

実験 2-1 では，すきとり操作を対象としてむだ時間の影響を分析した．その結果，むだ時間条件では，遅れ条件やむだ時間も遅れも含まない条件よりもバケットの刃先位置を収束させづらいことがわかった．レバー操作の結果から，むだ時間への対応が困難であったことによる頻回な修正操作が確認され，むだ時間条件は操作しづらかったという被験者のコメントからも，修正操作を繰り返したことが操作性の悪化につな

がったと考えられる．このことから，複合操作であるすきとり操作においても，むだ時間が操作に影響する官能要因であることを実験的に明らかにした．

実験 2-2 では，視覚情報の影響を評価するために，すきとり操作において主たる操作であるブーム操作とオペレータが視認するバケットの面積変化との関係性を分析した．その結果，オペレータはバケット面積の変化を基に刃先位置を推定して，ブーム操作量を決定していることが確認された．したがって，すきとり操作においても視覚情報が操作に影響する官能要因であることが明らかになった．

実験 1 と実験 2 により，油圧ショベルの単軸操作および複合操作に影響する官能要因として，むだ時間と視覚情報を抽出することができた．以上より，第 3 章における研究の結果，油圧ショベルの操作性に関する官能性能設計においては，むだ時間と視覚情報が考慮すべき特徴量であることを実験的に明らかにした．

4　通信遅延の影響を抑止する遠隔操作手法の提案

4.1　はじめに

建設機械の遠隔操作においては，通信遅延による作業効率の低下と操作性の悪化が課題となっている[27]．さらに，第 3 章の研究結果から，むだ時間が操作性に影響する官能要因であることが明らかになった．これらの知見に基づき，本章では，むだ時間に相当する通信遅延が操作に与える影響を低減することで，遠隔操作の操作性を向上する手法を提案することとした．

本章で提案する遠隔操作手法では，オペレータは実物の油圧ショベル（以下，実機）ではなく，仮想空間上の油圧ショベル（以下，仮想ショベル）を操作し，その操作量のみを通信を介して実機に送信する．オペレータは仮想ショベルを見て操作するため，通信遅延が操作に直接影響せず，通信遅延による操作性の悪化を抑止できる．また，仮想ショベルと実機が完全に一致していると仮定すると，実機は通信遅延分遅れて仮想ショベルに追従する．

しかし，実用の観点では実機と仮想ショベルの間には，モデル化誤差による挙動の差異が生じる．また，実機に予期しない過大な負荷がかかり動きが制限される場合には，仮想ショベルはその負荷を想定していないため，実機と仮想ショベルの差異が拡大する．これらの課題に対応するために，仮想ショベルと実機の差異を補正する機能を追加した．さらに，想定外の負荷がかかり仮想ショベルと実機の差異が拡大する場合には，仮想ショベルの動きを制限することで差異の拡大を抑制する機能も加えた．本章では，これらの提案手法についてシミュレーション検証による有効性の評価を行い，遠隔操作を対象とした官能要因に基づく官能性能設計手法を示す．

4.2　制御手法の提案

本章で提案する遠隔操作手法は，仮想映像の提示，操作入力の補正，および仮想映像の補正の 3 つの要素から構成される．それぞれを提案手法 1，提案手法 2 および提案手法 3 と位置づけ，各手法の詳細を順に説明する．

4.2.1　提案手法 1：仮想映像の提示

本章で提案する手法の基本構成である提案手法 1 の概要を，図 4.1 に示す．本手法では，オペレータ（Operator）が仮想空間上の仮想ショベル（Virtual Machine）を操作し，その操作入力（Lever input）のみを通信遅延を介して現場の実機（Actual Machine）に送信する．オペレータは仮想ショベルを見て操作するため，オペレータの操作ループに通信遅延が含まれず，通信遅延による操作性の悪化を回避できる．オペレータによる操作入力は通信を介して実機に送信されるため，実機は仮想ショベルに対して通信遅延分だけ遅れて動作する．仮想ショベルと実機が完全に一致する場合は，実機は当然ながら仮想ショベルと同一の動きとなり，オペレータは通信遅延の影響を受けることなく意図どおりに遠隔操作を行うことができる．また，実機の周辺環境を仮想空間にも再現することによって，オペレータは実機と同じ環境下で作業を行っているような感覚で操作を行うことができる．

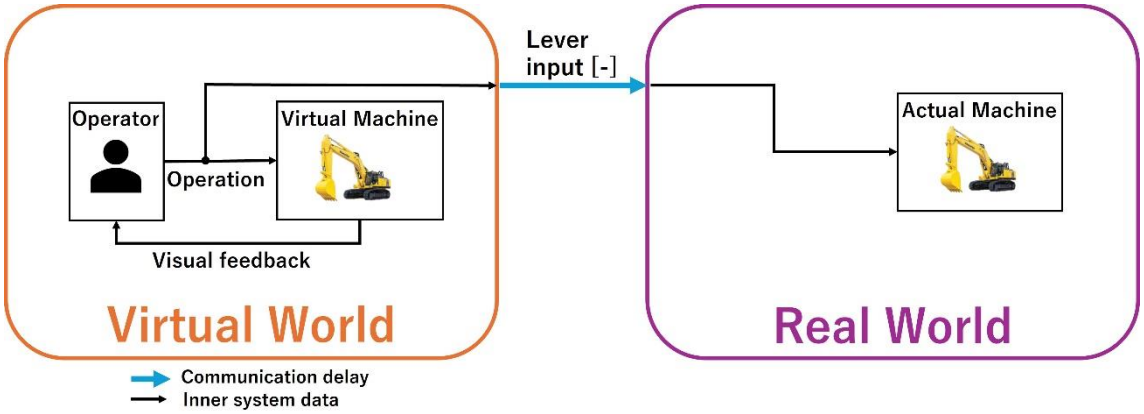


図 4.1 提案手法 1：仮想映像の提示

4.2.2　提案手法 2：操作入力の補正

仮想ショベルは実機をモデル化したものであるため，仮想ショベルと実機との間にはモデル化誤差による挙動の差異が生じる．そこで，提案手法 2 では，両者の差異を補正するためにコントローラ（Controller）を追加した（図 4.2）．具体的には，仮想ショベルの作業機姿勢，すなわちシリンダ長（Target Position：TP）を目標値として実機に送信し，コントローラは実機（Actual Position：AP）がその目標値に追従するよう操作入力（Lever input）を補正する．補正手法は，基本的な PID 制御に加えて，通

信遅延のようなむだ時間の影響を排するためのスミス型補償器[61]，モデル予測制御[62]，さらに小菅らによる仮想内部モデル追従制御[63]などの適用が考えられる．

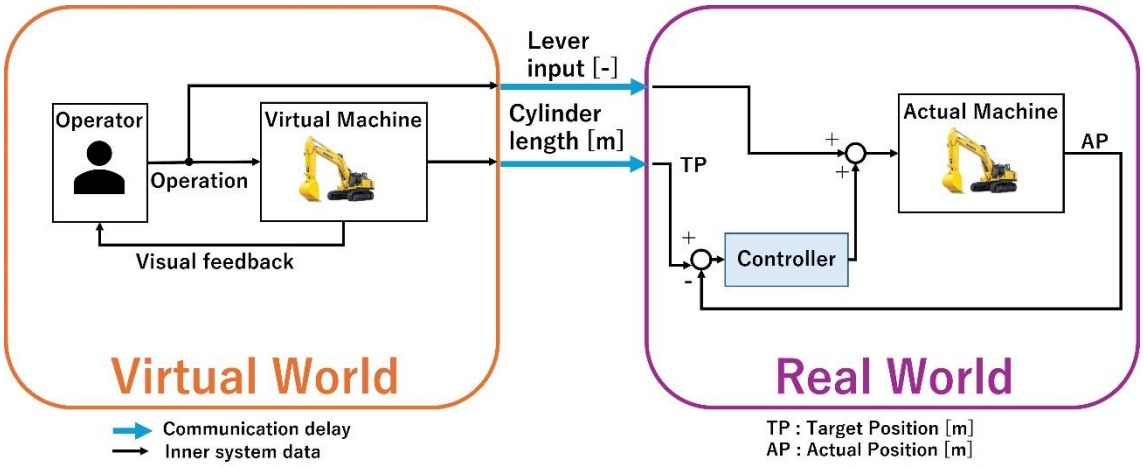


図 4.2 提案手法 2：操作入力の補正

4.2.3 提案手法 3：仮想映像の補正

実機に想定外の過大な負荷が作用することで，実機と仮想ショベルの差異が拡大し，コントローラによる補正が困難になる可能性がある．さらに，オペレータが外力に気づくことなく操作を継続することで，シリンダに過大な負荷がかかり，作業機の破損など危険な状態に陥る恐れもある．

この課題に対応するため，提案手法 3 では仮想ショベルと実機の差異がコントローラの補正限界に達した場合に，差異の拡大を抑制する機能として映像調整器（Visual Adjuster）を追加した（図 4.3）．差異が補正限界に達したと判断されると（Adjuster On/Off decision logic），映像調整器が仮想ショベルの動きを制限する．仮想ショベルのシリンダ速度を制限することで，実機に送信される目標値（Target Position：TP）の変化量も抑えられる．その結果，実機と仮想ショベルの挙動の差異が徐々に縮小される．両者の差異が，コントローラによる補正可能な範囲に収まると，仮想ショベルに対する制限は解除され，再びコントローラによる補正が有効となる．

この仕組みは，実機の目標値である仮想ショベルの動きを制限するという点で，リファレンスガバナ[64]の原理を応用したものと位置付けられる．また，シリンダの動きに制限がかかると，オペレータの操作に対する仮想ショベルの動きが緩慢になるため，オペレータが実機に負荷がかかっていることを視覚的に把握することができる．この現象は一般にシュードハプティクス（Pseudo-Haptics）と呼ばれる．一例とし

て，マウスカーソルの動きが遅くなるとマウスが重くなったような感覚や抵抗感を感じる現象が挙げられる[65].

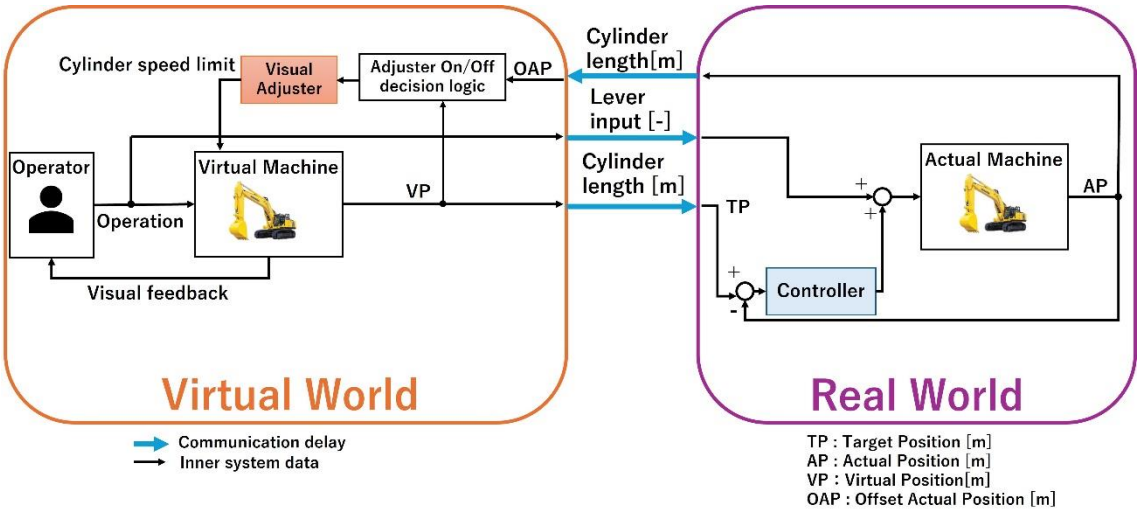


図 4.3 提案手法 3：仮想映像の補正

4.3 提案手法の検証

本章で提案した 3 つの手法（提案手法 1〜3）について，シミュレーション検証の結果を以下に述べる.

4.3.1 検証の目的

4.2 節にて提案した各提案手法の設計方針を，以下に示す．検証では，各提案手法が設計方針を満たしているかを確認し，その有効性を検証することを目的とした.

提案手法 1 の設計方針：通信遅延の影響を抑止する

提案手法 2 の設計方針：仮想ショベルと実機のモデル化誤差を補正する

提案手法 3 の設計方針：コントローラの補正限界に達した場合に，仮想ショベルと実機の差異の拡大を抑制する

4.3.2 検証方法

本章で提案した 3 つの提案手法について，シミュレーションによる検証を行った．提案手法 2 および 3 に関連するモデル化誤差や補正限界の条件は，シミュレータを用いた方が容易に再現できるためである．実用化には実機検証が不可欠であるが，その前段階としてシミュレーション検証を実施した．検証環境として，Unity と AGX Dynamics を用いて仮想ショベルを含むシミュレータを構築した．オペレータは，モニ

タに表示されたオペレータ視点の仮想ショベル映像を見ながら操作を行う．本検証は提案手法の動作検証を目的としているため，入力インターフェースは実物のジョイスティックではなく，ゲームパッド（Microsoft Xbox コントローラ）を用いた．実機は Matlab/Simulink によりモデル化した．

検証対象の操作は，実用を想定すると油圧ショベルの主要な操作である掘削操作が考えられる．しかし，掘削操作では作業機にかかる負荷が複雑に変動するため，仮想ショベルと実機の挙動比較が複雑になる．そこで，本検証では，よりシンプルな操作条件として水中におけるアーム単独操作を対象とした．水中作業では，繰り返し作業機を操作しても負荷が複雑に変動せず，一定の負荷を仮定することができるためである．水による負荷は，バケットの深さに応じてシリンダ速度を減速させることで表現した．作業機が深い位置にあるほど，実機の負荷が仮想ショベルよりも大きくなるように設定し，両者の挙動に差異が生じる条件を再現した．初期姿勢はアームシリンダが最縮の状態とし，オペレータにはアームシリンダを伸縮させる操作を繰り返させた．なお，本検証では仮想ショベルと実機の差異を意図的に発生させ，提案手法の機能を評価することを目的としたため，水による負荷については流体解析による厳密な計算は行わなかった．

シミュレータのモニタには，水中作業を再現した映像を提示した（図 4.4）．実用化を想定すると，実環境の変化を仮想空間に視覚的にフィードバックする必要がある．しかし，このような映像情報に関する課題は，提案手法の動作検証後の課題として対応することとし，本検証ではモニタの映像は実環境を再現しているものと仮定した．



図 4.4 オペレータ視点の映像

4.3.3　検証環境

本検証で用いた検証環境を図 4.5 に示す．本検証環境は，4.2 節において示した提案手法に基づき構築した．仮想ショベル（Virtual Machine）と実機（Actual Machine）の間には，通常の遠隔操作と同様に通信遅延を設けた．月との通信遅延は 2.0s 以上と想定されるため，本検証では検証の第一段階として，その半分にあたる往復 1.0s の通信遅延を設定し，通信遅延は一定で変動しないと仮定した．仮想ショベルと実機間のデータ通信には UDP プロトコルを採用した．実機は仮想ショベルからオペレータの操作入力（Lever input）とシリンダ長（Target Position：TP）を受信し，仮想ショベルは実機のシリンダ長（Offset Actual Position：OAP）を受信する．

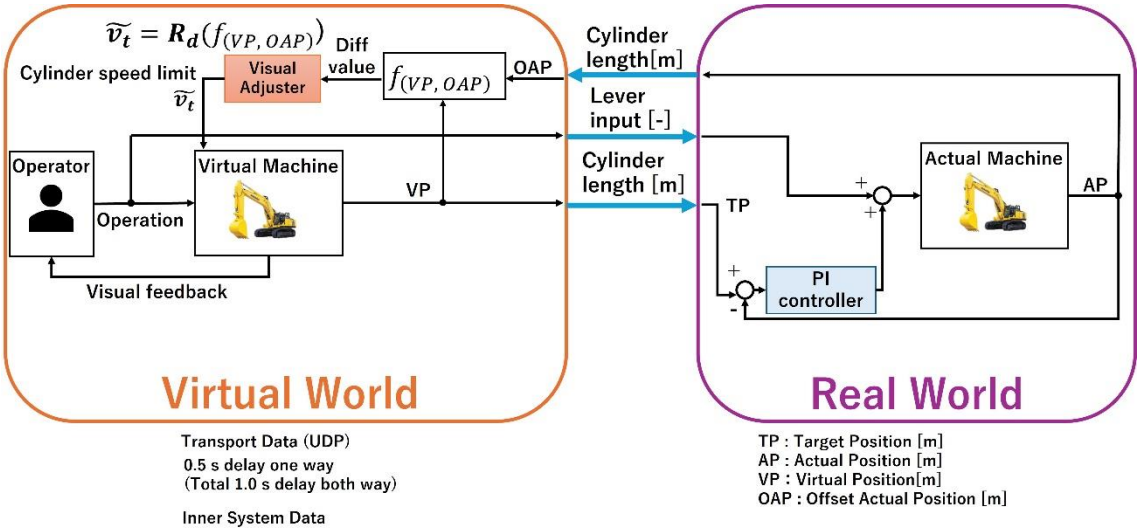


図 4.5 検証環境の概略図

検証環境における実機および仮想ショベルの挙動について説明する．仮想ショベルと実機の作業機の挙動は，操作入力とシリンダ速度の関係性に基づいて算出した．シリンダの動作においては，操作が入力されるとポンプが目標速度に応じて必要な流量を即座に供給するため，応答が非常に速い．そのため，本論文においては油圧系に含まれるむだ時間や遅れの影響は考慮せず，むだ時間に相当する要素は通信遅延のみとした．したがって，本システムでは作業機のシリンダ長（Cyl）は，操作入力に対するシリンダ速度（v_{t_0}）を積分することで算出した（式 4.1）．

$$Cyl = \int_{t_0}^{t_0+t} v_{to}\,dt \qquad (4.1)$$

仮想ショベルに与えられたオペレータの操作量は，片道の通信遅延にあたる 0.5s 遅れて実機に入力される．そのため，実機は仮想空間に対して 0.5s 遅れて動く（図 4.6）．したがって，実機が仮想ショベルと同一の挙動となる場合，仮想ショベルと実機のシリンダ長にはシリンダ速度をv_tとすると，片道の通信遅延にあたるむだ時間L分の差CP_1が生じる（式 4.2）．

$$\boldsymbol{CP_1 = \int_t^{t+L} v_t dt} \tag{4.2}$$

さらに，仮想ショベルが実機のシリンダ長の情報を受信する場合，0.5s の通信遅延を介して仮想空間に送信される．よって，受信した実機のシリンダ長と仮想ショベルのシリンダ長の差分は，シリンダ速度をv_tとすると往復の通信遅延によるむだ時間$2L$分の差分CP_2が生じる（式 4.3）．

$$\boldsymbol{CP_2 = \int_t^{t+2L} v_t dt} \tag{4.3}$$

従来の遠隔操作システムでは，フィードバック情報と現在の状態の差分であるCP_2が大きくなると操作性の悪化につながる．つまり，CP_2が遠隔操作における官能評価に影響している．そのため，官能性能を改善するためにはCP_2を小さくする必要があり，通信遅延を調整できない条件では，シリンダ速度v_tを小さくする処置が有効である（式 4.3）．ただし，速度を低下させすぎると，操作入力に対するシリンダの動きが緩慢になり，操作性を悪化させてしまうことに留意する必要がある．一方で，本提案手法ではオペレータは仮想ショベルを見て操作するため，操作性悪化の要因となるCP_2がオペレータの操作に直接影響することはない．すなわち，4.2.1 節にて提案手法 1 として示したとおり，実機が仮想ショベルと同一の動作となることを前提とすると，オペレータは通信遅延の影響を受けることなく実機を遠隔操作することが可能となる．

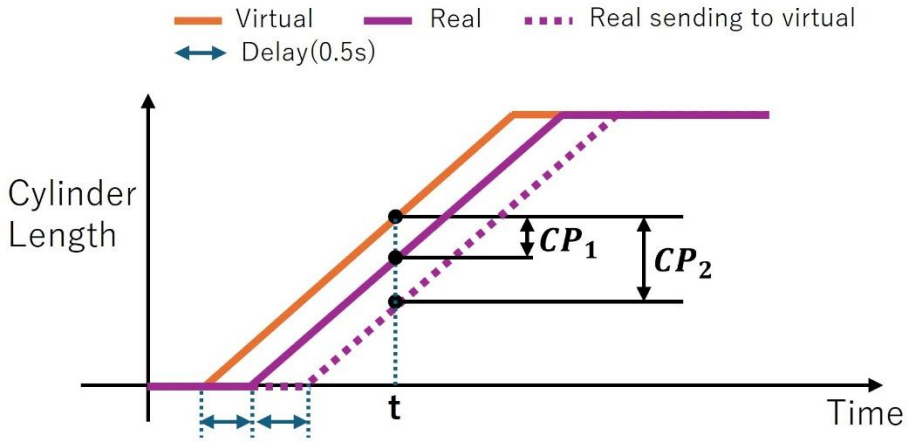


図 4.6 モデル化誤差がない条件での仮想ショベルと実機の挙動（提案手法 1）

しかし，仮想ショベルは実機をモデル化したものであるため，両者の間にはモデル化誤差による差異が生じる．この課題への対応策として，提案手法 2 では操作入力を補正するコントローラを導入した（図 4.7）．本検証においては，その実用性の観点から PI 制御による補正を適用した（式 4.4）．コントローラは，通信遅延を介して受信した仮想ショベルのシリンダ長（Target Position：TP）を目標値として，実機のシリンダ長（Actual Position：AP）との差分に基づき操作入力を補正する．これにより，仮想ショベルと実機のモデル化誤差を補正する．ただし，仮想空間から受信する操作入力（Lever input）が最大値の場合は，それ以上の入力補正を行うことができない．よって，仮想ショベルの操作量の最大値を制限する必要がある．しかし，シリンダ速度を下げすぎると操作に対する応答が緩慢になり，操作性の悪化につながる．このように，モデル化誤差の抑制と操作性の確保はトレードオフの関係にある点に留意する必要がある．本論文では，PI 制御の各パラメータは，シミュレーションにより実機の挙動を考慮しながら手動で調整した．シリンダが最高速度で動作しても振動しないことを最優先とし，応答をできる限り早くする P ゲインを設定した．その後，定常偏差を最小限に抑えるよう I ゲインを調整した．

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{4.4}$$

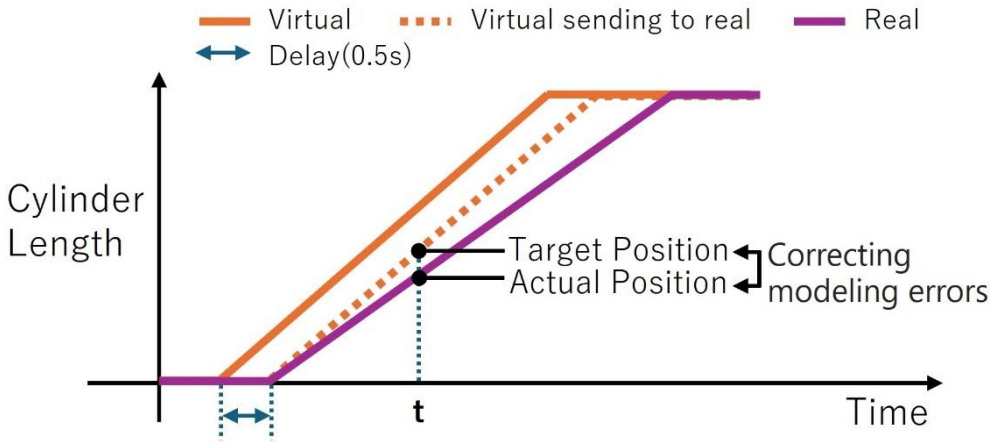


図 4.7 モデル化誤差の補正（提案手法 2）

しかし，実機に想定外の外力がかかりシリンダの動作が制限されると，仮想ショベルはそのような負荷を想定していないため，仮想ショベルと実機の差異が拡大し，コントローラによる補正が困難になる．そこで，提案手法 3 では，このようなコントローラの補正限界に達した場合に，仮想ショベルのシリンダ速度を一時的に減速させ，差異の拡大を抑制する映像調整器を追加した．映像調整器による減速処理の仕組みを図 4.8 に示す．仮想ショベルと実機の差分が閾値th_1を超えるとコントローラの補正限界に達したと判断され（式 4.5），検出フラグ（Diff Value）が有効になり，仮想ショベルのシリンダ速度が制限される（式 4.6，式 4.7）．この減速処理には，チャタリングの防止のためにヒステリシスを設け，減速開始の閾値はth_1（式 4.8），停止の閾値をth_2（式 4.9）とした．減速処理の要否を判断する際に，仮想ショベル（VP）と実機（OAP）の差異を比較するが，両者が同一の動きであると仮定すると，VPとOAPの差異は往復の通信遅延によるむだ時間$2L$分の差異CP_2となる（式 4.3）．このことから，減速処理が頻発しないようにするため，減速開始の閾値th_1はCP_2に対してaだけ余裕を持たせた（式 4.8）．シリンダ速度を最高速に近い 0.4m/s と仮定すると，往復の通信遅延が 1.0s であることからCP_2は 0.4m となる．よって，本検証では，aを 0.1m と設定し，th_1を 0.5m とした．同様に，th_2もCP_2に対してbだけ余裕を持たせた．th_2は減速処理停止の閾値であるため，bをaの半分に相当する 0.05m とし，th_2は 0.45m と設定した．aの値を小さくしすぎると仮想ショベルの減速処理が頻発して操作性が悪化する可能性があり，逆に値を大きくすると実機との差異の補正が困難になる．よって，これらのトレードオフを加味して値を設定する必要がある．

仮想ショベルの減速により実機との差異が縮小すると，検出フラグ（Diff value）が無効になり，仮想ショベルに対する制限が解除され，再びコントローラによる補正が有効となる．これにより，コントローラによる補正が困難な状況においても，仮想ショベルと実機のシリンダ長の差異の拡大を抑制することが可能となる．

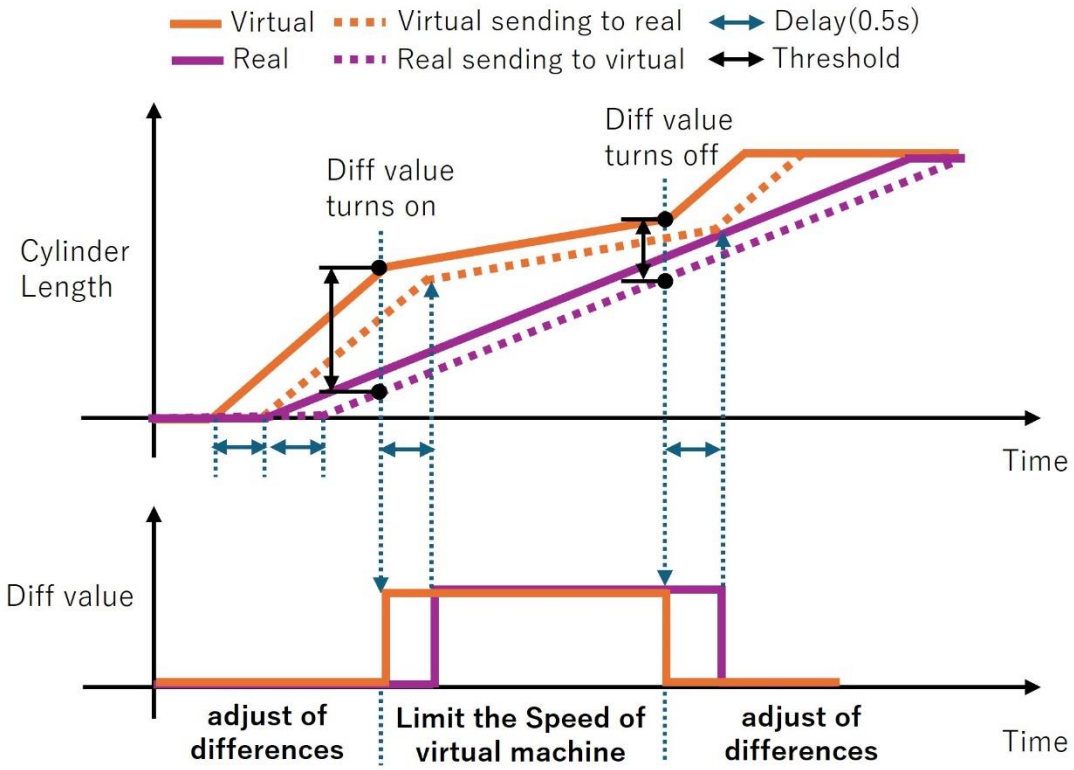


図 4.8 映像調整器による減速処理の仕組み（提案手法 3）

$$f_{(VP,\ OAP)} = \begin{cases} \boldsymbol{true} & (\boldsymbol{VP - OAP \geq th_1}) \\ \boldsymbol{false} & (\boldsymbol{VP - OAP < th_2}) \end{cases} \tag{4.5}$$

VP: $Virtual\ Position$　OAP: $Offset\ Actual\ Position$
th_1: $Deceleration\ start\ threshold$　th_2: $Deceleration\ stop\ threshold$

$$\tilde{v}_t = R_d\left(f_{(VP,\ OAP)}\right) \tag{4.6}$$

$\tilde{v}_t$: $Reduced\ Cylinder\ Speed$

$$R_d\left(f_{(VP,\ OAP)}\right) = \begin{cases} 0.2v_t & \left(f_{(VP,\ OAP)} = \boldsymbol{true}\right) \\ v_t & \left(f_{(VP,\ OAP)} = \boldsymbol{false}\right) \end{cases} \tag{4.7}$$

v_t: $Cylinder\ Speed$

$$\boldsymbol{th_1 = CP_2 + a} \tag{4.8}$$

$$th_2 = CP_2 + b \tag{4.9}$$

4.3.4　検証結果

本章にて提案した 3 つの提案手法（提案手法 1～3）について，シミュレーション検証の結果を以下に示す.

4.3.4.1　提案手法 1 の検証結果

提案手法 1 の検証においては，本手法の設計方針に準じて，オペレータ操作に対する通信遅延の影響を抑止できているかどうかを評価した．本手法は，実機と仮想ショベルが同一の挙動となることを前提としているため，両者に差異がない条件をシミュレーション上に再現し，検証を行った．その結果，アームシリンダ長の変位に着目すると，実機が仮想ショベルに対して通信遅延分（0.5s）遅れて動作していることを確認した（図 4.9）．通信遅延分オフセットして挙動を比較すると，実機は仮想ショベルと同一の動作結果となっており，オペレータは通信遅延の影響を受けることなく意図どおりに実機を遠隔操作できたことが示された（図 4.10）．これにより，提案手法 1 が操作に対する通信遅延の影響を抑止できることを確認することができた.

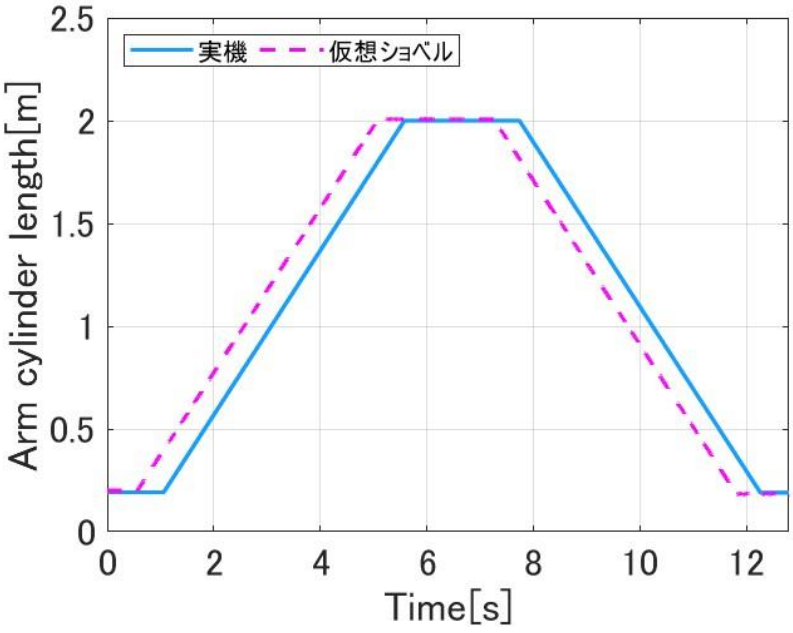


図 4.9　提案手法 1 の検証結果

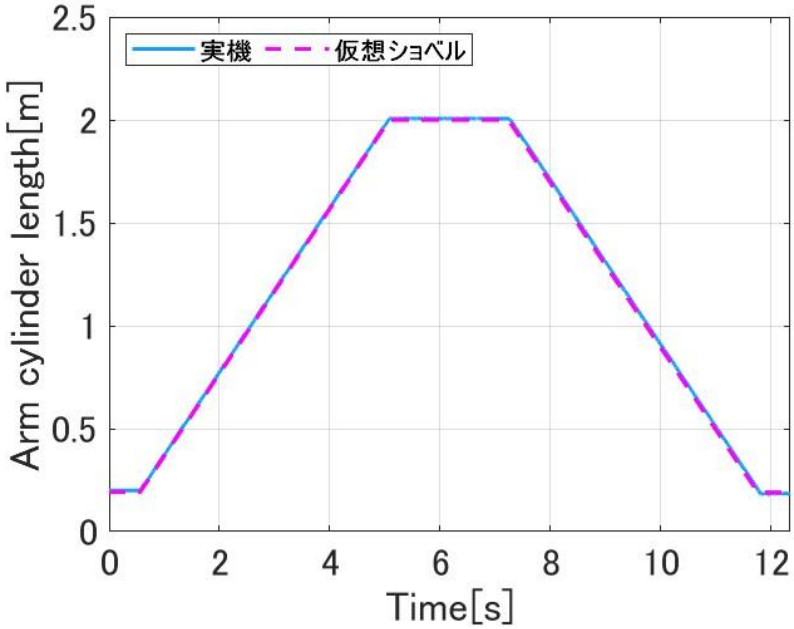


図 4.10 提案手法 1 の検証結果（挙動比較）

次に，仮想ショベルと実機にモデル化誤差が生じる条件を再現し，同様に動作検証を行った．モデル化誤差は，バケットの位置を下げて水による負荷を上昇させ，実機と仮想ショベルにかかる負荷に差異を設けることで再現した．検証の結果，仮想ショベルと実機にはモデル化誤差による差異が見られた（図 4.11）．これにより，モデル化誤差への対応が提案手法 1 の課題であることをシミュレーションにより示した．

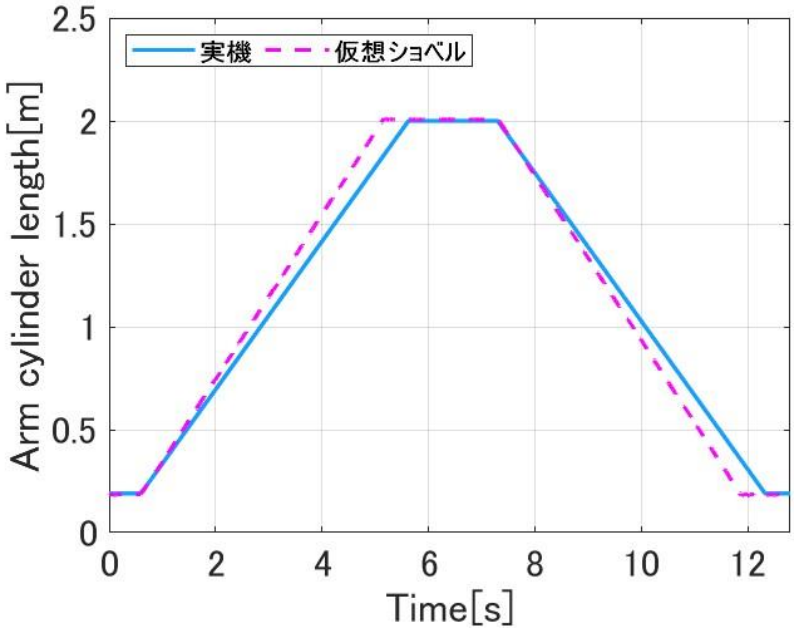


図 4.11 モデル化誤差がある条件における提案手法 1 の検証結果

4.3.4.2　提案手法 2 の検証結果

提案手法 2 では，仮想ショベルと実機のモデル化誤差への対応を設計方針とし，操作入力を補正するコントローラを付加した．したがって，提案手法 2 の検証においては，モデル化誤差が生じる条件をシミュレーション上に再現し，コントローラの有効性を評価した．その結果を，図 4.12 に示す．コントローラがない条件での実機の挙動を示す実機（コントローラなし）のデータにおいては，仮想ショベルに対してモデル化誤差による差異が見られた．一方，コントローラを有する実機の動作結果を示す実機（コントローラあり）では，仮想ショベルと同一の動きとなっており，コントローラによりモデル化誤差を補正できたことを確認した．よって，提案手法 2 がモデル化誤差による挙動の差異を補正できることを示すことができた．

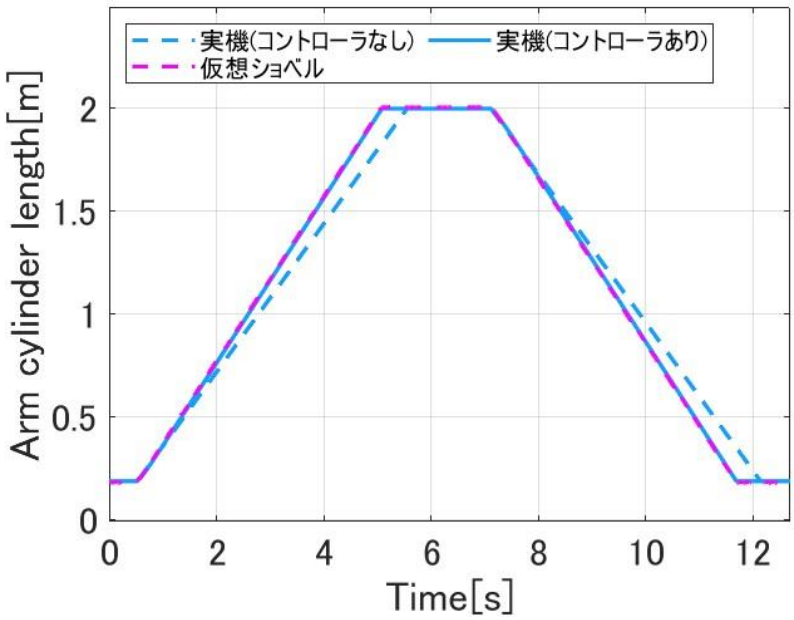


図 4.12 提案手法 2 の検証結果（挙動比較）

しかし，実機に想定外の負荷が作用すると，コントローラでは補正できない差異が生じる可能性がある．そこで，バケットの位置をさらに下降させることで水による負荷を増加させ，実機側に想定外の過大な負荷がかかる条件を再現した．この条件でシミュレーションを行った結果，仮想ショベルと実機のシリンダ長に差異が見られ（図 4.13(a)），実機への操作入力が最大値に達している（図 4.13(b)）ことを確認した．すなわち，コントローラによる補正では対応できない差異が生じたことが示された．よ

って，このようなコントローラの補正限界に対応することが提案手法 2 の課題であることが明らかとなった．

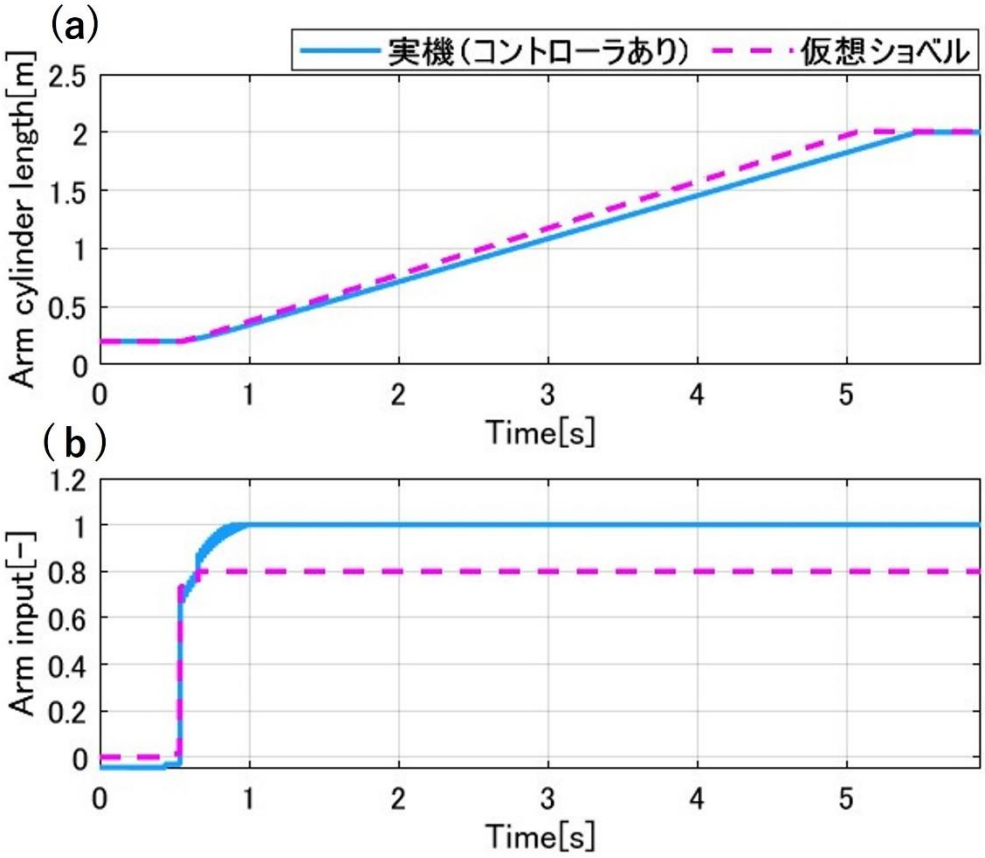


図 4.13 コントローラの補正限界における提案手法 2 の検証結果

4.3.4.3　提案手法 3 の検証結果

提案手法 3 では，コントローラの補正限界への対応を設計方針とし，映像調整器により仮想ショベルの動作を制限する機能を追加した．映像調整器は，実機と仮想ショベルの差異がコントローラの補正限界に達すると，仮想ショベルの動きを制限し，差異の拡大を抑制する．したがって，提案手法 3 の検証においては，コントローラの補正限界が生じる条件をシミュレーション上に再現し，映像調整器の有効性を評価した．その結果を，図 4.14 に示す．映像調整器がない仮想ショベルの動作結果を示す仮想ショベル（調整器なし）のデータにおいては，実機との差異が拡大しているのに対して，映像調整器がある条件のデータを示す仮想ショベル（調整器あり）では，実機との差異の拡大が抑制されていることが確認された（図 4.14(a)）．

さらに，映像調整器が有効となった領域のデータに着目すると，仮想ショベルに対する操作入力は変化していないにもかかわらず，仮想ショベルのシリンダ動作が制限されていることから，映像調整器によって減速処理が行われたことが確認された（図 4.15(a)）．実機への操作入力は最大値となっており，コントローラの補正限界に達していることから，コントローラでは補正が困難な条件において，映像調整器により差異の拡大を抑制できていることが示された（図 4.15(b)）．

これらの結果から，提案手法 3 がコントローラの補正限界に対応できていることを確認することができた．

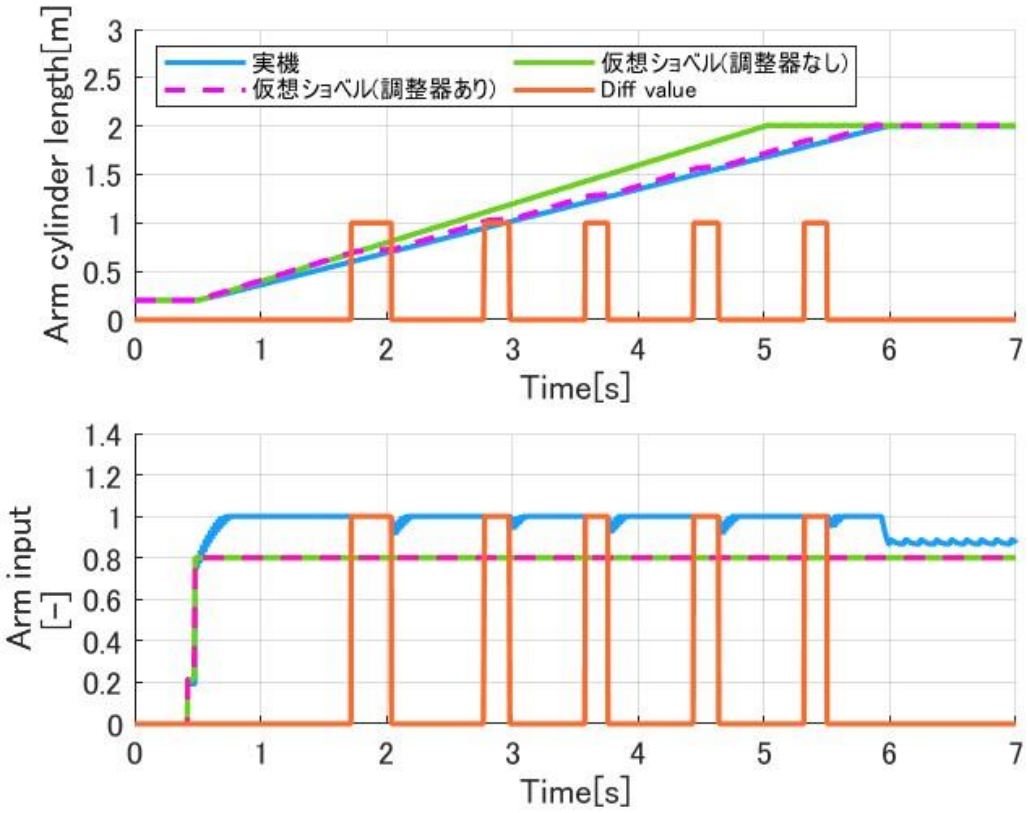


図 4.14 提案手法 3 の検証結果

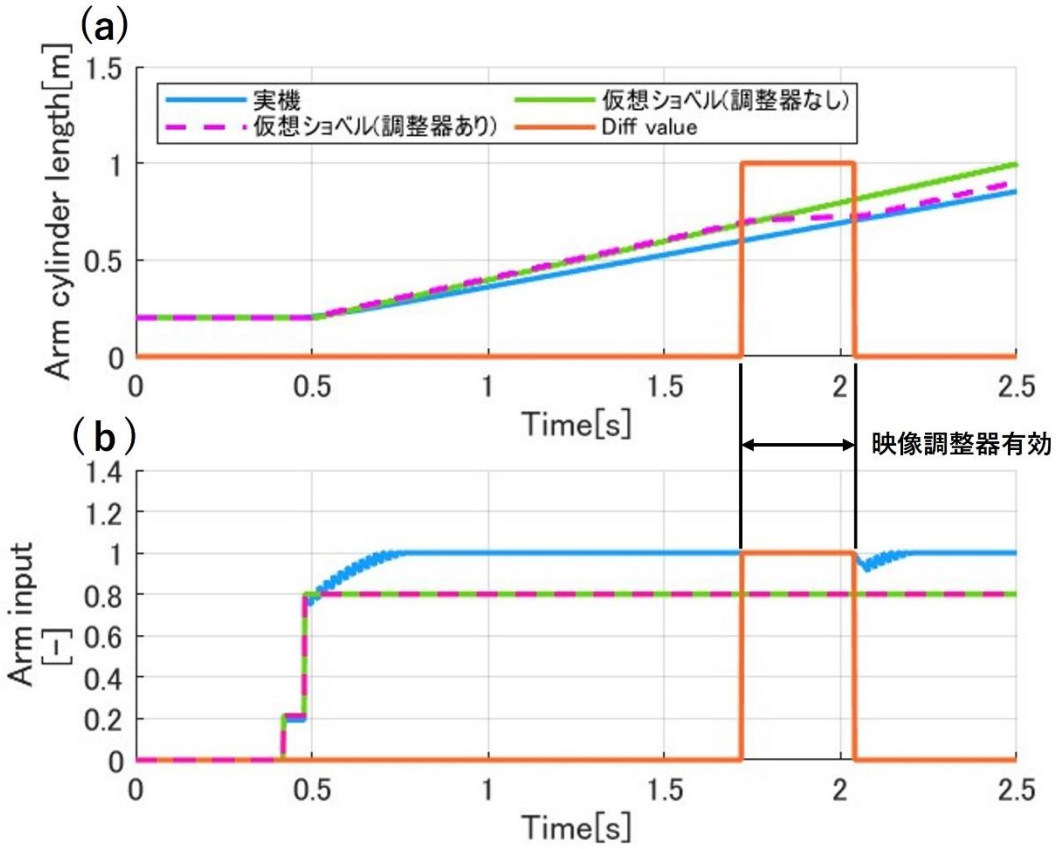


図 4.15 映像調整器による減速処理の検証結果

4.4 本章のまとめ

本章では，第 3 章の実験から得られたむだ時間が操作性に影響する官能要因であるという知見に基づいて，通信遅延の影響を抑止することにより操作性を向上する遠隔操作手法を提案した．本提案手法は，オペレータの操作環境は仮想空間に完結し，操作量のみを実機に送信するため，通信遅延の影響を受けることなく実機を遠隔操作できる．しかし，実用の観点では，両者にはモデル化誤差が生じるため，それを補正するためのコントローラを付加した．さらに，想定外の負荷が実機に作用し，コントローラでは補正できない差異が生じた場合に，仮想ショベルの動作を制限することで，差異の拡大を抑制する機能も付加した．

本提案手法がこれらの設計方針を実現できていることを確認するために，シミュレーションによる検証を実施した．まず，モデル化誤差がない環境で検証を行った結果，オペレータは通信遅延の影響を受けることなく意図どおりに遠隔操作できることを確認した．次に，モデル化誤差がある条件で検証した結果，コントローラによる差

異の補正が可能であることを示した．さらに，コントローラの補正限界の条件では，映像調整器により仮想ショベルに制限を加えることで差異の拡大を抑制することができ，補正限界に対応できることを確認した．これらの結果から，遠隔操作を対象として，操作性に関する官能要因に基づいた官能性能設計手法を示すことができた．

今後の課題として，本手法の実用化に向けたさらなる検討が必要である．例えば，本論文では映像調整器による減速処理の閾値（th_1，th_2）を固定値として設定したが，実際はシリンダ速度に応じて仮想ショベルと実機の差異が変化するため，これらの閾値を速度依存の変数として適応的に設定する必要がある．また，本検証では水中における単軸操作を対象としたが，掘削操作のように負荷が複雑に変動する条件でも検証を実施しなければならない．さらに，映像情報に関する課題として，土の形状変化など作業環境の情報を仮想空間に反映する手法の構築にも取り組んでいきたい．

5　オペレータの経験則を反映した半自動制御手法の提案

5.1　はじめに

本章では，オペレータの経験則を反映した油圧ショベルの半自動制御手法を提案する．第 3 章において，視覚情報が油圧ショベルの操作に影響する官能要因であることを示した．具体的には，すきとり操作において，オペレータは視認したバケットの面積情報からバケット刃先位置を推定し，それに基づいてブームの操作を行っていることが明らかとなった．そこで本章では，これらの知見を踏まえ，ブーム操作におけるオペレータの認知，判断，操作（経験則）を反映したすきとり操作の半自動制御手法を提案する．自動制御と手動制御が共存する半自動制御において，オペレータの経験則を自動制御に反映し，オペレータの自動制御に対する違和感を軽減することで操作性を向上させることを目的とした．本章では，本提案手法についてシミュレーションによる検証を行い，半自動制御を対象とした官能要因に基づく官能性能設計手法を示す.

5.2　制御手法の提案

本章で提案するすきとり操作の半自動制御手法を，図 5.1 に示す．本手法はブームを自動制御し，アームは手動で操作する半自動制御方式である．ブームの自動制御は，①バケットの抽出と刃先位置の推定，および②オペレータモデルによる操作量の決定の 2 要素から構成される．バケットの検出では，オペレータ席に設置した単眼カメラにより取得したオペレータ視点の画像からバケットを抽出し，バケット刃先位置を推定する．さらに，この推定結果に応じて，オペレータモデルがブームの操作量を決定する．一方，アームの操作はオペレータによるマニュアル操作とした．

本研究では，油圧ショベルのシミュレータを用いてデータ計測および検証を行った．5.2.1 節では，本研究で用いた油圧ショベルシミュレータについて，実験装置の詳細を述べる．画像情報からバケットを抽出して刃先位置を推定する機能と，操作量を決定するオペレータモデルについては，それぞれ 5.2.2 節および 5.2.3 節で説明する．

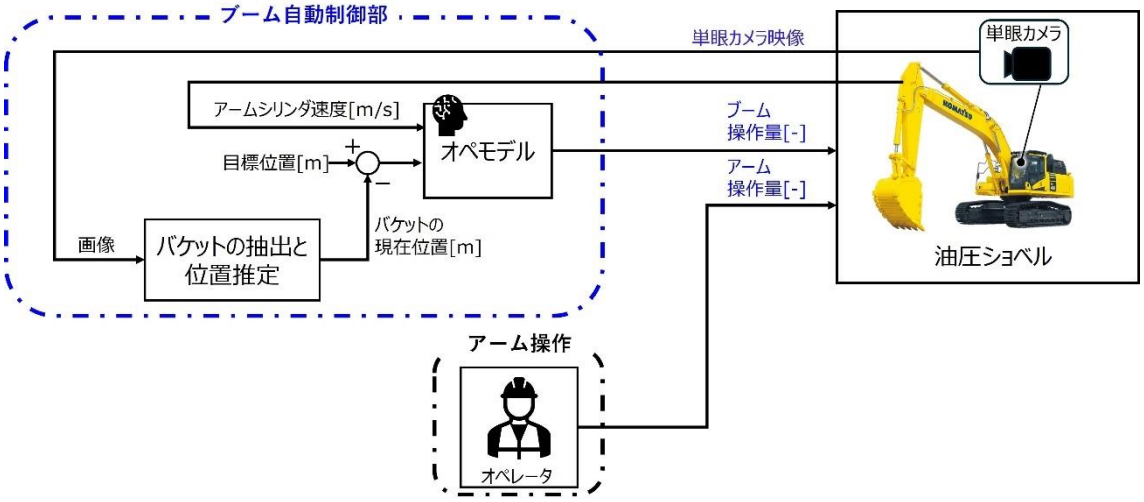


図 5.1 すきとり操作の半自動制御手法

5.2.1 実験装置

本研究では，3.4.2 節の実験と同一のシミュレータを用いた（図 3.35）．オペレータはモニタに表示されたオペレータ視点の映像を見ながら，ゲーム用ジョイスティックにより油圧ショベルを操縦する．

次に，実験に用いた油圧ショベルのモデルについて，概要を説明する．すきとり操作ではレバー操作に応じてブームシリンダとアームシリンダを伸縮させ，バケットの刃先位置を調整する（図 5.2）．したがって，本提案手法はブーム操作とアーム操作の 2 入力で構成されており，ブームは自動制御され，アームは手動で操作する半自動制御方式である（図 5.3）．

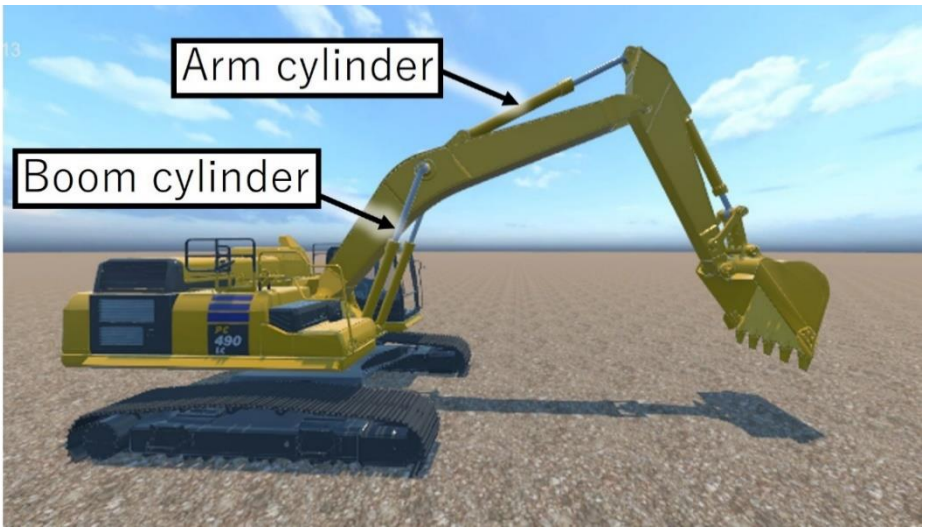


図 5.2 作業機シリンダ

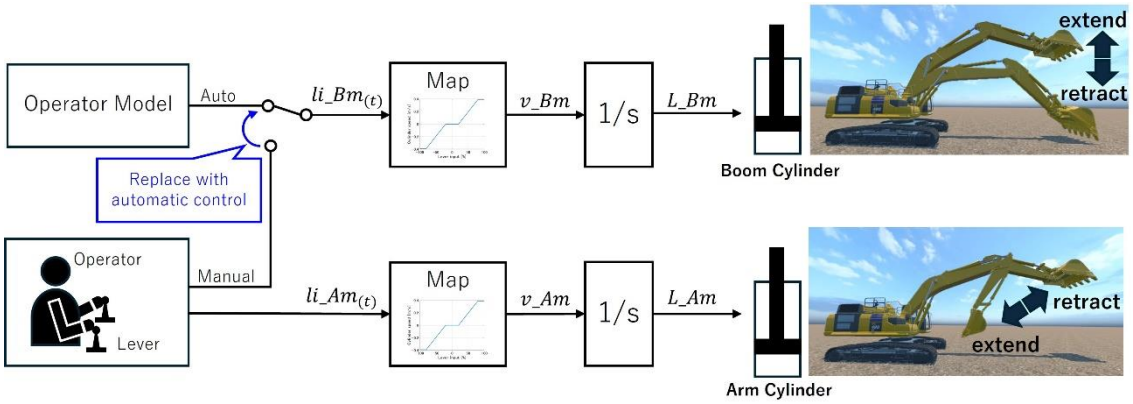


図 5.3 シミュレータの概略図

油圧ショベルのシリンダ速度（v）は，レバー入力（$li_{(t)}$），作業機にかかる負荷，油温などのパラメータ（$Parameters$）を入力とする油圧システムの関数によって決まる（式 5.1）．また，シリンダ長（L）は，シリンダ速度（v）を積分することで算出することができる（式 5.2）．

$$\boldsymbol{v = f_{(li_{(t)}, Parameters)}} \tag{5.1}$$

$$\boldsymbol{L = \int_{t_0}^{t_0+t} v dt} \tag{5.2}$$

本研究では，負荷や油温の変化を考慮しない単純な操作条件を仮定したため，油圧システムへの入力としては，レバー入力（$li_Bm_{(t)}$，$li_Am_{(t)}$）のみを考慮した．さらに，無負荷でシリンダが作動する条件下では，油圧システムの特性により，レバー入力に応じた作動油がポンプから即座にシリンダに供給され，目標速度に到達する．したがって，本研究では図 5.4 に示すレバー入力とシリンダ速度（v_Bm，v_Am）の関係に基づいてシリンダ長（L_Bm，L_Am）を算出し，動的な遅れやむだ時間については考慮しなかった．

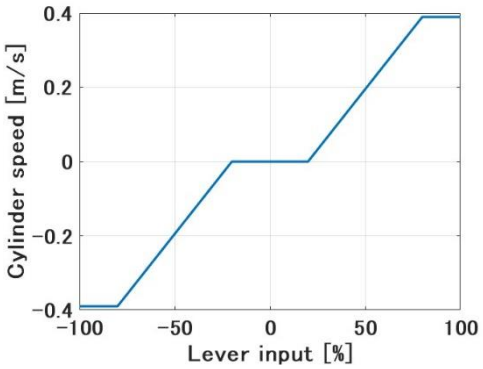


図 5.4 レバー入力とシリンダ速度の関係

5.2.2　バケットの抽出と刃先位置の推定

画像情報からのバケット検出には，セマンティックセグメンテーション[66]を適用した．これは，将来的にバケットだけでなく，ブームやアーム，その他周辺環境の物体も検出することを想定したためである．よって，高い検出精度で知られる畳み込みニューラルネットワーク（CNN）である DeepLab v3+ [67]を適用した．学習データの収集にはシミュレータを用い，すきとり操作中のオペレータ視点の画像データを記録した．本手法の検証では，地上 1.0m の高さを目標面としたため（図 5.5），画像データの取得においては，地上 1.5m までの範囲で目標面を様々に変更してすきとり操作を行わせた．目標面を 1.0m に設定したのは，刃先が地面に接触することで生じるバケット面積の複雑な変動が，バケットの検出精度に影響を及ぼさないようにするためである．学習用の画像データは，すきとり操作中のオペレータ視点の画像を 200ms 間隔で取得し，合計 220 枚の画像を準備した（図 5.6）．このデータを基に学習させた結果，画像上からバケットを問題なく検出できることを確認した（図 5.7）．



図 5.5 検証条件

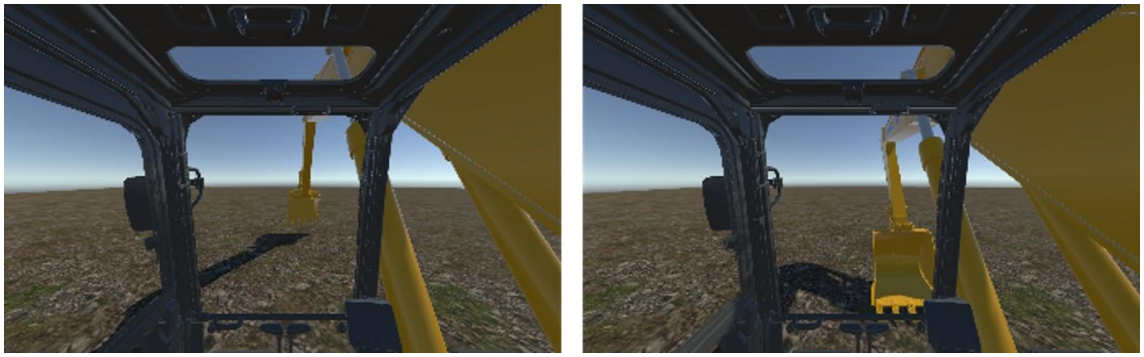


図 5.6 学習用の画像データ

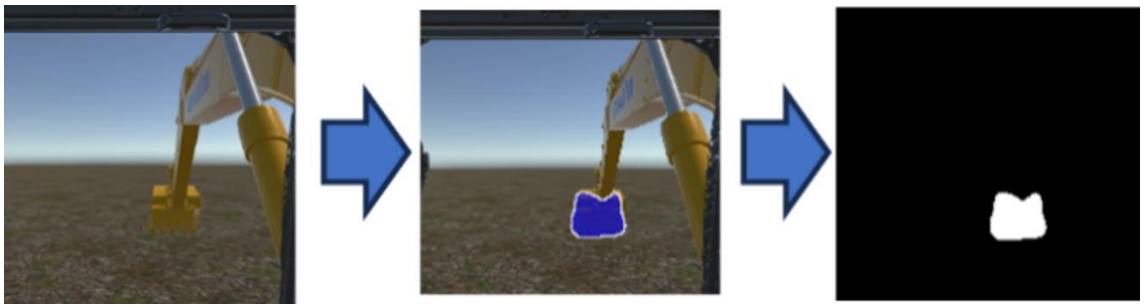


図 5.7 学習モデルによるバケット検出の結果

セマンティックセグメンテーションは，ピクセルごとにクラス分けすることから，バケットと判定した領域のピクセルデータをもとに，バケットの面積と重心位置を算出した．バケットの面積は，バケットと判定されたピクセルの総数とした．よって，n個のピクセルがバケットと判定された場合，バケットの面積（BK_Area）はnとして扱う（式 5.3）．画像上の重心位置（(x_{ctr}, y_{ctr})）は，バケットと認識したすべてのピクセルの平均座標として算出した（式 5.4）．さらに，算出したバケット面積と重心位置の情報から，応答曲面（図 5.8）を用いてバケット刃先の垂直方向の位置を推定した．応答曲面は，学習用データを取得した際に計測したバケット面積，重心位置およびバケット刃先の位置データを用いて作成した．

$$\boldsymbol{BK_{Area} = n} \tag{5.3}$$

$$\boldsymbol{(x_{ctr}, y_{ctr}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \right)} \tag{5.4}$$

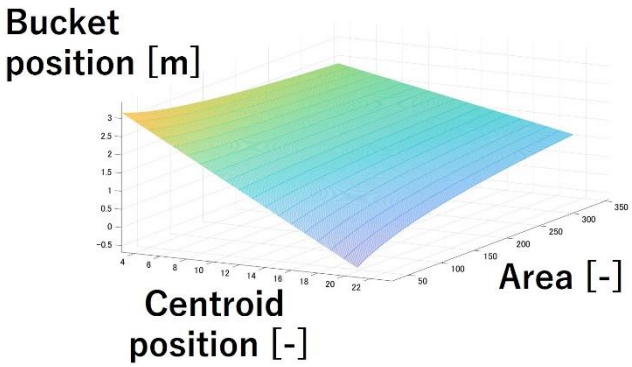


図 5.8 バケット刃先位置推定のための応答曲面

5.2.3　オペレータモデルの作成

推定したバケット刃先位置の情報を基に，ブームの操作量を決定するオペレータモデルを作成した．オペレータモデルに経験則を反映するために，オペレータへのインタビューを実施し経験則を言語化した．その結果，オペレータはバケット刃先位置の情報だけではなく，アームシリンダ速度も考慮してブームを操作していることが明らかとなった．3.4 節でも述べたとおり，すきとり操作においてはアームを単独で操作するとバケット刃先が円弧運動をするため，ブーム操作によりバケット刃先の垂直方向の位置を調整している．バケットを奥から手前に動かす場合，アームのみ操作すると刃先は円弧を描きながら降下し，アームシリンダ速度が速くなると刃先の降下速度も加速する．したがって，アームシリンダ速度が高速の条件では，迅速なブーム操作により刃先位置を上昇させなければ，バケット刃先が地面に食い込んでしまう．このことを，オペレータが経験的に意識して操作していることが，インタビューにより明らかになった（図 5.9）．

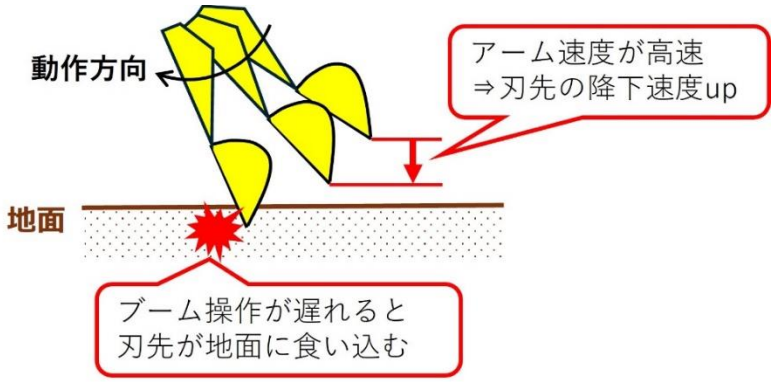


図 5.9 すきとり操作におけるオペレータの経験則

インタビューにより抽出された経験則は，以下のとおりである．なお，オペレータ視点でバケットを奥から手前に動かす条件を前提としている．バケット刃先位置とアームシリンダ速度の各条件に対応する経験則（ルール）をまとめた論理表を，表 5.1 に示す．

Rule 1：バケット刃先が目標位置よりも著しく低い場合，目標位置までの相対距離に比例してブーム上げ操作を行う（Significant boom-up）．

Rule 2：バケット刃先が目標位置よりもわずかに低く，アームシリンダ速度が遅い場合，わずかにブーム上げ操作を行う（Small boom-up）．

Rule 3：バケット刃先が目標位置よりもわずかに低く，アームシリンダ速度が中程度の場合，ブーム上げ操作を行う（Significant boom-up）.

Rule 4：バケット刃先が目標位置よりもわずかに低く，アームシリンダ速度が速い場合，大きくブーム上げ操作を行う（Significant boom-up）.

Rule 5：バケット刃先が目標位置付近であり，アームシリンダ速度が遅い場合，ブーム操作は行わない（Stop boom operation）.

Rule 6：バケット刃先が目標位置付近にあり，アームシリンダ速度が中程度の場合，わずかにブーム上げ操作を行う（Small boom-up）.

Rule 7：バケット刃先が目標位置付近にあり，アームシリンダ速度が速い場合，ブーム上げ操作を行う（Significant boom-up）.

Rule 8：バケット刃先が目標位置よりもわずかに高く，アームシリンダ速度が遅い場合，わずかにブーム下げ操作を行う（Small boom-down）.

Rule 9：バケット刃先が目標位置よりもわずかに高く，アームシリンダ速度が中程度の場合，ブーム操作は行わない（Stop boom operation）.

Rule 10：バケット刃先が目標位置よりもわずかに高く，アームシリンダ速度が速い場合，わずかにブーム上げ操作を行う（Small boom-up）.

Rule 11：バケット刃先が目標位置よりも著しく高い場合，目標位置までの相対距離に比例してブーム下げ操作を行う（Significant boom-down）.

Rule 12：アームシリンダ速度が速い場合，ブーム操作量がやや大きくなるように調整する（Adjustment）.

表 5.1 論理表

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="5">bucket position</td></tr>
<tr><td>Very Low</td><td>Low</td><td>Just</td><td>High</td><td>Very High</td></tr>
<tr><td rowspan="4">arm cylinder speed</td><td>Low</td><td rowspan="3">Rule1</td><td>Rule2</td><td>Rule5</td><td>Rule8</td><td rowspan="3">Rule11</td></tr>
<tr><td>Mid</td><td>Rule3</td><td>Rule6</td><td>Rule9</td></tr>
<tr><td rowspan="2">High</td><td>Rule4</td><td>Rule7</td><td>Rule10</td></tr>
<tr><td colspan="5">Rule12</td></tr>
</table>

バケットの刃先が目標位置よりわずかに低い，わずかに高い，または目標面付近と判断された場合は，アームシリンダ速度を考慮してブームの操作量が決定される．バケットの刃先位置が目標よりわずかに低いと判断される場合，アームシリンダ速度が速くなるにつれてブーム上げ操作量が増加する（Rule2，3，4）．アームシリンダ速度

が速くなるとバケット刃先の降下速度も加速し，刃先位置を迅速に上昇させる必要があるためである．同様に，バケットの位置が目標位置付近と判断される場合，アームシリンダの速度に応じてブーム上げ操作量が調整される（Rule5，6，7）．

バケットの刃先が目標位置よりもわずかに高い場合は，アームシリンダ速度に応じて対応が異なる．アームシリンダ速度が遅い場合は，ブームを下げる操作が行われる（Rule8）．アームシリンダ速度が中程度の場合は，ブーム操作が一時的に停止され，アームの動きによってバケットの刃先が降下するのを待つ（Rule9）．さらに，アームシリンダ速度が速い場合は，バケット刃先の急激な降下を予測し，それを相殺するために迅速にブーム上げ操作を行う（Rule10）．

バケット刃先の位置が目標位置よりも著しく高い，または低い場合は，バケット刃先の目標面に対する相対位置に基づいてブームを操作する（Rule1，11）．さらに，アームシリンダ速度が高速の条件では，ブーム上げ操作量を増量するための補正を行うことで，バケットの急激な降下に対して迅速に対応する（Rule12）．

次に，これらの経験則に基づいて，オペレータモデルを構築した．インタビューの結果に基づき，オペレータモデルの入力はバケット刃先位置とアームシリンダ速度とし，出力はブーム操作量とした．モデル化にはファジィロジックを採用した．人間の判断はあいまいさを有しており，そのようなあいまいさを表現する方法としてファジィロジックで用いられるメンバーシップ関数が有効であると考えたためである．オペレータは，刃先位置に対して「高い」もしくは「低い」といった判断を基にブーム操作量を決定している．しかし，実際の判断は「だいたいこの位置」といったあいまいさを伴い，明確な判断を下すことは困難である．刃先位置の制御に PID 制御を適用することも検討したが，このような人間特有のあいまいさを表現することは困難であった[68]．一方，メンバーシップ関数は定性的な概念を定量化し，あいまいさを表現できるためファジィロジックを適用した．

オペレータモデルの入力情報に対応するメンバーシップ関数を，図 5.10 に示す．オペレータのバケット刃先位置に関する判断（図 5.10(a)），およびアームシリンダ速度に関する判断（図 5.10(b)）をメンバーシップ関数で表現した．図 5.10 における「Just」の領域は，バケット刃先位置が目標位置と一致していると判断する領域を示している．この「Just」領域の非対称性は，オペレータの特性を反映しており，オペレータが目標位置である 1.0m よりもわずかに高い位置を目標として操作した結果を反映

した．表 5.1 の各ルールに対応するブーム操作量のメンバーシップ関数を，図 5.11 に示す．ブーム操作量は，ファジィロジックで一般的によく用いられる Mamdani の推論手法[69]により決定した．

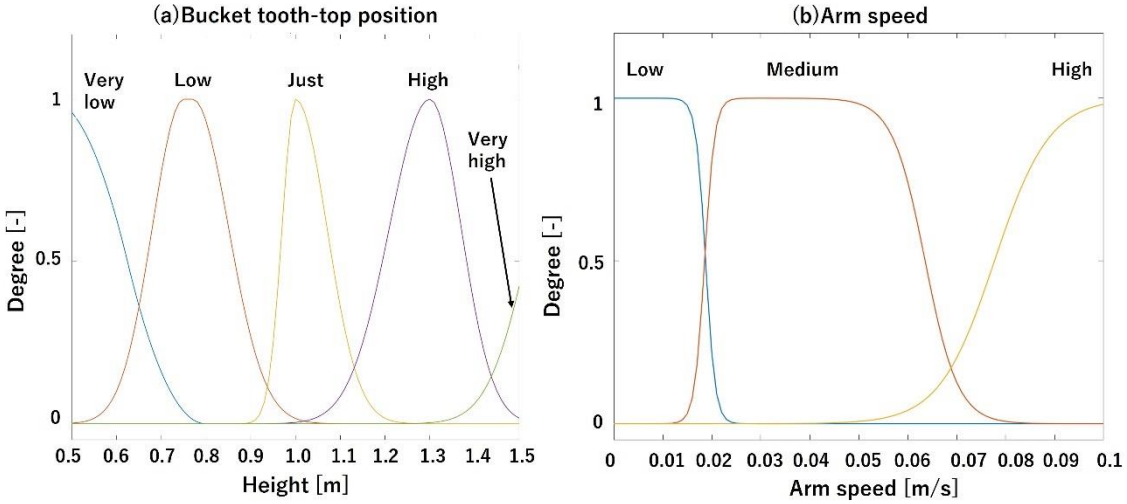


図 5.10 入力のメンバーシップ関数

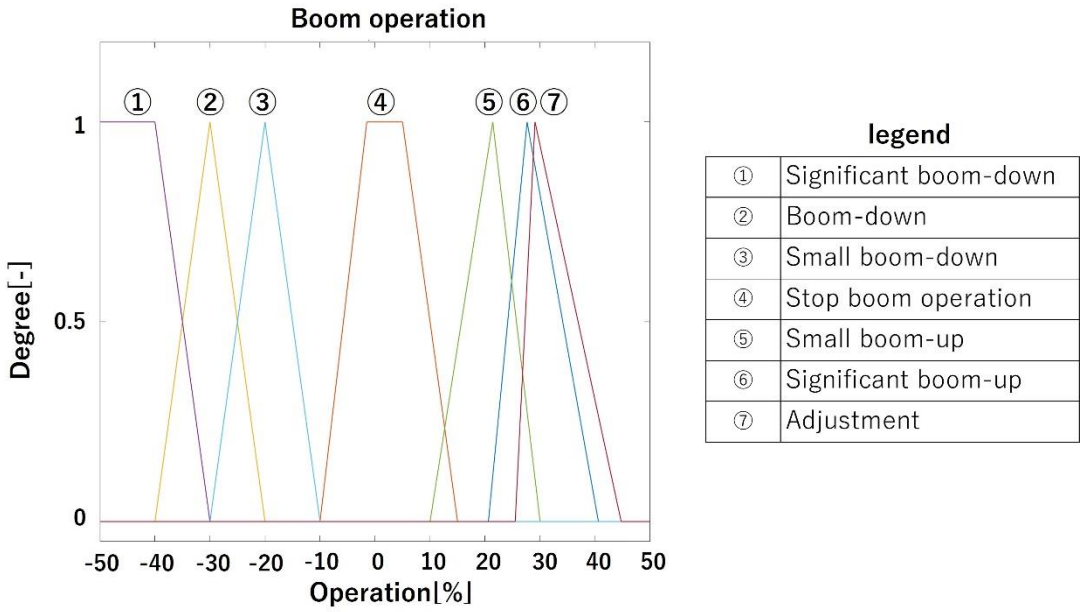


図 5.11 ブーム操作量（出力）のメンバーシップ関数

5.3 提案手法の検証

本章で提案したすきとり操作の半自動制御手法について，シミュレーション検証の概要と結果を以下に述べる．

5.3.1　検証の目的

本検証では，以下の二項目について検証を実施した．

検証 1：提案手法がオペレータの経験則を反映できていること

検証 2：提案手法がマニュアル操作を模擬できていること

本提案手法においては，オペレータに対するインタビューをもとに経験則をモデル化し，半自動制御に適用した．そのため，検証 1 では，これらの経験則に基づいてブームを操作できているかを検証した．さらに，検証 2 として本提案手法がオペレータの操作を模擬できているかを評価し，抽出した経験則の妥当性を検証した．

5.3.2　検証方法

検証には，学習データを取得した環境と同一の油圧ショベルシミュレータを用いた．ブームの自動制御部は，Matlab/Simulink を用いて構築し，入力となるオペレータ視点の画像は TCP/IP 通信によりシミュレータから自動制御部へ送信される（図 5.12）．一方，ブームの操作量は UDP 通信を介して自動制御部からシミュレータへ送信される．

検証において，オペレータはアームのみを操作する．アームシリンダ速度を考慮することは，オペレータの経験則における重要な要素である．そこで，ブームの自動制御部がこの経験則を表現できているかを確認するために，アームシリンダ速度を低速・中速・高速の 3 条件に分け，オペレータにはそれぞれに対応したアームの操作を行わせた．なお，一般的にすきとり操作におけるアーム操作は一定であることから，本検証でもオペレータにはアーム操作を一定に保つよう指示した．また，検証 2 におけるマニュアル操作との比較検証のため，各アームシリンダ速度条件において，オペレータにブームおよびアームを手動で操作させ，マニュアル操作のデータも取得した．

アームシリンダ速度の各条件における操作量は，最大操作量を 100%とした場合，それぞれ 25%（低速），30%（中速），40%（高速）とした．これをアームシリンダ速度に換算すると，それぞれ約 0.030m/s，0.065m/s，0.130m/s となる．図 5.10(b)のメンバーシップ関数に当てはめると，アーム操作量 25%は中速域に該当する．これは，オペレータが低速域のわずかな操作量を維持するのが困難であり，安定したデータを

取得することができなかったことから，中速域に該当する条件を低速条件として扱ったためである．

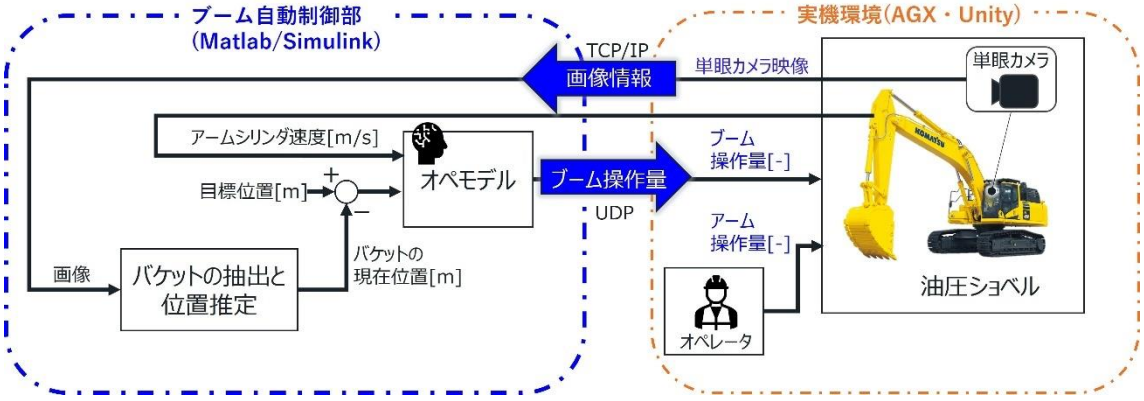


図 5.12 検証環境

5.3.3 検証結果

本章にて提案したすきとり操作の半自動制御手法について，シミュレーション検証の結果を以下に示す．

5.3.3.1 検証 1：経験則の反映に関する検証結果

オペレータへのインタビューから抽出した経験則を，ブームの自動制御に反映できているかを検証した．検証結果として，アームシリンダの速度別に取得したバケット刃先の軌跡およびブーム操作量のデータを図 5.13 と図 5.14 に示す．図 5.13 は，横軸にバケット刃先の奥行き方向の位置，縦軸に垂直方向の位置を示している．一方，図 5.14 では横軸は図 5.13 と同一とし，縦軸にブーム操作量を示している．なお，オペレータ視点で奥から手前にバケットが動くため，グラフ上では右側から左側へバケットが移動する．

オペレータの経験則として，バケットの刃先位置とアームシリンダ速度を考慮した操作が実現できているかを確認するために，5.2.3 節で構築したアームシリンダ速度を考慮するモデル（Fuzzy）と考慮しないモデル（FuzzyNoSpeed）の比較を行った．アームシリンダ速度の条件別にバケット刃先の軌跡を比較した結果，アームシリンダ速度を考慮しないモデルでは，アームシリンダ速度が高速になると頻繁に目標面を下回る傾向が見られた（図 5.13）．一方，アームシリンダ速度を考慮したモデルは，高速条件下でも目標面を大幅に下回ることなく，目標面よりも高い位置を維持できた．この

結果は，アームシリンダ速度が高速の場合，迅速なブーム操作により刃先位置を上昇させる必要があるという経験則が，半自動制御に反映されていることを示している．したがって，検証 1 において，ブームの自動制御にオペレータの経験則を効果的に反映できていることを確認することができた．

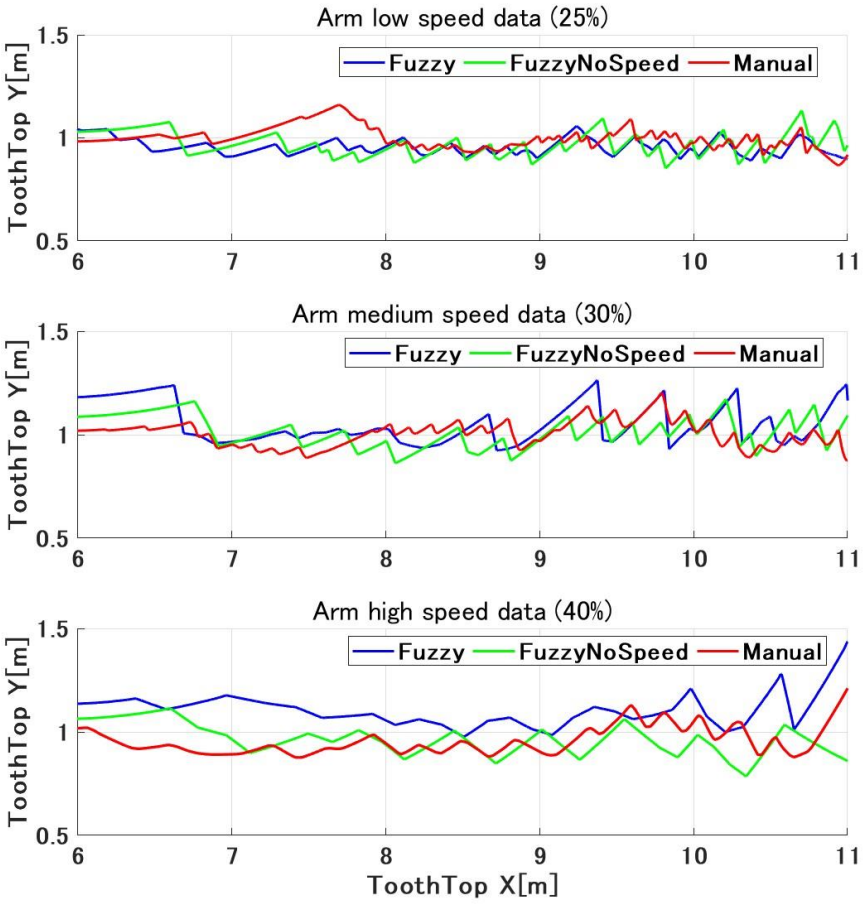


図 5.13 バケット刃先の軌跡

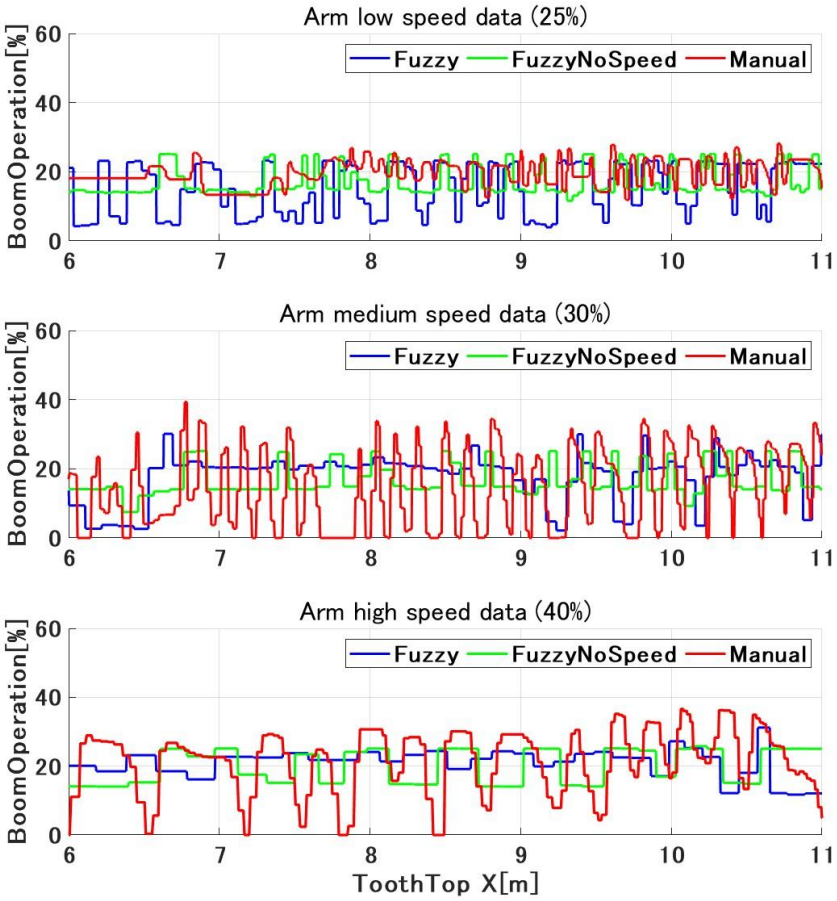


図 5.14 ブーム操作量

5.3.3.2　検証 2：マニュアル操作の模擬に関する検証結果

本提案手法に適用した経験則は，オペレータへのインタビューにより抽出した．その妥当性を評価するために，提案手法とオペレータによるマニュアル操作を比較し，抽出した経験則がマニュアル操作を模擬できているかを検証した．

5.3.3.2.a　マニュアル操作のデータ取得

検証に用いるマニュアル操作のデータは，シミュレータにて取得した．マニュアル操作のデータ計測においては，ブームおよびアームをオペレータに手動操作させた．マニュアル操作のばらつきを考慮するため，オペレータには各アームシリンダ速度条件で 6 回操作を行わせた．データのばらつきが検証に影響を与えないことを確認するために，6 回分の計測データのばらつきを評価した．

マニュアル操作におけるバケット刃先の軌跡データを，図 5.15 に示す．刃先の軌跡データにおいては，6 回分のデータには有意差は見られなかった．一方，ブーム操作量については，6 回分のデータの差異を分析するために，バケット刃先が動いた区間を前半と後半に分けてフーリエ変換を行った（図 5.16～図 5.18）．バケット刃先が動いた区間は，バケット刃先の奥行き方向の位置に基づき前半を 11.0m から 9.5m，後半を 9.5m から 6.0m とした．区間を分けた理由は，先行研究において作動区間を分けて分析した結果，区間によって操作に差異が見られることが示されており[22]，本研究においても同様に差異が生じる可能性があると考えたためである．また，本シミュレータでは，実機と同様に操作量が 20%以下の領域は不感帯であり，ブームの動きに影響を与えない．そのため，フーリエ変換では，20%以下の操作量はすべて一律に 20%とした．

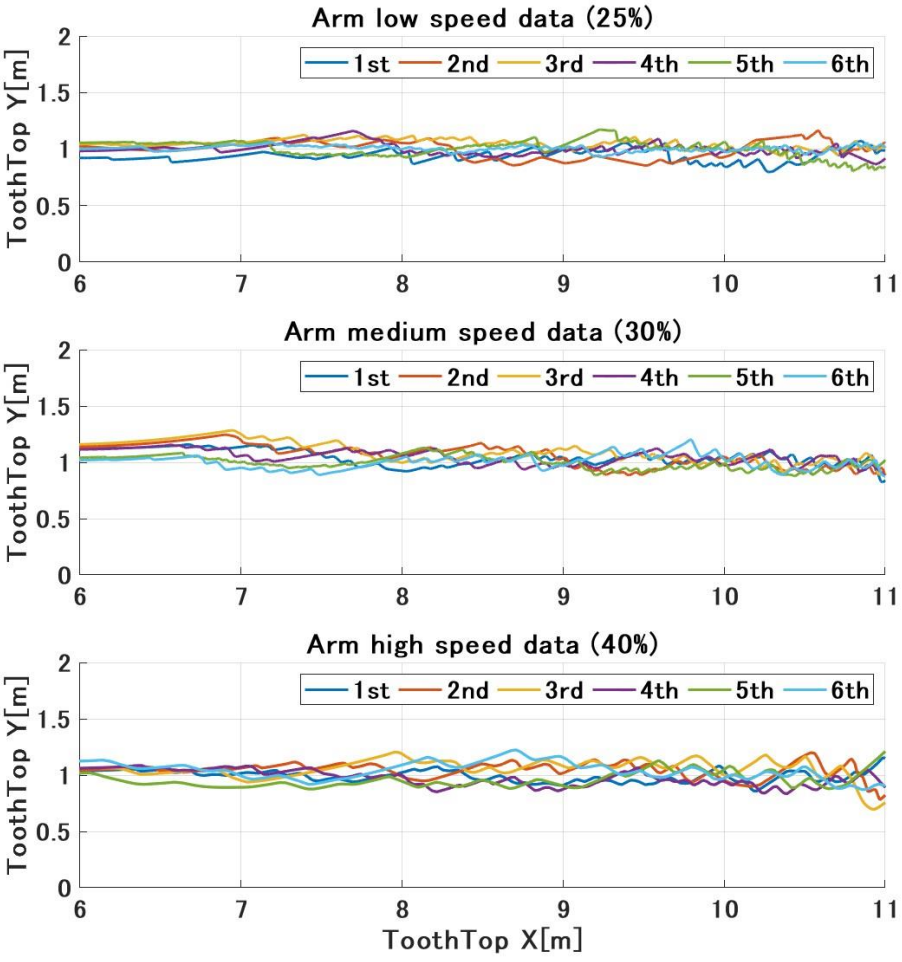


図 5.15 バケット刃先の軌跡（マニュアル操作）

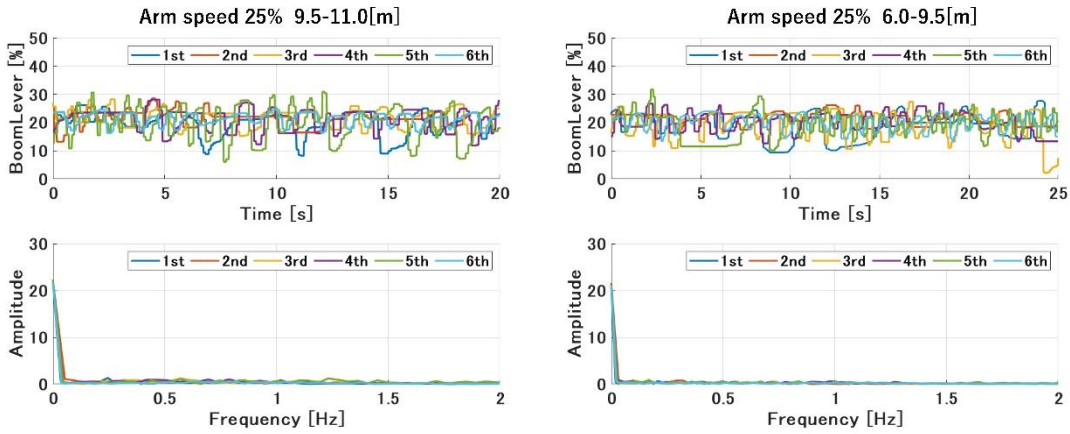


図 5.16 フーリエ変換の結果（アームシリンダ速度低速）

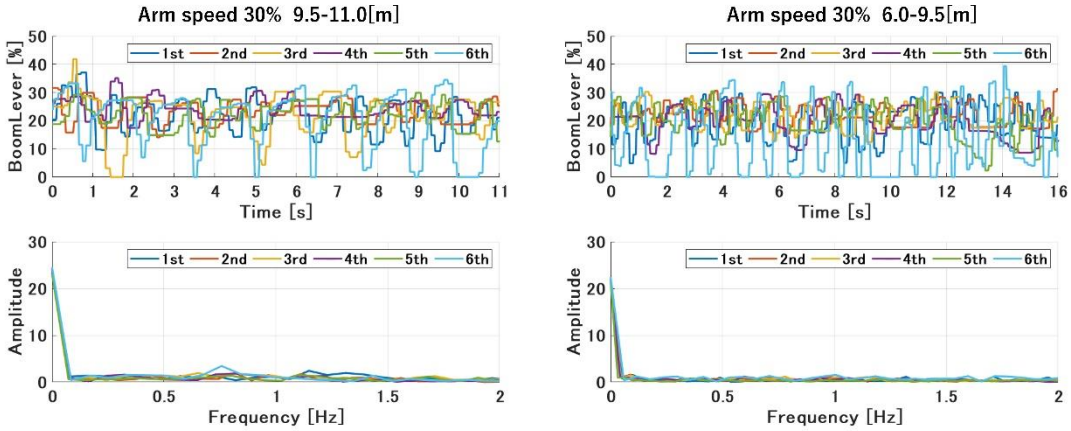


図 5.17 フーリエ変換の結果（アームシリンダ速度中速）

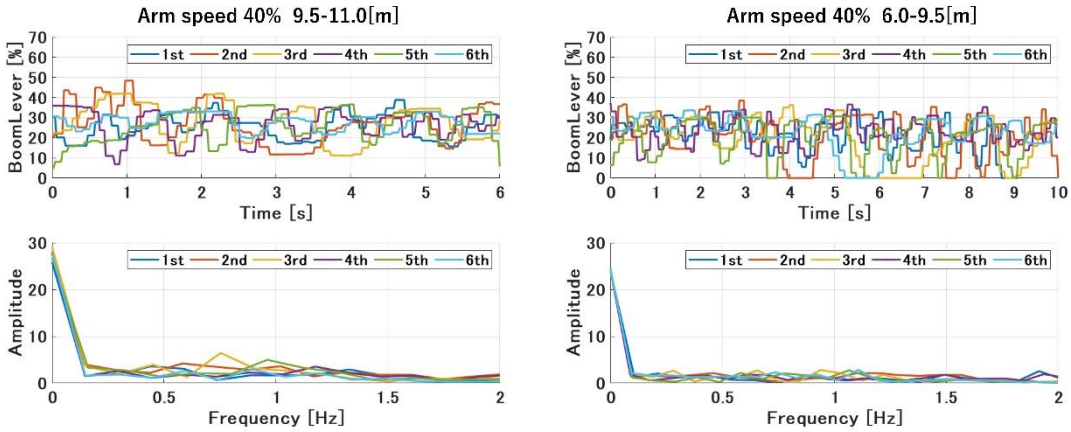


図 5.18 フーリエ変換の結果（アームシリンダ速度高速）

フーリエ変換の結果，アームシリンダ速度が低速（図 5.16）および高速（図 5.18）の条件では，有意差は確認されなかった．一方，中速の条件（図 5.17）では，前半区

間の 6 番目の操作データにおいて，0.8Hz 付近でわずかに大きな振幅が確認された．この影響を評価するために，ブーム操作量を入力，バケット刃先位置を出力とするシステムの周波数応答を示すボード線図を作成した．本実験に用いた油圧ショベルのモデルでは，操作入力に対応した速度を積分してシリンダ長を算出するため，その伝達関数はs^{-1}で表される．したがって，作成したボード線図も，s^{-1}のシステムの特性を示した（図 5.19）．ゲイン線図は 0Hz 付近を基準ゲインとして表示しており，位相はほぼ-90 度で一定に保たれた．シミュレータで計測したデータに基づいて作成したため，理論値との不一致箇所は測定誤差によるものである．また，サンプリング周期を考慮し，ボード線図は正確な測定が可能な範囲で示した．分析の結果，0.8Hz 付近のゲインは 0Hz 付近と比較して十分に減衰しており，油圧ショベルの挙動への影響は非常に小さいと結論付けた．したがって，中速条件においても，6 回分のデータ間に有意差はないと判断した．

さらに，6 回分の操作データについて，作動区間の前半と後半に分けて平均値と標準偏差を算出した結果，標準偏差は平均値に対して非常に小さく，データ間のばらつきは検証に影響しないと判断した（表 5.2）．よって，アームシリンダ速度別に，6 回分のデータから 1 データを抽出し，検証に用いることとした．

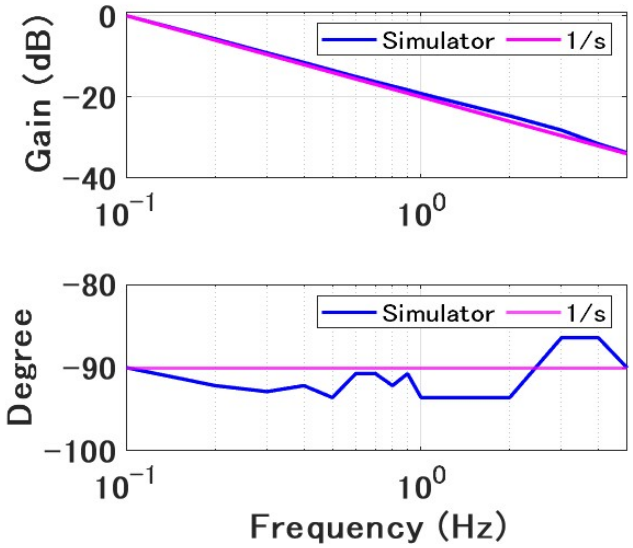


図 5.19 ボード線図

表 5.2 マニュアル操作のばらつきの評価（標準偏差と平均値の比較）

Experimental condition		Boom operation [%]	
Arm speed [%]	Position [m]	Average [%]	Standard deviation[%]
25%	11.0~9.5	20.81	0.70
	9.5~6.0	18.95	1.49
30%	11.0~9.5	22.32	1.16
	9.5~6.0	17.34	2.15
40%	11.0~9.5	26.57	1.19
	9.5~6.0	20.43	1.22

5.3.3.2.b　マニュアル操作との比較検証

オペレータへのインタビューから抽出した経験則の妥当性を評価するために，マニュアル操作との比較検証を実施した．

図 5.13 に示したバケット刃先の軌跡データについて，マニュアル操作（Manual）とオペレータモデルの結果を比較すると，アーム速度を考慮しないモデル（FuzzyNoSpeed）の方が，アーム速度を考慮するモデル（Fuzzy）よりもマニュアル操作に近い軌跡を示した．この結果は，オペレータがブーム操作時にアーム速度を考慮すべきと認識していたにもかかわらず，実際の操作ではその意図を反映できず，バケットの位置情報に依存した操作となったことを示唆している．また，ブームのマニュアル操作には頻繁なオン・オフ操作が見られ，作成したオペレータモデルとは異なる操作方法であった（図 5.14）．特に顕著なオン・オフ操作が見られた中速条件について，操作量のデータを作動区間の前半と後半に分けてフーリエ変換による解析を行った（図 5.20）．その結果，オペレータモデルとマニュアル操作に差異が確認された．これは，オペレータのインタビューではオン・オフ操作に関する情報を抽出できていなかったことによると考えられる．

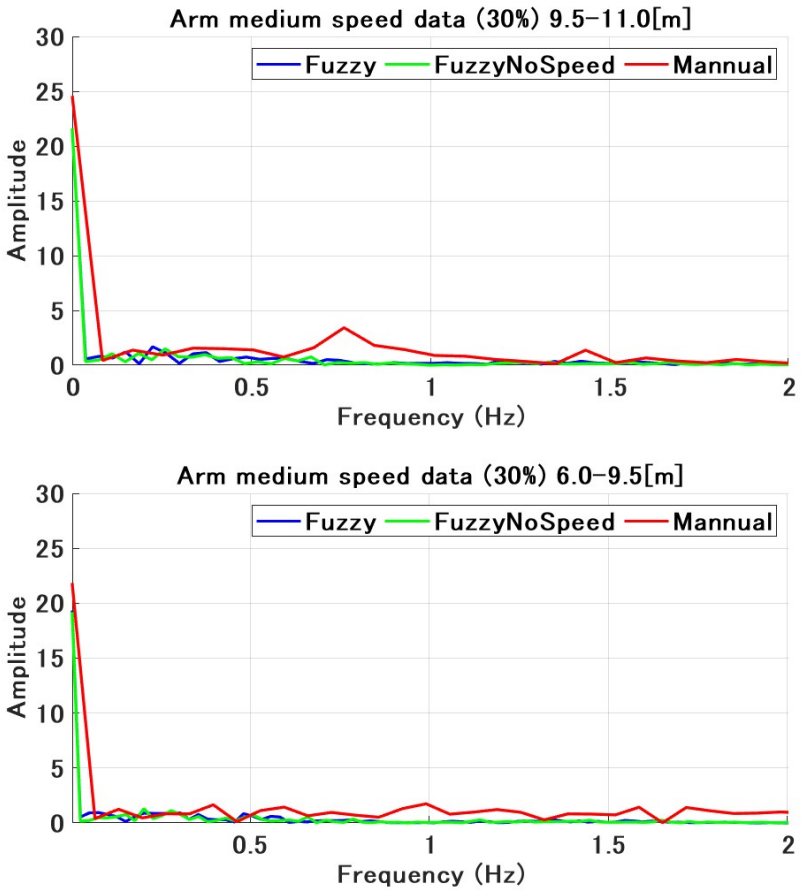


図 5.20 フーリエ変換によるブーム操作の比較

これらの結果から，実際の操作にはオペレータの意識的な経験則と無意識的な経験則の両方が影響していることが示唆された（図 5.21）．バケット刃先位置とアームシリンダ速度を考慮することは，オペレータが認識している経験則である（図 5.21 の経験則 1 と 2）．しかし，実際の操作ではバケット刃先位置の情報のみが効果的に反映されており，アームシリンダ速度を考慮した操作は実施できなかった．これは，オペレータがアームシリンダ速度を考慮すべきと認識していたものの，熟練度や運動能力などの要因により，レバー操作に反映できなかったためだと考えられる．

一方，頻繁なオン・オフ操作はインタビューでは言語化されなかったことから，オペレータが認識していない無意識的な経験則（図 5.21 の経験則 3）であることが示唆された．さらに，無意識的な経験則の中にも，実際の操作に現れていない経験則が存在する可能性がある（図 5.21 の経験則 4）．したがって，本章にて作成したオペレータモデルに，インタビューにより抽出した経験則を反映することができたが，オペレー

タの操作を模擬するという観点では，認識しているにもかかわらず実際の操作で不実行となった経験則や無意識的に操作に影響を与える経験則を明らかにすることが今後の課題である．すなわち，インタビューでは抽出できなかった未知の官能要因が存在し，それらを明らかにすることでオペレータ操作に関する知見をさらに蓄積する必要がある．

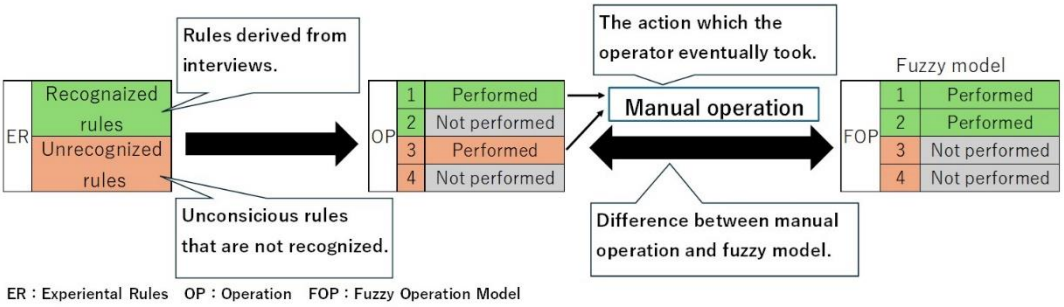


図 5.21 経験則と操作の関係性

5.4 本章のまとめ

本章では，すきとり操作におけるブーム操作にオペレータの経験則を反映した半自動制御手法を提案した．提案手法では，単眼カメラの画像情報からバケットの刃先位置を推定し，その位置情報とアームシリンダ速度に基づいてオペレータモデルが操作量を決定する．操作量の決定に関わる経験則は，オペレータへのインタビューにより言語化し，ファジィロジックを用いてモデル化した．

検証の結果，本提案手法に組み込んだオペレータモデルは，アームシリンダ速度が高速の条件でもバケットの刃先が目標面を下回らないように操作でき，アームシリンダ速度を考慮するという経験則を反映できていることが確認された．これにより，視覚情報が官能要因であるという知見に基づき，具体的な官能性能設計手法を示すことができた．

一方，オペレータモデルとマニュアル操作の結果に差異が見られ，マニュアル操作ではバケット刃先位置の情報に依存しており，アームシリンダ速度を考慮することは意識されていたものの操作に反映されなかった．この要因として，熟練度や運動能力の影響が考えられる．したがって，熟練度に応じたオペレータ操作に関する分析を行うことが今後の課題の一つである．

さらに，頻繁なブームのオン・オフ操作は，インタビューで言語化されず，無意識に操作へ影響を与える経験則であることが示唆された．よって，このような無意識的

な経験則に影響する因子を抽出し，オペレータ操作に関する知見をさらに蓄積することも今後の課題である．

6　総括

本研究では，建設機械における官能性能設計手法の確立を目指し，油圧ショベルの操作性に影響する官能要因を実験的に明らかにした．さらに，得られた知見に基づき，遠隔操作手法および半自動制御手法を構築し，官能性能設計の具体的なフレームワークを示した．

第 1 章では，本研究の背景と目的を明確にした．第 2 章では，関連する先行研究を整理し，それらとの比較を通じて本研究の独自性を示した．

第 3 章では，油圧ショベルの操作に影響する官能要因を抽出するために，単軸操作および複合操作を対象に実験を実施した．その結果，むだ時間と視覚情報が主要な官能要因であることを明らかにした．むだ時間については，むだ時間が大きくなると修正操作の増加とポジショニング精度の低下が見られ，操作性が悪化することが確認された．視覚情報については，油圧ショベルの形状が視覚的な重量感として操作に影響を与えることが明らかとなった．さらに，すきとり操作では，オペレータは視認するバケットの面積変化を基にバケット刃先位置を推定し，ブームの操作量を決定していることが示された．

第 4 章では，むだ時間が官能要因であるという知見に基づき，通信遅延の影響を排する遠隔操作手法を提案した．本手法では，オペレータは仮想空間上の油圧ショベルを操作し，その操作量のみを遠隔地の実機に送信する．操作ループの中に通信遅延が含まれないため，オペレータは通信遅延の影響を受けることなく実機を遠隔操作できる．仮想空間と現実空間のモデル化誤差や想定外の負荷による差異の拡大といった課題が想定されたため，それに対応する機能も追加した．さらに，シミュレーションによる検証を実施し，本手法の有効性を確認した．これにより，遠隔操作を対象として，官能要因に基づく官能性能設計手法を示すことができた．

第 5 章においては，視覚情報が官能要因であるという知見に基づき，すきとり操作の半自動制御手法を提案した．第 3 章の研究により，すきとり操作においてオペレータがバケットの面積情報を基にブームの操作を行っていることが明らかになったことから，これらのブーム操作に関するオペレータの経験則を半自動制御に反映した．すなわち，アームは手動制御とし，ブームは自動制御とする半自動制御手法にオペレータの経験則を反映することで，自動制御に対するオペレータの違和感を低減し，操作

性の向上を図った．本提案手法についても，シミュレーション検証により，オペレータの経験則をブームの自動制御に反映できていることを確認した．これにより，半自動制御を対象として，官能要因に基づく官能性能設計手法を示すことができた．

本研究により，油圧ショベルの操作における主要な官能要因を抽出し，その知見に基づいて遠隔操作手法および半自動制御手法を示すことで，操作性向上を目的とした官能性能設計のフレームワークを示した．これまで，操作性などの官能的な要素を含む性能は，熟練オペレータの経験に依存した直観的な設計が主流であったが，本研究により，官能性能設計を取り込んだ設計アプローチを体系化することができた．

本研究で提案した遠隔操作手法と半自動制御手法を組み合わせることで，半自動制御を含む遠隔操作の操作性向上を目的とした設計検討が可能となる．また，建設機械の作業には多様な種類があり，油圧ショベルだけでも，今回対象とした操作以外に，掘削操作，作業機操作と旋回操作を組み合わせたホイスト旋回など多岐にわたる操作パターンが存在する．これらの操作に対しても，本研究で構築した官能性能設計に関するフレームワークを適用し，官能要因の抽出と，それに基づいた設計を行うことで，操作性のさらなる改善を実現し，官能性能設計を取り込んだ建設機械の設計手法の確立に貢献したい．また，オペレータの熟練度や操作における嗜好を考慮して官能要因を抽出することにより，熟練度や嗜好に応じた官能性能設計も可能となる．さらに，これらのオペレータ操作に関する知見をオペレータモデルとして活用することで，官能性能のバーチャル設計を実現し，MBD の適用による品質の向上と開発の効率化にも貢献していきたい．

参考文献

[1] 藤川智士, “マツダの目指すモデルベース開発,” マツダ技報, No.31, pp.44-47 (2013)
[2] 大畠明, “プラントモデリングの地平線,” 計測と制御, Vol.53, No.4, pp.272-277 (2014)
[3] Y. Saito, “Unfortunate MBDs: Engineers and their Inappropriate Model-Based Development/Design,” Kindle (2024)
[4] K. Obayashi, Y. Hasama, Y. Saito, “A method of predicting the time to fill the hydraulic pipeline considering variance,” Proceedings of the 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (2017)
[5] 新谷規, 齋藤芳明, 桐谷友輔, 大澤貞幸, 大林薫, “1DCAE を用いた油圧ショベルの性能開発へのモデルベース開発の適用,” Komatsu Technical Report, Vol.67, No.174 (2021)
[6] 山口静子, “官能評価とは何か, そのあるべき姿,” 化学と生物, Vol.50, No.7 ,pp.518-524 (2012)
[7] 武井一剛, 石黒陸雄, “乗員の官能評価にもとづく乗り心地評価,” 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.30, No.3 pp.47-56 (1995)
[8] 小岩井一茂, 宮嵜龍之介, 山本透, 上田浩司, 山下耕治, 山崎洋一郎, “制御工学的視点に基づく油圧ショベル操作における応答性評価指標の構築,” 電気学会論文誌 C, Vol.138, No.5, pp.506-511 (2018)
[9] 宮田圭介, “建設機械の「座」,” バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.1, pp.22-25 (2007)
[10] 川口正隆, 西村正治, “聴覚特性に基づく建設機械の音質評価に関する研究,” 日本機械学会論文集 C 編, Vol.61, No.584, pp.1509-1515 (1995)
[11] R. Filla, “Study of a method for assessing operability of working machines in physical and virtual testing,” International Journal of Vehicle Systems Modeling and Testing, Vol.7, No.3, pp.209-234 (2012)
[12] 伊藤卓, “現場・働き方を変える建設機械の遠隔化(<特集>建設機械の最新動向),” 日本機械学会誌, Vol.127, No.1272, pp.12-15 (2024)

[13] 山田宏尚, “建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインタフェース,” 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp.400-403 (2015)
[14] 吉灘裕, “遠隔操作性と微細作業性を備えた建設ロボット,” 計測と制御, Vol.57, No.11, pp.795-798 (2018)
[15] 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一, “油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案,” 建設機械施工, Vol.66, No.8, pp.71-79 (2014)
[16] 島村直武, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義, “油圧駆動型建設ロボットの高臨場感遠隔操縦のための力覚フィードバック,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2023)
[17] 原田純仁, “ICT ブルドーザと ICT 油圧ショベルの開発,” 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.523-526 (2016)
[18] 齋藤芳明, “モデルベース開発におけるシミュレーション挙動を 3 次元映像化することの有効性,” 自動車技術, Vol.77, No.2, pp.62-70 (2023)
[19] 浅野貴文, 土屋康祐, 柏倉賢二, 川口拓真, 志村春樹, 新僚介, 金子隆, 金堀凌也, “機械学習を用いたドライバビリティ官能評価の開発,” 自動車技術会論文集, Vol.55, No.6, pp.1214-1219 (2024)
[20] 田島尚史, 新谷浩平, 尾越敦貴, 北野翔太, 岩田基史, “機械学習を用いた車両ドライバビリティ性能の自動評価法,” 日本機械学会論文集, Vol.88, No.915 (2022)
[21] R. Filla, “Quantifying Operability of Working Machines,” Ph.D. dissertation, Linköping University (2011)
[22] 齋藤芳明, 川島一将, 平川正人, “バーチャル空間における運転関連要素がユーザの振る舞いに与える影響に関する調査的研究,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J103-D, No.12, pp.860-870 (2020)
[23] Y. Saito, K. Kawashima, M. Hirakawa, “Acquisition of the Width of a Virtual Body through Collision Avoidance Trials,” IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E104-D, No.5, pp.741-751 (2021)
[24] Y. Saito, K. Kawashima, M. Hirakawa, “Effectiveness of a Head Movement Interface for Steering a Vehicle in a Virtual Reality Driving Simulation,” Symmetry, Vol.12, No.10 (2020)

[25] 久武経夫, 中里邦子, “建設機械等の遠隔施工と電波利用,” 建設の施工企画, 5 月号, pp.33-39 (2012)
[26] 伊藤禎宣, 坂野雄一, 藤野健一, 安藤広志, “無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.1, pp.15-24 (2017)
[27] A. Nishiyama, M. Moteki, K. Fujino, T. Hashimoto, “Operation Analysis of Hydraulic Excavator with Different Operation System,” Proceedings of the 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2016)
[28] J. Prakash, M. Vignati, D. Vignarca, E. Sabbioni, F. Cheli, “Predictive Display With Perspective Projection of Surroundings in Vehicle Teleoperation to Account Time-Delays,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.24, No.9, pp.9084-9097 (2023)
[29] Y. Zheng, M. J. Brudnak, P. Jayakumar, J. L. Stein, T. Ersal, “A Delay Compensation Framework for Predicting Heading in Teleoperated Ground Vehicles,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.24, No.5, pp.2365-2376 (2019)
[30] M. J. Brudnak, “PREDICTIVE DISPLAYS FOR HIGH LATENCY TELEOPERATION,” Proceedings of the 2016 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (2016)
[31] J. Prakash, M. Vignati, E. Sabbioni, F. Cheli, “Vehicle Teleoperation: Human in the Loop Performance Comparison of Smith Predictor with Novel Successive Reference-Pose Tracking Approach,” Sensors, Vol.22, No.23, (2022)
[32] F. E. Chucholowski, “Evaluation of Display Methods for Teleoperation of Road Vehicles,” Journal of Unmanned System Technology, Vol.3, No.3, pp.80-85 (2015)
[33] Y. Okawa, M. Ito, R. Sekizuka, S. Saiki, Y. Yamazaki, Y. Kurita, “An Assistive Interface of a Teleoperation System of an Excavator by Overlapping the Predicted Position of the Arm,” Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2020)
[34] 堀謙太, 黒田知宏, 小山博史, 高橋隆, “Surgical Cockpit System―遠隔手術における統合情報支援システムの標準化―,” 医療情報学, Vol.21, No.5, pp.333-340 (2001)

[35] 近藤大祐, “建設機械の遠隔操作のための視覚提示システム,” 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.10, pp.687-691 (2018)
[36] H. Yamada, X. Tang, T. Ni, D. Zhao, A. A. Yusof, “Tele-operation Construction Robot Control System with Virtual Reality,” IFAC Proceedings Volumes, Vol.42, No.16, pp.639-644, (2009)
[37] T. Tanimoto, K. Shinohara, H. Yoshinada, “Research on effective teleoperation of construction machinery fusing manual and automatic operation,” ROBOMECH Journal, Vol.4, No.14 (2017)
[38] 谷本充隆, 新井史人, 福田敏男, 高橋郁夫, 根来真, “遠隔治療システムにおける力覚提示による安全性・操作性の向上,” 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.647, pp.2331-2338 (2000)
[39] X. Tang, D. Zhao, H. Yamada, T. Ni, “Haptics interaction in tele-operation control system of construction robot based on virtual reality,” Proceedings of the 2009 International Conference on Mechatronics and Automation (2009)
[40] D. Zhao, Y. Xia, H. Yamada, T. Muto, “Presentation of Realistic Motion to the Operator in Operating a Tele-operated Construction Robot,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.2, pp.98-104 (2002)
[41] 横小路泰義, “極限作業ロボットのための遠隔操縦技術,” 日本ロボット学会誌, Vol.39, No.6, pp.510-516 (2021)
[42] 小澤一雅, “i-Construction システム学が拓く次世代建設生産システム,” 計測と制御, Vol.61, No.9, pp.631-635 (2022)
[43] 中川智裕, “建設機械の GNSS を利用した自動化に関する事例紹介,” 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.7, pp.593-597 (2019)
[44] 高橋宏, “ドライバの個性を考慮した運転支援制御,” 計測と制御, Vol.45, No.3, pp.237-242 (2006)
[45] 三浦悟, “建設機械の自動化を核とした土木施工システムの変革,” 鹿島技術研究所年報, 第 63 号 (2015)
[46] 永谷圭司, 橋本毅, 須藤真琢, 千田有一, 大須賀公一, 浜本研一, “不確かで変動する環境に適応できるシステムの設計論,” 計測と制御, Vol.61, No.9, pp.676-683 (2022)

[47] 大須賀公一, “建設機械の「開いた設計」とは？,” 計測と制御, Vol.61, No.9, pp.684-687 (2022)
[48] 岡田共史, “モデルとデータを活用した自動運転ショベルのオンライン環境適応に関する研究,” 博士論文, 広島大学 (2023)
[49] 戸松匠, 野中謙一郎, 関口和真, 鈴木勝正, “油圧ショベルにおけるモデル予測追従制御の基礎実験（未知物体押しのけに起因する掘削形状からの逸脱の抑制）,” 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.49, No.1, pp.1-9 (2018)
[50] 安本雅啓, “建設機械の自動化（自動操縦）を実現する AI の開発,” 建設機械施工, Vol.73, No.1, pp.73-77 (2021)
[51] J. Huh, J. Bae, D. Lee, J. Kwak, C. Moon, C. Im, Y. Ko, T. K. Kang, D. Hong, “Deep Learning-Based Autonomous Excavation: A Bucket-Trajectory Planning Algorithm,” IEEE Access, Vol.11, pp.38047-38060 (2023)
[52] D. A. Bradley, D. W. Seward, “The Development, Control and Operation of an Autonomous Robotic Excavator,” Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.21, pp.73-97 (1998)
[53] 菅野道夫, “ファジィ理論の展開,” サイエンス社 (1989)
[54] S.-W. Hsiao, “Fuzzy logic based decision model for product design,” International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.21, No.2, pp.103-116 (1998)
[55] 鮫島誠, 藤井敏, 末岡淳男, “ファジィ理論による油圧ショベルの自動掘削,” 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.650, pp.3328-3335 (2000)
[56] P.J.A. Lever, F.-Y. Wang, D. Chen, “A fuzzy control system for an automated mining excavator,” Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1994)
[57] 菅野道夫, “ファジィ制御とその産業応用,” 繊維製品消費科学, Vol.30, No.4, pp.160-164 (1989)
[58] E. T. Hall（著）, 日高敏隆, 佐藤信行（訳）, “隠れた次元,” みすず書房 (1970)
[59] P. J. A. Lever, F.-Y. Wang, X. Shi, D. Chen, “A fuzzy-behavior-based approach for controlling mining excavator bucket/rock interactions,” Proceedings of the 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (1994)

[60] P. Saeedi, P. D. Lawrence, D. G. Lowe, P. Jacobsen, D. Kusalovic, K. Ardron, P. H. Sorensen, “An autonomous excavator with vision-based track-slippage control,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.13, No.1, pp.67-84 (2005)
[61] 中西英二, 南原興二, “操作量にむだ時間を有する多変数時変系に対する Smith Predictor の一設計法,” Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.16, No.6, pp.846-851 (1980)
[62] 須田信英, “PID 制御,” 朝倉書店 (1992)
[63] 小菅一弘, 古田勝久, 横山竜昭, “ロボットの仮想内部モデル追従制御系―メカニカル・インピーダンス制御への応用―,” 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.1, pp.55-62 (1988)
[64] 平田研二, 小木曽公尚, “拘束条件の達成を考慮したリファレンスガバナの実現,” システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.11, pp.554-559 (2001)
[65] 梶本裕之, “感覚受容器刺激による力覚提示,” 計測と制御, Vol.62, No.8, pp.478-483 (2023)
[66] S. S. M. Salehi, D. Erdogmus, A. Gholipour, “Tversky Loss Function for Image Segmentation using 3D Fully Convolutional Deep Networks,” Proceedings of the Machine Learning in Medical Imaging, pp.379-387 (2017)
[67] L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, H. Adam, “Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation,” Proceedings of the European Conference on Computer Vision, pp.801-818 (2018)
[68] 大林薫, 齋藤芳明, 挾間優佳, 宮原遊人, 大須賀公一, “単眼カメラ画像から推定したバケットのポジションの半自動化への適用,” 第 67 回自動制御連合講演会講演論文集 (2024)
[69] E. H. Mamdani, “Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant,” Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.121, No.12 (1974)

研究業績

3 章	3.3 節	論文	大林薫, 齋藤芳明, 大須賀公一, “油圧ショベルの操作性に影響する設計要件の検討,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J108-D, No.10, pp.562-585 (2025) DOI: 10.14923/transinfj.2024JDP7036
	3.4.1 節	ポスター発表	大林薫, 齋藤芳明, 大須賀公一, “建設機械の操作性向上を目指した制御手法の検討,” 第 11 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (2024)
	3.4.2 節	口頭発表および論文	K. Obayashi, Y. Saito, K. Osuka, “Investigation of the Correlation of Image Information Acquired by Operator During Operation of Construction Machinery and Operation Input,” Proceedings of the 2024 SICE Festival with Annual Conference (2024)
4 章	-	ポスター発表および論文	ポスター発表 大林薫, 齋藤芳明, 大須賀公一, “建設機械の操作性向上を目指した制御手法の検討,” 第 11 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (2024) 論文 大林薫, 齋藤芳明, 大須賀公一, “バーチャル環境を用いた建設機械の制御手法の提案―遠隔操作における通信遅れの影響抑制―,” 電子情報通信学会論文誌 D (2026)掲載予定
5 章	-	論文	K. Obayashi, Y. Saito, K. Osuka, Y. Miyahara, “Proposal for semi-automatic control reflecting operator heuristics using fuzzy logic and image detection with monocular camera images,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (2025) DOI: 10.1080/18824889.2025.2513738

謝辞

本研究を進めるにあたって，多大なるご指導を賜りました大阪工業大学ロボティクス＆デザイン工学部　大須賀公一教授に深く感謝いたしますとともに，お礼を申し上げます．研究計画の立案や論文執筆など，すべての側面において未熟な点が多々ありましたが，丁寧かつ温かいご指導を賜り，研究活動の難しさだけでなく，その面白さや楽しさを感じることができました．これは企業活動だけでは得られなかった貴重な経験であり，今後の大きな糧となりました．

また，本学位論文をまとめるにあたり，多くのご助言を賜りました大阪大学工学研究科　石川将人教授，井野秀一教授，東森充教授に深く御礼申し上げます．

博士課程への進学を支援してくださった齋藤芳明氏には，研究計画から論文執筆まで多大なるご助力を賜りましたこと，深甚なる謝意を表します．実験や分析を支援してくださった挾間優佳氏，大澤貞幸氏，宮原遊人氏にも，心より厚く御礼申し上げます．

最後に，研究生活を温かく見守り，応援してくれた家族に，深く感謝申し上げます．