

人間の認知プロセスに着目した  
遠隔操作油圧ショベルにおける乗り換えの  
影響を軽減するインターフェースに関する研究

(Research on an Interface that Reduces the Effect of  
Switching in Teleoperated Hydraulic Excavators  
Focusing on Human Cognitive Processes)

広島大学 先進理工系科学研究科

電子システム制御プログラム

D213216 永井 政樹

2024年7月



# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.2	遠隔操作油圧ショベルに関する取り組みと課題	4
1.3	本論文の章構成	5
<b>第2章</b>	<b>遠隔操作油圧ショベルにおける動特性情報提示インターフェース</b>	<b>7</b>
2.1	緒言	7
2.2	提案手法	9
2.3	実機検証	12
2.3.1	実験システムの構築	12
2.3.2	実験プロトコル	13
2.3.3	実験結果	16
2.3.4	考察	17
2.4	静止画による動特性提示手法	20
2.5	シミュレータを用いた検証	21
2.5.1	シミュレータの構築	21
2.5.2	実験プロトコル	22
2.5.3	試験結果	27
2.5.4	考察	28
2.6	結言	32
<b>第3章</b>	<b>遠隔操作油圧ショベルにおけるアタッチメント関節負荷率フィードバック</b>	<b>35</b>
3.1	緒言	35
3.2	提案手法	37
3.2.1	アタッチメント関節負荷率の定義	37
3.2.2	アタッチメント関節負荷率のフィードバック方法	39
3.3	シミュレータを用いた検証	41
3.3.1	シミュレータの構築	41
3.3.2	実験プロトコル	46
3.3.3	実験結果	49
3.3.4	考察	51

3.4 結言 .....	54
<b>第4章 結論</b>	<b>59</b>
参考文献	64
引用既発表論文	70
謝辞	71



# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

現在の日本では、少子高齢化に伴う労働力不足が問題となっている。生産年齢人口（15～64歳人口）は、平成7（1995）年の国勢調査で8,726万人でピークを迎えた以降減少局面に入り、令和2（2020）年国勢調査によると7,509万人となっている。出生中位推計の結果によれば、2062年には生産人口は5,000万人を割り、2070年には4,535万人まで減少すると言われている [1]。そのため、日本の労働生産性の向上が必要である。この人材不足がより顕著なのが建設業である。建設業界では高齢化の進行が他の産業と比較して著しく、令和2年現在で全産業にける55歳以上の割合が31.1%、29歳以下の割合が16.6%であるのに対して、建設業における55歳以上の割合が36.0%、29歳以下の割合はわずか11.6%となっている [3]。特に60歳以上の技能者は全体の4分の1となっており、10年後にはその大半が引退するともいわれている。この理由として、建設業では3Kと呼ばれる「きつい」「汚い」「危険」というイメージが定着しており、新規入職者が参入しづらくなっていることが挙げられる。そのような現状の中、社会インフラの老朽化が今後急速化する懸念や、インフラニーズの高度化から、今まで以上の生産性が求められている。このことから、現場の働き方改革による若手入職者の確保、そしてそれによる生産性向上が必要となる。

こうしたことを受けて国土交通省では、建設現場への新技術の導入による生産性の向上と併せて、現場の環境改善など魅力ある建設現場の創出に向けた施策の促進を図り、新3K（給与が良い・休暇が取れる・希望がもてる）の魅力ある建設現場への改善を推進している [5]。国土交通省では、2016年度よりi-Constructionという取り組みを推進している [6]。i-Construction

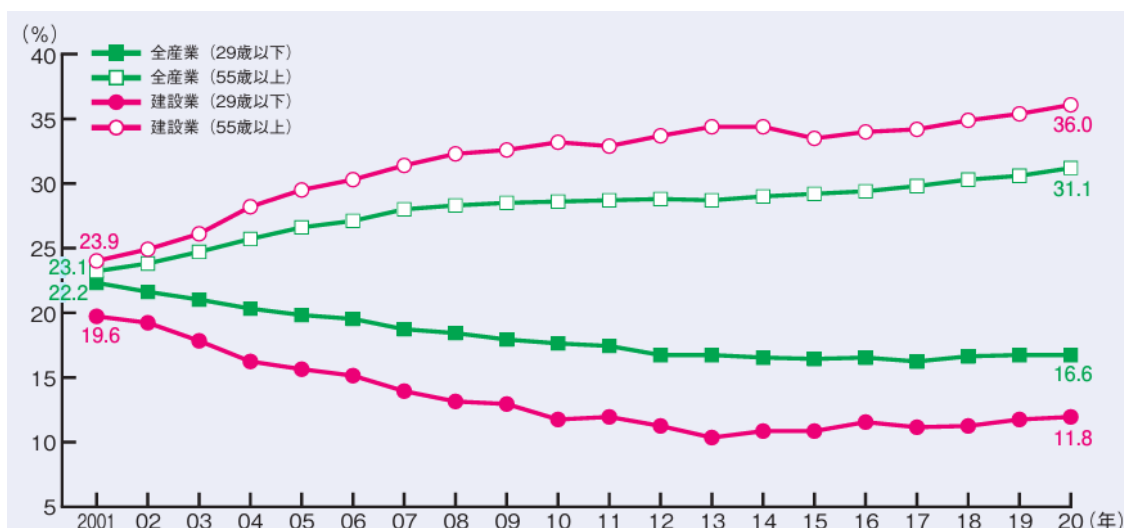


Fig. 1.1: Number of workers for construction fields[4].

とは、測量から施工、検査に至る建設プロセスで3次元データを活用し、ドローンによる3次元測量や、ICT建機を用いた施工によって、必要な技能労働者の減少分を省人化によって補完するとともに、作業の効率化により工事日数を削減し、建設プロセス全体の生産性向上を目指すものである。さらに2020年からは、インフラ分野におけるデジタル化・スマート化を強力に推進するための取り組みとして、インフラ分野のDX化を推し進めている[7]。これは、近年普及・拡大しつつあるデータやデジタル技術を建設業に取り込むことで、i-Constructionの目的である建設現場の生産性の向上に加え、業務や働き方を変革することを目的とした取組である。これら施策により、従来の3Kイメージの払しょくにより、多様な人材を呼び込むことで人で不足が解消され、さらにデジタル技術との連携による工事日数削減および省人化の実現によりオペレーター一人当たりの仕事量が増え、高い現場生産性が達成されることが期待できる。例えば施工に用いる建設機械においては、ICT建機[8]を活用した施工や、建機の遠隔操作化や自動・自律化が進められている。しかし、ICT建機は建設現場に直接出向いての活用を前提としており、本質的な安全確保や3Kイメージの払しょくの達成は困難である。また、自律運転建機の実現のための開発が行われているが[9]、受注生産方式である建設業が扱う成果物は一品一様であり、また環境も現場間で大きく異なることから、あらゆる状

況に対応可能な自律運転建機を直ちに現場に投入することは困難である。以上から、従来通り人が判断をして建設機械を操作する必要がある。このような問題のソリューションとして、遠隔操作建設機械を導入することが考えられる [10, 11]。建設機械を遠隔で操作することができれば、建機オペレータが現場へ行かずとも就業可能となり、移動コストの削減による生産性の向上と本質的な安全確保による就業環境の改善が期待できる。遠隔操作建設機械は、古くはラジコン装置を用いた建設機械をオペレータが直接目視しながら遠隔操作が行われていた [12]。その後 1991 年の雲仙普賢岳での噴火災害に対する復興作業では、建機オペレータが立ち入りできない範囲が広く、数百メートル離れたところからカメラ映像を用いた間接的な視認による作業が行われた [13]。以来、基本的な遠隔操作システムが大きく変化しておらず、カメラ映像を介してラジコン装置を用いた操作が一般的であった [14]。このような遠隔操作では、実搭乗による作業と比較し作業時間が 2 倍以上要するケースが報告されており [15]、オペレータのスキルが発揮できず、一般土木現場での利用が困難であるといった課題があった。そこで、近年の遠隔操作建設機械の作業効率向上に向けた取り組みがなされており、操作インターフェースおよび情報フィードバックインターフェースの 2 つの観点から改善が進んでいる [16]。操作インターフェースの改善に関しては、従来型の油圧ショベルと同様の操作システムを有した操縦席型の遠隔装置の開発 [17] や、操作と同時に触力覚を提示可能なハプティックデバイスの適用 [18] などがある。情報フィードバックインターフェースの改善に関しては、視覚、聴覚、触覚等、様々な感覚に対する機体情報のフィードバック [19, 20] による操作支援といった研究が行われており、遠隔操作建設機械において、オペレータのスキルが最大限発揮できるようになってきている。また、将来はこのような遠隔操作システムを用いて、オペレータが複数台の建設機械を逐一乗り換えながら作業する働き方が想定される。オペレータ一人で現場にある複数台の建設機械を受け持つことで、実搭乗では実現不可能な高い生産性が達成されることが期待できる。したがって、現場生産性を最大限高めるためには、オペレータが様々な建設機械に乗り換えながら、最大限自身のスキルを発揮可能な遠隔操作システム

が必要となる。

本論文では、建設機械の中でも、アタッチメント、旋回、走行の動作を組み合わせると複雑な動作が可能であることや、先端アタッチメントの種類が豊富で目的に応じて多用途に使用できる等の理由から、建設機械生産台数(2023年度)[21]においても過半数を占めている油圧ショベルを研究対象とした。

## 1.2 遠隔操作油圧ショベルに関する取り組みと課題

油圧ショベルは一般的に、機体質量が6t未満の小型クラスから40t以上の大型クラスまであり、オペレータは現場の規模や作業内容に適したクラスの機体に搭乗し作業を行っている。よって遠隔操作油圧ショベルにおいて、異なるクラスの機体に乗り換えて作業する場面が想定される。人間は目や耳といった五感から受けた情報を、情報処理プロセスによって脳内で処理し、外界の物事や事象を認識し、それをもとに外界に対して運動による働きかけを行っている[22, 23]。この中で人間の認知プロセスは、過去に蓄えられた記憶から、感覚器官から受け取った情報を取捨選択・加工することでそれが何であるかという認知が生じると言われている[24]。これは油圧ショベルのような機械操作時のオペレータの脳内においても同様の処理が行われており、この認知プロセスによってオペレータは遠隔操作油圧ショベルの乗り換えにおける環境の変化を認知する[25]。人間は過去の経験や記憶をもとに、事象を理解するための枠組みとしてメンタルモデルを構築すると言われているが、環境の変化によって誤ったメンタルモデルを参照し状況を認識してしまうことが指摘されている[26, 27]。この認知プロセスでの誤った解釈が、その後の操作に影響し、作業効率の低下を引き起こす可能性が考えられる。メンタルモデルによる環境の理解のためには、知識や経験といった内的資源だけでなく、フィードバックや教示情報といった外的資源の提供も適切に行われる必要がある[28]、オペレータが乗り換えによる環境の変化を正しく認知するためには、人間の認知プロセスを考慮したうえで情報を最適に処理し、オペレータに提示する必要があると考える。人

間の認知に着目したインターフェースデザインの重要性は古くは1980年代から言われており [29]、近年では遠隔操作の分野でも研究が行われている [30, 31]。遠隔操作油圧ショベルにおいては情報フィードバックによる機体情報認知支援 [32] や空間認知支援のための AR を用いた没入型インターフェース [33] 等の研究が行われている。しかしながら、遠隔操作油圧ショベルの乗り換えが、オペレータの認知に与える影響を軽減することを目的とした研究は筆者の知る限り行われていない。遠隔操作油圧ショベルの乗り換えでは、乗り換えに伴い以下の変化が生じ、その変化がオペレータの認知に影響することが考えられることから、その影響を軽減する必要がある。

1. 機体動特性の変化の影響
2. フィードバック情報の変化の影響

そこで本論文では、従来研究では行われていない観点で多面的に検討し、上記課題を解決するインターフェースを提案し、それが作業効率に与える効果を評価することを主題とする。

### 1.3 本論文の章構成

本論文では、遠隔操作油圧ショベルシステムに対して、機体の乗り換えがオペレータの認知に与える影響を解明するとともに、影響を軽減する手法について提案し評価する。

第1章では、建設業が直面している社会的な課題と、一般土木現場等で活用可能な遠隔操作油圧ショベルシステムの必要性、先行研究について述べる。さらに、オペレータの認知に与える影響を軽減することの重要性とその課題について説明するとともに、本論文において目標を明確にする。

第2章では、機体動特性の変化の影響を軽減するインターフェースについて述べる。遠隔操作油圧ショベルの乗り換えでは、機体動特性の変化に対応できず、効率的な操作が行えなくなる可能性が考えられる。本章ではまず動特性の変化の影響を軽減するために手法として、

オペレータに乗り換え先の機体の動特性情報を提示可能なインターフェースを提案する。次に提案手法の効果を確認するため、遠隔操作油圧ショベル実機を用いた被験者試験を実施し、その結果について述べ考察を行う。また、動特性情報の提示手法として、機体サイズに着目した静止画による視覚的な提示を提案した。提案手法の有効性を確認するため、異なるクラスへの乗り換えが可能なシミュレータを構築し、被験者試験を実施した、その結果について述べ考察を行う。最後に、提案した動特性提示インターフェースの有用性について述べる。

第3章では、フィードバック情報の変化の影響の軽減するインターフェースについて述べる。遠隔操作油圧ショベルでは視覚情報で補えない機体情報をオペレータにフィードバックするが、機体情報はクラス毎に固有であるため、このフィードバック情報の変化がオペレータの認知に影響を及ぼすことが考えられる。本章ではまずフィードバックする機体情報として、機体に掛かる負荷に着目し、クラス差を考慮した負荷情報としてアタッチメント関節負荷率という指標を提案し、これをオペレータにフィードバックすることを提案する。また、このアタッチメント関節率の提示手法について力覚によるフィードバックを提案する。次に、提案手法の効果を確認するための被験者試験を実施した結果について述べ、実験結果の考察を行う。最後に、提案したアタッチメント関節負荷率フィードバックの有用性について述べる。

第4章では、本研究の総括と、本論文で提案したシステムにより実現可能な建設機械の将来、および今後の研究展望について述べる。

# 第2章 遠隔操作油圧ショベルにおける動特性情報提示インターフェース

## 2.1 緒言

油圧ショベルはクラス毎に動特性が異なり、オペレータは乗り換えの度に個々のクラスの動特性に応じた操作を行う必要がある。人は道具や機械を操作する際に、操作対象物に対する内部モデルを脳内に構築し [34, 35]、状況に応じてそれらを切り替えると言われている [36, 37]。油圧ショベルの操作においても、オペレータは異なる動特性毎に脳内に内部モデルを構築し、クラスが変わる度にそれらを切り替えて操作していると考えられる。また、効率的な操作のために、内部モデルの切り替えは速やかに行われることが望ましいが、そのためには操作する対象の動作を意識的に理解している必要がある [38, 39]。しかし、遠隔操作油圧ショベルは実搭乗と比較して作業対象機械の把握などの知覚・認知システムが異なること [14] や、物理的な乗り換えが発生しないこと等の理由により、オペレータは乗り換え先の機械のサイズや姿勢といった情報を十分に得られないまま機械を操作するため、対象の動作を理解することが困難である。動作の理解が欠如している状態では内部モデルの切り替えは直ちに行われなことが指摘されており、これを内部モデルの干渉という [40]。内部モデルの干渉では、切り替え後の効率的な作業が妨げられるだけでなく、乗り換え前の環境における内部モデルの学習にも影響すると言われており [43]、オペレータの効率的なスキル獲得が妨げられる可能性がある。これらによって作業効率に影響を及ぼすことが考えられる。その対策として、油圧ショベルの動特性をクラス間で統一することが考えられる。油圧ショベルは、搭載されるコ

ントローラのアルゴリズムによってアタッチメントおよび上部旋回の稼働速度を制御しており [44], パラメータを調整することで動特性を変えることが可能である. しかし, 大型のクラス機体やアタッチメントの重量が大きくなり早い応答性が実現できないことから, クラス間の動特性の統一のためには大型クラスより小さい機体クラスの応答性を低下させる他ない. 応答性の低下はパフォーマンスの低下につながることから, 最大パフォーマンスを維持しながら作業を行うためには, オペレータが機体の動特性の変化に対応する必要がある. 以上から, 遠隔操作油圧ショベルにおいて動特性が変化する際の, オペレータの内部モデル切り替えを支援するための手法が必要となる.

従来研究では, 手先に任意方向の外力を提示可能なマニピュランダムを用いた, 内部モデルの切り替えを支援する手法について研究がなされている. Touria や Krouchev ら [41, 42] は, 時計方向から反時計方向へ外力が切り替わる状況で, マニピュランダムを操作しカーソルを目標に到達させるポインティングタスクを行った. そして, 各方向の力場に合わせてモニターの背景色を変化させ被験者に提示し学習させることで, 外力が切り替わる際の背景色の視覚提示により, 切り替え後のポインティングの失敗率が, 背景色を提示しなかった場合と比較して低下することを明らかにした. また, Matsuda ら [45] は同様のポインティングタスクにおいて, 嗅覚提示も内部モデルの切り替えを支援できる可能性を示唆した. Cothros ら [46] は, 外力が発生する場合と発生しない場合でのマニピュランダム操作によるポインティングタスクにおいて, 操作に連動してマニピュランダムを把持し操作する手の CG 映像と, 何も持たない手の CG 映像を提示することで, 外力切り替え時の内部モデルの干渉を軽減することを示した. しかし, 遠隔操作油圧ショベルにおける内部モデル切り替えを支援する手法に関する研究は筆者の知る限り行われていない. そこで本章では, 遠隔操作油圧ショベルにおける動特性変化時の, オペレータの内部モデル切り替えを支援するインターフェースを提案し, それが作業効率に与える効果について検証することを目的とする.

本章では, まず動特性の変化の影響を軽減する動特性情報提示インターフェースシステム



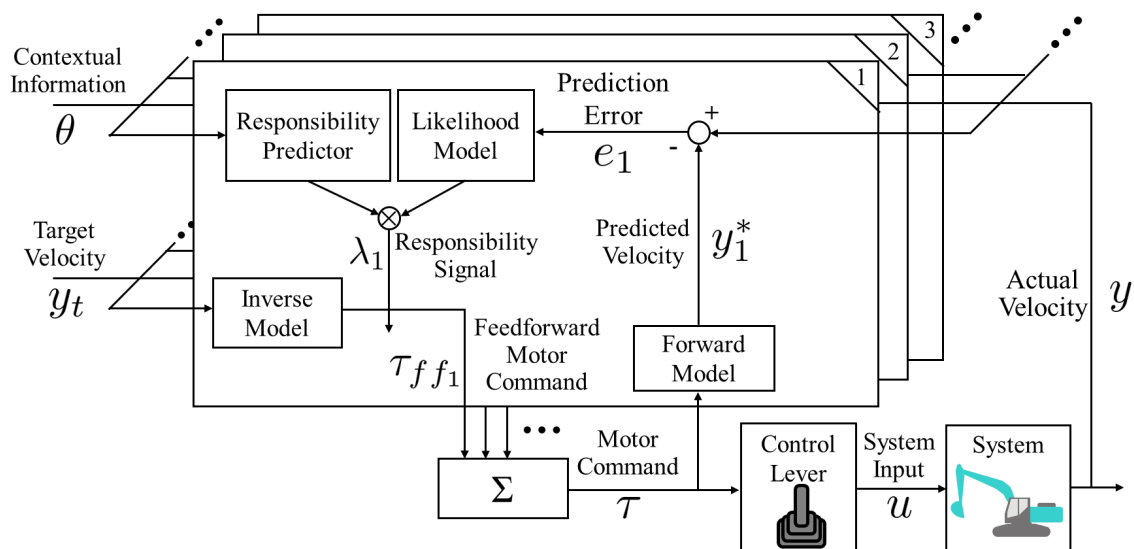


Fig. 2.1: Architecture of a MOSAIC Model

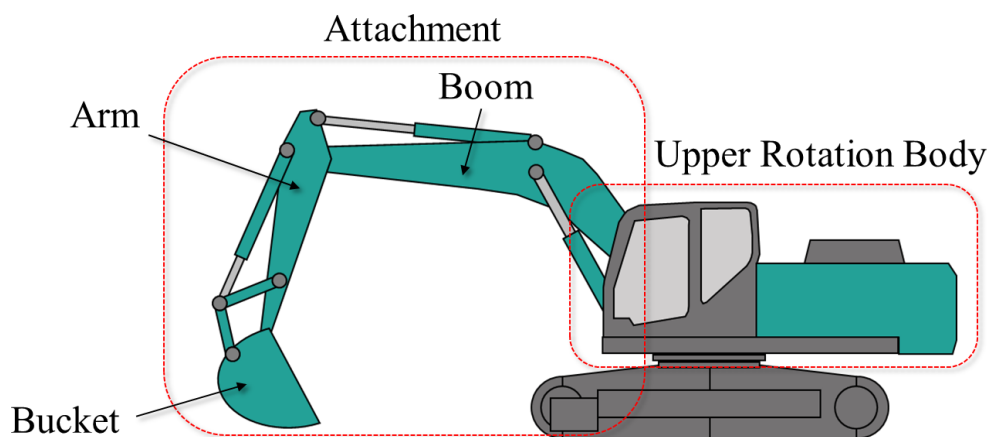


Fig. 2.2: Configuration of Hydraulic Excavator

について提案する．次に，実機を用いた実験およびその結果の説明を行う．次に，動特性情報の提示手法として，機体サイズに着目した画像提示インターフェースを提案し，シミュレータを用いた実験およびその結果の説明を行う．最後に，結論を述べる．

## 2.2 提案手法

Wolpertらは，内部モデル切り替えの仕組みをモデル化したMOSAICモデルを提案している [36]．Fig.2.1に，遠隔操作油圧ショベル操作時のMOSAICモデルの模式図を示す．MOSAICモデルでは順モデル，逆モデルから構成される内部モデルが，各クラスに対応し複数存在す

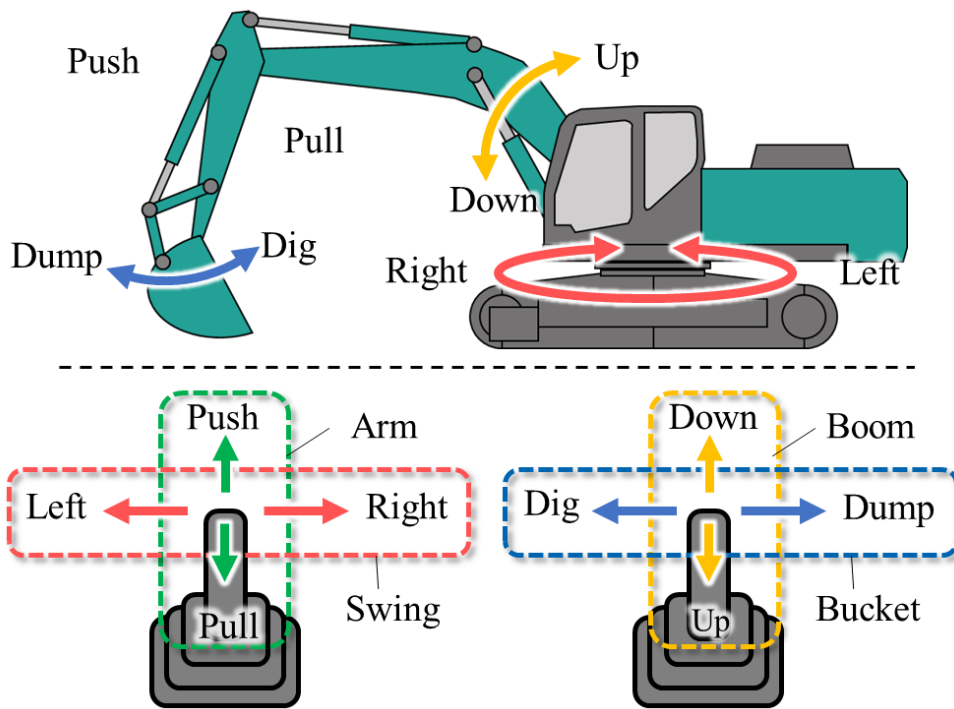


Fig. 2.3: Conventional Lever Pattern of Hydraulic Excavator

る。油圧ショベルは、ブーム、アーム、バケットから構成される作業を行うためのアタッチメント及び上部旋回体を操作レバーにより稼働させる操作方式が採用されている。油圧ショベルの構成及び一般的な油圧ショベルの操作パターンである ISO パターンを Fig.2.2, Fig.2.3 に示す。油圧ショベルでは、操作レバーからの入力  $u$  に基づきアタッチメント及び上部旋回体の動作角速度  $y$  が決定される。逆モデルは所望の動作角速度  $y_i$  を実現するためのレバー操作の運動指令  $\tau_{ffi}$  を出力する（添え字  $i = 1, 2, 3 \dots$  は各内部モデルに対応する）。順モデルは運動指令  $\tau$  に基づき推定動作速度  $y_i^*$  を出力する。これら内部モデルの切り替えは責任信号予測器および尤度モデルにより行われる。責任信号予測器は、運動開始前に得られる動作や環境の変化といった文脈情報  $\theta$  に基づいて、どの内部モデルが適切であるかを予測的に判断して信号を出力する。尤度モデルは、順モデルからの推定動作速度と、実際の動作速度  $y$  の誤差情報  $e_i$  から、誤差が小さい逆モデルの出力が大きくなるような信号を出力する。責任信号予測器、尤度モデルからの信号は掛け合わされて責任信号  $\lambda_i$  となり、最終的な運動指令  $\tau$  は、各逆モデルの出力  $\tau_{ffi}$  を責任信号で重み付けることで得られる。内部モデルの切り替えとは、環境の変化に際し、前の環境で使用していたものと異なる内部モデルにおける責任信号が増

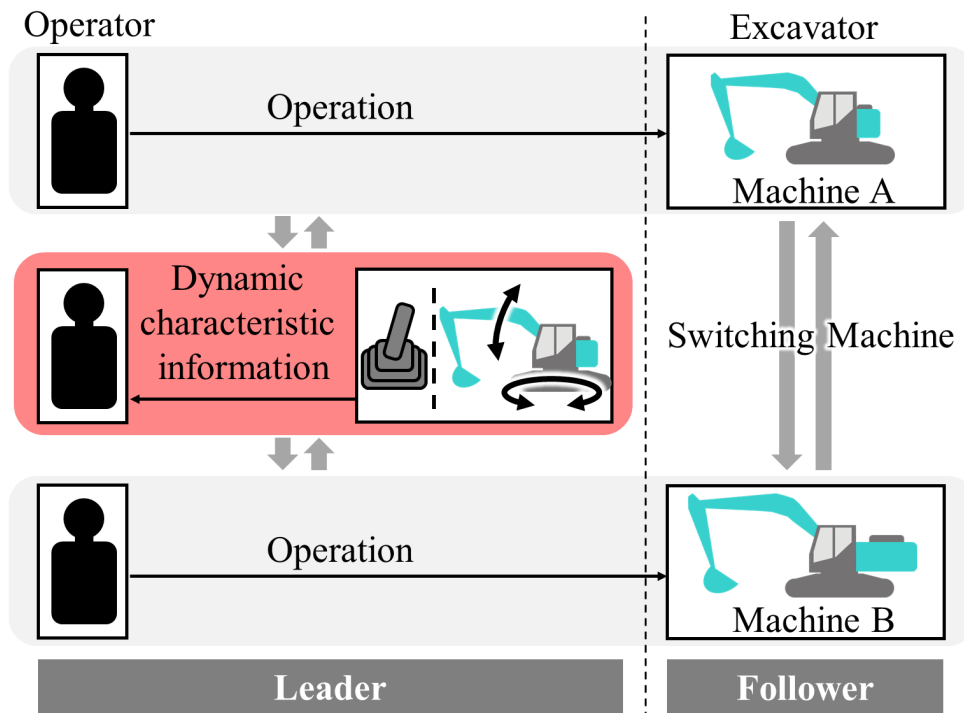


Fig. 2.4: Image or Video Presentation When Switching Machine

大し、運動指令  $\tau$  に対する  $\tau_{ffi}$  の寄与が大きくなる状態を指す。責任信号予測器による予測的な切り替えは、環境の変化への素早い対応が可能であり、文脈情報が与えられ適切な内部モデルにおける責任信号が大きくなれば、オペレータは機体乗り換え後直ちに効率的な操作が可能となる。オペレータに与える文脈情報として、Howard らは、運動課題と密接に関連した情報であるほど内部モデルの切り替えに効果があるとしており、その例として力加減や関節の動きといった固有受容感覚の変化を挙げている [47]。また情報提示は環境が変化する直前に行うことが最も文脈条件として効果が高くなることが分かっている [48]。

そこで本章では、文脈情報としてオペレータに機体動特性が変化することを想起させるため、Fig.2.4 に示すように、機体乗り換えの際に、変化後の動特性情報を乗り換えの直前にオペレータに提示する手法を提案する。提示の手段として、動特性のような機体の動作に関する情報をオペレータが直感的に理解できると考え、視覚的な提示とした。オペレータが乗り換え先の動特性を理解することにより、オペレータは適切な内部モデルに切り替えることができ、乗り換え後速やかに効率的な操作が行えると考え。

## 2.3 実機検証

### 2.3.1 実験システムの構築

提案手法の有効性を検証するため、実機を用いた検証を実施した。検証に当たり、動特性の差異が大きければ、その変化の影響がより顕著に内部モデルの切り替えに影響しすると考えた。油圧ショベルの操作の内、上部旋回体を旋回させる旋回操作は、アタッチメントの姿勢およびエンジン回転数で動特性が大きく変化する。そこで本実験では、旋回操作を対象に提案手法の有効性を検証することとした。検証には、13tクラス(SK135SR-3)の遠隔操作油圧ショベルを使用した。Fig.2.5に使用した遠隔操作コックピットおよび油圧ショベルを示す。遠隔操作コックピットは、モニターおよび操作レバーから構成されている。また遠隔操作油圧ショベルにはカメラが搭載されており、運転席からの視点の映像がモニターに表示される。本実験では、機体乗り換えの際に発生するアタッチメントや目線高さといった視覚情報の変化が実験に影響を及ぼす可能性を排除するため、TABLE 2.1に示すように、姿勢によって決定する上部旋回体の慣性およびエンジン回転数を変えることで、それぞれ異なる動特性A、Bを実現し乗り換えを模擬した。姿勢は、動特性のみが変化するように、アタッチメントがモニターに映らないよう配慮した。各動特性におけるアタッチメント姿勢はFig.2.6に示す通りである。

また、オペレータに動特性情報を提示する手法として、Fig.2.7に示すように、次に操作する動特性における運転席視点での旋回操作時の映像を提示する手法を提案する。映像は、停止状態から開始し、ステップ入力により上部旋回体が180度旋回した時点で入力を停止し、慣

Table 2.1: Posture and engine speed conditions

Dynamic characteristics	Inertia	Engine speed
A	Small	Low
B	Big	High



Fig. 2.5: Configuration of teleoperated hydraulic excavator

性により上部旋回体が静止するまでとした。また、旋回操作に対する応答をオペレータが把握できるよう、入力を行っている間は動画下部に入力中である旨を表す”Lever ON”という文字を提示した。また、入力停止後に慣性により移動する旋回角度を把握できるよう、180度地点から10度間隔で目印となる棒を立てた。

### 2.3.2 実験プロトコル

実験タスクは Fig. 2.8 に示すような、初期状態から右旋回操作で180度旋回し、油圧ショベルのフロントウィンドウに貼り付けた目印を目標の間で停止させる旋回操作タスクとした。ここで、目標の幅は10度とした。

被験者として、建設機械会社の社員を対象に実験参加者を行い、最終的に平均年齢30.8歳の健康な成人5名が実験に参加した。実験に先立ち、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。実験条件は以下の2条件とした。

- Conditon1: 提示無しで動特性が変化
- Conditon2: 映像を提示した後で動特性が変化

また、各条件に対して、TABLE 3.2 に示すように、途中動特性が変化する場合と変化しない場合とで、計4つのパターンを用意した。被験者は1パターンにつき計20回の旋回操作タス



(a) Inatia:Small (dynamic characteristics A)



(b) Inatia:Big (dynamic characteristics B)

Fig. 2.6: Posture of hydraulic excavator for each dynamic characteristic

クを行った。動特性が切り替わるパターンでは、被験者は前半 10 回と後半 10 回でそれぞれ異なる動特性で旋回タスクを行った。また、条件毎にタスク実施前に各動特性につき 10 回ずつ旋回操作タスクの練習を行った。なお、条件毎の影響を軽減するため、条件間に 1 時間以上の時間を空けて実験を実施した。また、順序効果の影響を考慮し、実験条件およびパターンの実施順は被験者毎にランダムイズした。さらに、初期状態への復帰や動特性切り替え時の操作など、タスクに直接関係しない操作が実験結果に影響を及ぼす可能性を考慮し、これら操作はすべて実験監督者が行った。実験に際して、被験者には 2 種類の動特性で操作すること、Condition2 では動特性の変化前に動画が挿入されることを説明し、提示される動画はレバー操作入力およびそれに基づく旋回動特性を表すことを説明した。また、タスク実施に際して、旋回は右旋回で行うこと、可能な限り早くタスクを完了させること、旋回は目標位置上で停止させることを指示した。

実験の評価項目は、提案手法により適切な内部モデルに切り替えられることでより短時間でタスクが完了できるようになると考え、旋回操作時間および旋回操作時間変化量とした。旋





Fig. 2.7: Proposed method of video presentation

回操作時間は、タスクが開始し旋回操作入力を開始した時から、旋回操作入力を終了までの時間とした。動特性の変化が作業効率に及ぼす影響を評価するため、各試験条件における  $P_A$  と  $P_{B \rightarrow A}$ 、 $P_B$  と  $P_{A \rightarrow B}$  の旋回操作時間の全被験者平均を比較した。比較によって差異が確認されれば、動特性切り替えによる影響があったといえる。また、提案手法の効果を評価するため、条件間における旋回操作時間変化量の全被験者平均を比較した。旋回操作時間変化量は、動特性Aに関しては  $P_{B \rightarrow A}$  と  $P_A$  の旋回操作時間の差、動特性Bに関しては  $P_{A \rightarrow B}$  と  $P_B$  の旋回操作時間の差とした。この数値が小さいほど、動特性変化の影響を抑制する効果が大いといえる。なお評価には後半10回分のデータを評価に用いた。

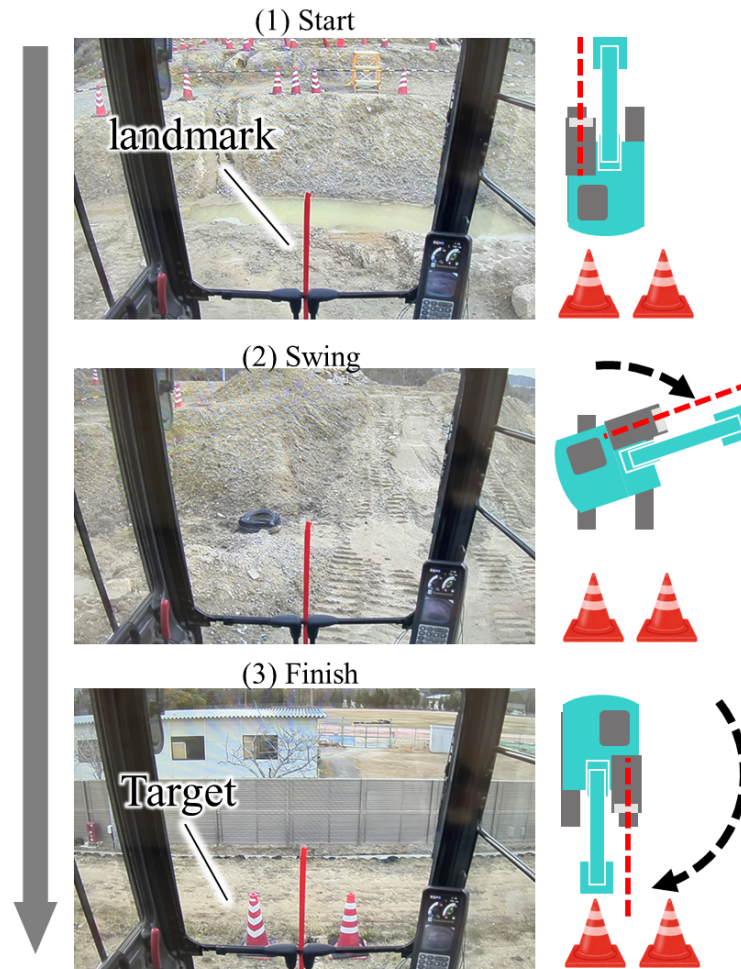


Fig. 2.8: Swing Operatin task

### 2.3.3 実験結果

Fig.2.23, TABLE 2.6 に、各条件での旋回操作時間の結果を示す。対応のある  $t$  検定の結果、Conditon1 における  $P_{A \rightarrow B}$  の旋回操作時間が、 $P_B$  と比較して有意に増加することを確認した。なお、有意水準は 5% とした。Conditon2 では動特性の変化の有無にかかわらず、旋回操作時間に有意な差異は確認されなかった。また、Fig.2.24, TABLE 2.7 に、各動特性における旋回

Table 2.2: Switching Patterns of Machines

Patterns	Explanation
$P_A$	Operate with dynamic characteristics A
$P_{B \rightarrow A}$	Switch dynamic characteristics B to A
$P_B$	Operate with dynamic characteristics B
$P_{A \rightarrow B}$	Switch dynamic characteristics A to B



Table 2.3: Test Results of Average Operation Time for Each Conditions

Condition	$P_A$	$P_{B \rightarrow A}$	$t(5)$	$p$ value	$P_B$	$P_{A \rightarrow B}$	$t(5)$	$p$ value
	$mean \pm SD$	$mean \pm SD$			$mean \pm SD$	$mean \pm SD$		
Condition1	$6.3 \pm 0.44$	$6.7 \pm 0.70$	2.3	0.074	$6.3 \pm 0.49$	$6.7 \pm 0.59$	3.9	*0.016
Condition2	$6.8 \pm 0.61$	$6.7 \pm 0.67$	0.61	0.57	$6.3 \pm 0.71$	$6.1 \pm 0.58$	1.7	0.16

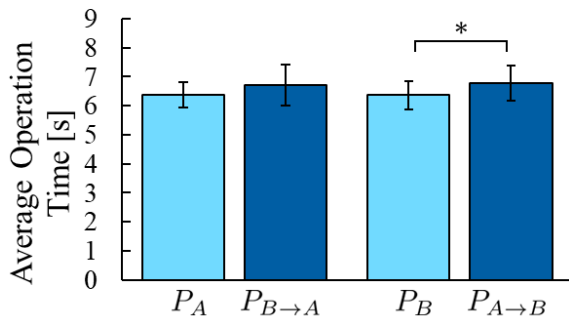
Table 2.4: Test Results of Increase in Average Operation Time for Each Conditions

Dynamic Characterinsic	Conditoon1	Conditoon2	$t(5)$	$p$ value
	$mean \pm SD$	$mean \pm SD$		
A	$0.34 \pm 0.32$	$-0.047 \pm 0.20$	2.5	0.081
B	$0.42 \pm 0.21$	$-0.19 \pm 0.22$	4.4	*0.012

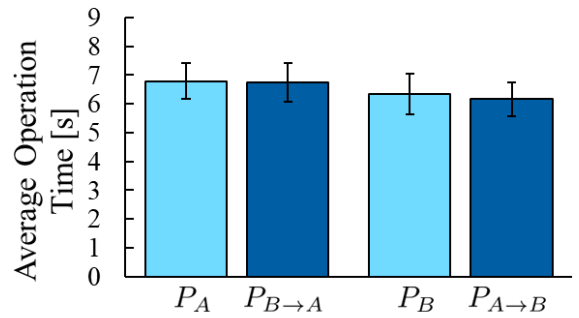
操作時間変化量の結果を示す。対応のある  $t$  検定の結果、動特性 B において、Condition1 と比較して、Condition2 で旋回操作時間変化量が有意に減少することを確認した。

### 2.3.4 考察

動特性 B において、動特性が変化する場合の作業効率への影響が確認されるとともに、提案手法にそれを抑制する効果があることが確認された。Condition1 における作業時間の増加は、旋回動作速度の低下に起因したことが考えられる。そこで各条件における旋回動作速度の比較を行った。Fig.2.11 に各条件における  $P_B$  および  $P_{A \rightarrow B}$  の旋回角速度の全被験者平均を示す。対応のある  $t$  検定の結果、Condition1 において  $t(5) = 3.1$ ,  $p = 0.037$  となり、 $P_B$  と比較し  $P_{A \rightarrow B}$  で平均旋回角速度が有意に低下することが確認された。一方で、Condition2 では  $t(5) = 2.0$ ,  $p = 0.10$  となり、有意差は確認されなかった。旋回角速度は操作レバーによる入力によって決定することから、このことはCondition1 において、被験者の操作入力に動特性変化の有無で異なったことを示唆している。Fig.2.12 に、各条件における  $P_B$  および  $P_{A \rightarrow B}$  の旋回操作入力の平均時系列を示す。平均時系列の算出には、時系列データの類似度を算出する手法である Dynamic Time Warping(DTW)[49] と複数の時系列データの平均を算出する手法である DTW Barycenter Averaging (DBA)[50] を用いた。また、操作入力の最大値は 100 である。図より、動特性変化の有無に関わらず旋回の加速操作時は最大まで入力し、ある時点から入力を減少させ減速操作を行っているが、Condition1 における旋回減速操作が切り替えの有無で異なっ

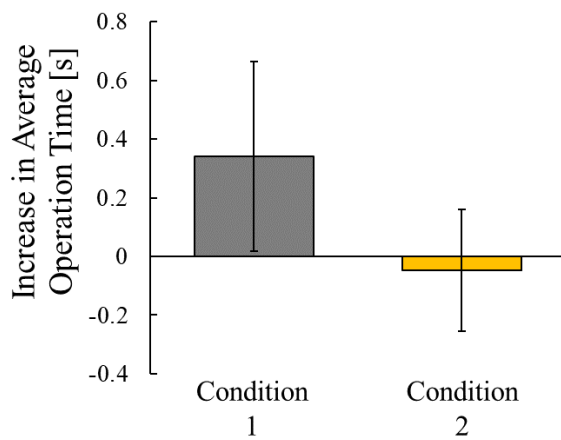


(a) Condition1

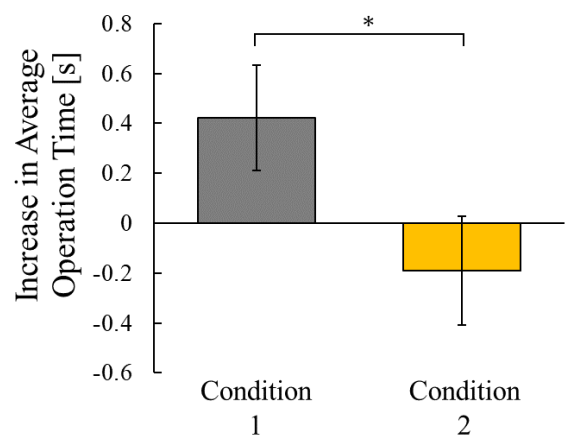


(b) Condition2

Fig. 2.9: Result of Average Operation Time for Each Conditions. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ ).



(a) Dynamic characteristics A



(b) Dynamic characteristics B

Fig. 2.10: Increase in average operation time for each dynamic characteristics. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ )

いることが分かる。そこで、レバー入力最大を下回り旋回減速操作が開始される時点から操作が終了までの時間を旋回減速操作時間と定め比較を行った結果、Fig. 2.13 に示すように、 $t(5) = 3.5$ ,  $p = 0.023$  となり、切り替えにより旋回減速操作時間が有意に増加した。Condition2 では  $t(5) = 2.3$ ,  $p = 0.082$  となり、有意差は確認されなかった。このことから被験者は、動特性の変化により旋回停止操作に時間を要したと言える。また、Fig.2.14 に、各条件における  $P_B$  と  $P_{A \to B}$  の、施行毎の旋回操作時間の推移を示す。なお、各施行におけるデータ点は全被験者における平均値である。図より、Condition1 において、動特性が変化した直後から  $P_{A \to B}$  の旋回操作時間が  $P_B$  と比較して増加した状態で推移していることが分かる。このことは、被験者が動特性の変化に伴う適切な内部モデルの切り替えを行うことができず、効率的な操作

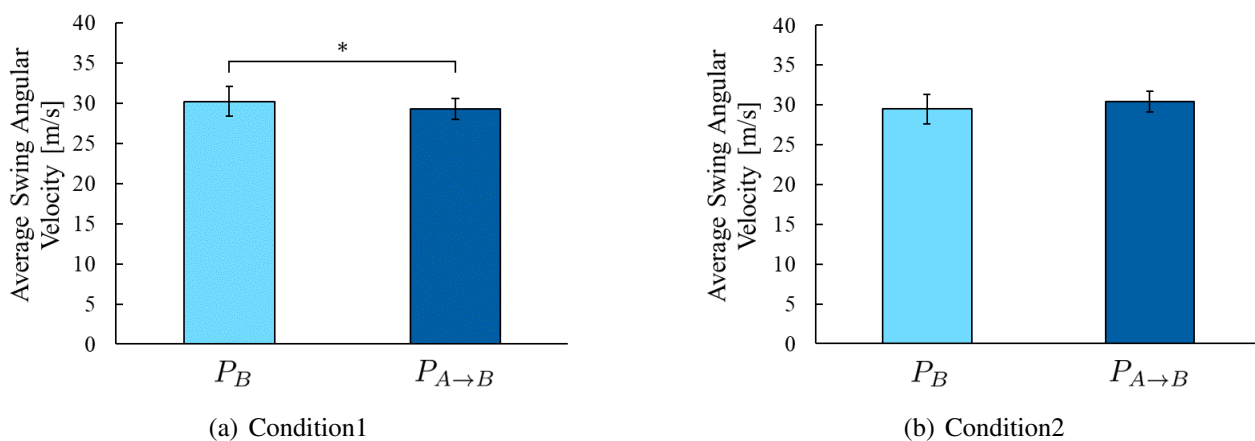


Fig. 2.11: Average swing angular velocity. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ )

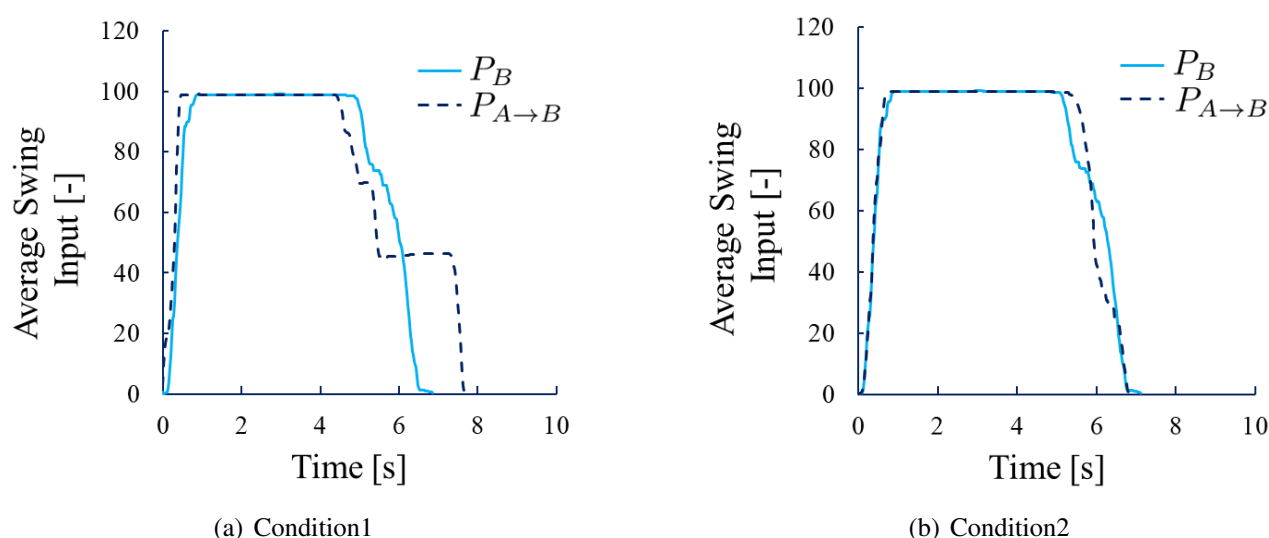


Fig. 2.12: Average swing input of subD.

が行えなかったことが示唆された。

一方 Condition2 では、操作入力の変化は確認されていなかった。提案手法は操作入力に対する動特性を直接オペレータに提示する手法であることから、被験者は乗り換え先の動特性を理解でき、適切な内部モデルに切り替えることができたことを示唆しており、提案手法の効果が確認できた。

また、今回の実験では、動特性 A において動特性切り替えの影響は確認されなかった。要因として動特性 A は慣性が小さいことから操作入力に対する応答が早く、またエンジン回転数が低いことから最大速度も低い条件であったため、操作の難易度が低かったことが考えられる。

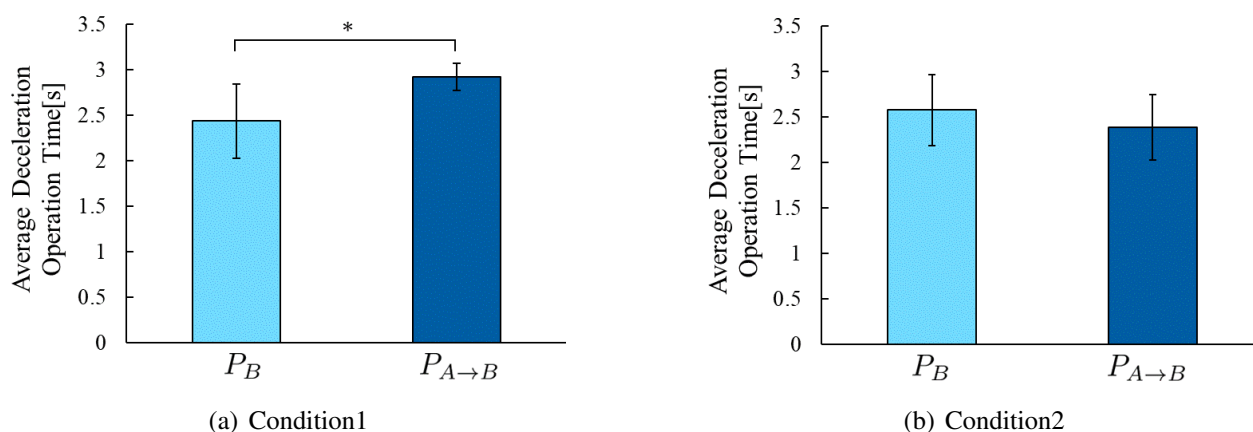
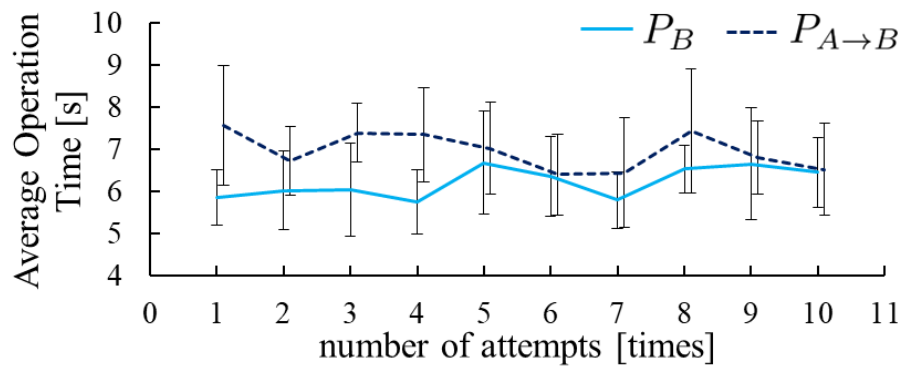


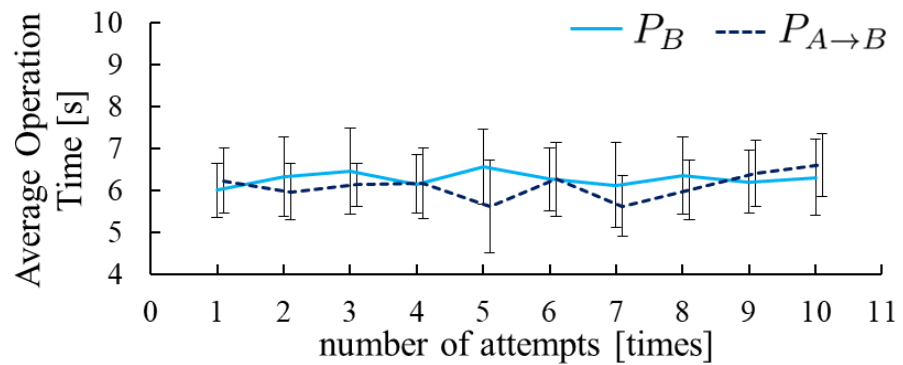
Fig. 2.13: Swing deceleration time for each conditions with dynamic characteristic B. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ ).

## 2.4 静止画による動特性提示手法

機体乗り換えをする前に情報を提示することによる作業時間への影響を考慮すると、可能な限り短時間でオペレータが乗り換え先の機体の動特性を把握できることが望ましい。もし、静止画により動特性をオペレータに提示することができれば、提示時間を最小化することが可能となる。静止画では動特性のような時間応答を提示することは困難であるため、本研究では機体サイズに着目する。油圧ショベルは機体サイズが大きくなるに従って、上部旋回体の慣性が大きくなる。よって機体サイズを提示すれば、オペレータはそこから旋回動特性を推測できることが期待される。機体乗り換えの際には、アタッチメントの大きさや目線高さといった視覚情報が変化するが、モニターからでは奥行き感の知覚が困難であり [51]、そこから機体サイズを認知することは困難である [52]。よって静止画によりオペレータに機体サイズを認知させる手法として、Fig.2.15 に示すように、現在操作している機体及び次に操作する機体の側面図を並べて表示することを提案する。乗り換え先の機体サイズが、現在操作している機体サイズからどの程度変化するかを提示することで、乗り換え先の機体サイズが把握できると考えた。また、アタッチメントや上部旋回体のサイズが把握しやすいという考えから、機体の側面図を用いた。なお、画像の左側は現在操作している機体、右側は次に操作する機体とし、乗り換え先の機体が分かりやすくなるよう枠で強調表示している。



(a) Condition1



(b) Condition2

Fig. 2.14: Transition of average operation time for each conditions. Error bars indicate standard deviation.

## 2.5 シミュレータを用いた検証

### 2.5.1 シミュレータの構築

提案手法の有効性を検証するため、シミュレータによる検証を行った。遠隔操作油圧ショベルを模したシミュレータを作成した。Fig.2.16に使用したシミュレータシステムを示す。シミュレータは2本の操作レバー、モニター、PCから成り、シミュレーション環境はゲームエンジン Unity を用いて作成した。シミュレーション環境内には、4tクラス、40 tクラス油圧ショベルの3Dモデルを配置し、それらを切り替えて操作を行えるようにした。また、モニターに映る映像は運転席からの視点とした。各クラスの人物(180cm)と比較した大きさはおよび運転

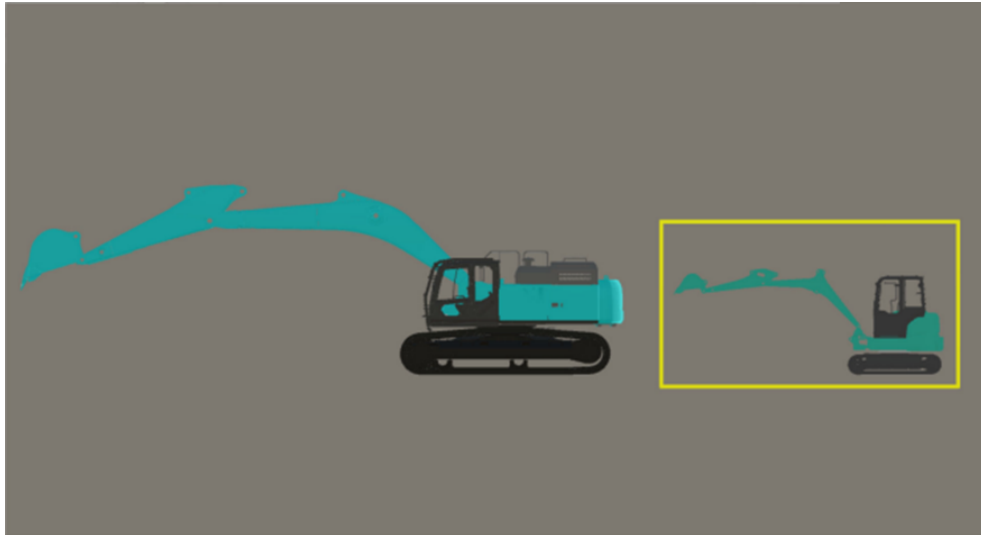


Fig. 2.15: Proposed Method of Image Presentation

席から見た視点は Fig.2.17 (a), (b) に示すとおりである.

油圧ショベルは油圧回路や油圧シリンダを通して動作することから、むだ時間や応答遅れが発生する。Koiwai ら [74] や Sekizuka ら [54] は油圧ショベルの動特性を一次遅れ+むだ時間系で近似しており、本研究はそれに倣い、各クラスのアタッチメント及び旋回操作時の動特性  $G(s)$  を下記のように設定した.

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (2.1)$$

ここで、 $K$  はシステムゲイン、 $T$  は時定数、 $L$  はむだ時間を示す。また、各クラスのパラメータは、一般的な 4t クラス、40t クラス油圧ショベルの挙動に近くなるように設定した。一例として Fig.2.18 に 4t クラス及び 40t クラスにおける、ステップ入力に対する旋回角速度応答を示す。なお、旋回角速度については 4 t クラスのシステムゲインで正規化を施している。

## 2.5.2 実験プロトコル

提案手法における機体乗り換え時の効果を検証するため、シミュレータを用いた被験者試験を実施した。実験タスクとしては、実作業での効果を確認するため、Fig.2.19 に示すよう

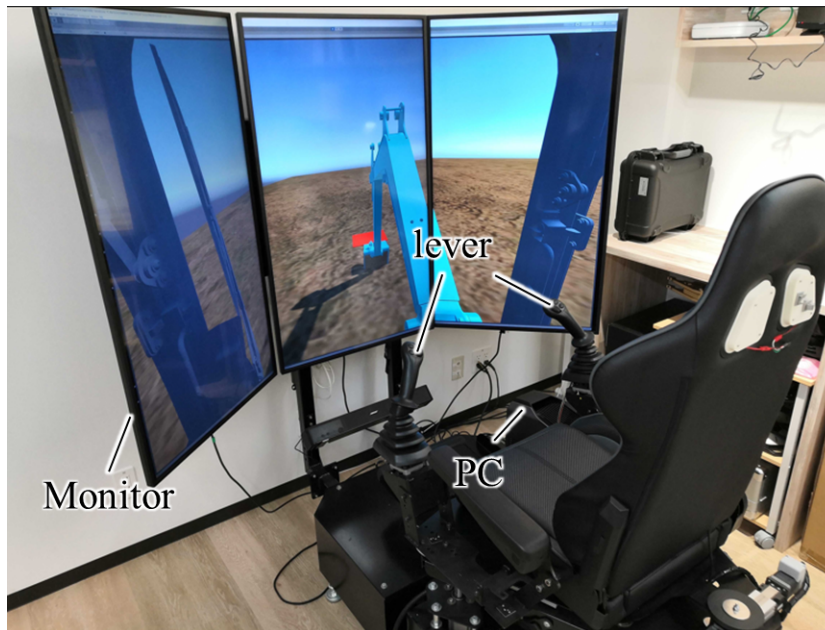


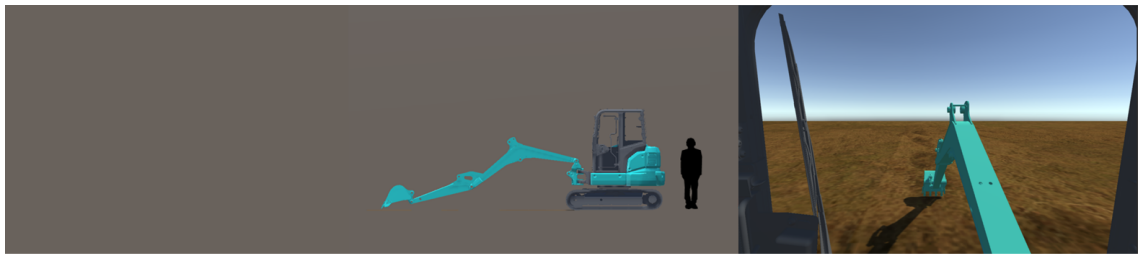
Fig. 2.16: Simulator Environment

な，油圧ショベルにおける一般的な作業である掘削積み込みタスクとした．3D空間上に油圧ショベル及び180度後方に排土用のトラックのモデルを配置した．被験者は掘削作業後，右旋回操作で180度旋回し，トラックの荷台上で排土することとした．排土後は，左旋回操作で180度旋回し，目標として設置した地面上の目印の上で停止することとした．なお，掘削作業では，伊藤ら[55]の手法を用いて掘削時の機体挙動及びバケットに入る土の挙動を再現した．また旋回操作について松村ら[56]は，油圧ショベルにおける目標までの角度，目標の幅，視野角度から決定される旋回操作難易度モデルを提案している．もしクラス毎に旋回難易度が異なる場合，旋回操作難易度の変化が実験結果に影響を与える．そこで本実験では，クラス毎に同等の旋回操作難易度となるように，持ち上げ旋回時のトラックの荷台の幅及び復帰旋回時の停止位置の幅を調整した．

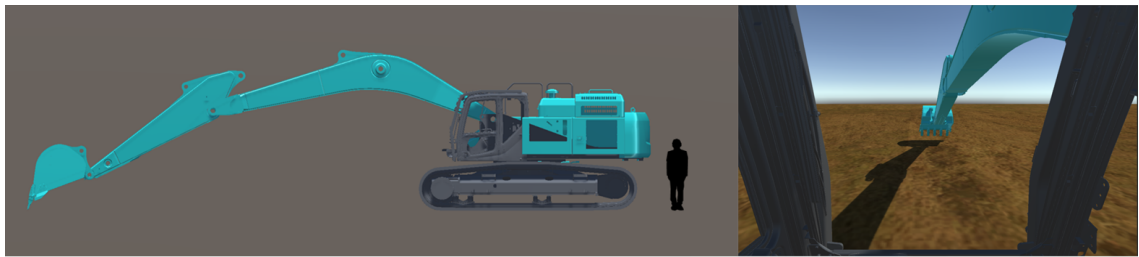
全被験者に対して以下に示す3条件で実験を行い，また各条件に対して，TABLE 3.2に示すように，異なるクラスの機体への乗り換えを行う場合と行わない場合とで，計4つの乗り換えパターンを用意した．なお，Condition2における画像の提示時間は2秒間とした．

- Conditon1: 提示無しで乗り換え





(a) Side View of 4t Class



(b) Side View of 40t Class

Fig. 2.17: Side View and Viewpoint from the Cab for Each Classes

- Conditon2: 画像提示後に乗り替え
- Conditon3: 動画提示後に乗り替え

被験者はまず乗り換え前の機体にて10回掘削積み込みタスクを実施したのち、機体を乗り換えて再度10回掘削積み込みタスクを実施した。乗り換えを行わない場合はクラスを変えずに20回掘削積み込みタスクを行った。また、内部モデル構築のため、条件毎にタスク実施前に1クラス当たり10回掘削積み込みタスクの練習を行った。

被験者として、建設機械会社の社員を対象に実験参加者を募集した。参加条件は、油圧ショベルに対して基本的な操作の仕方を理解し、かつ経験量の差が実験結果に影響する可能性を考慮し、4tクラス、40tクラス油圧ショベルの操縦経験のない、手や腕の動作に疾病のない成人であることとした。最終的に平均年齢35.4歳の健康な成人10名が実験に参加した。実験に先立ち、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。条件毎の影響を軽減するため、条件間に1時間半以上の時間を空けて実験を実施した。また、順序効果の影響を考慮し、実験条件および乗り換えパターンの実施順は被験者毎にランダム化した。実験に際して、被



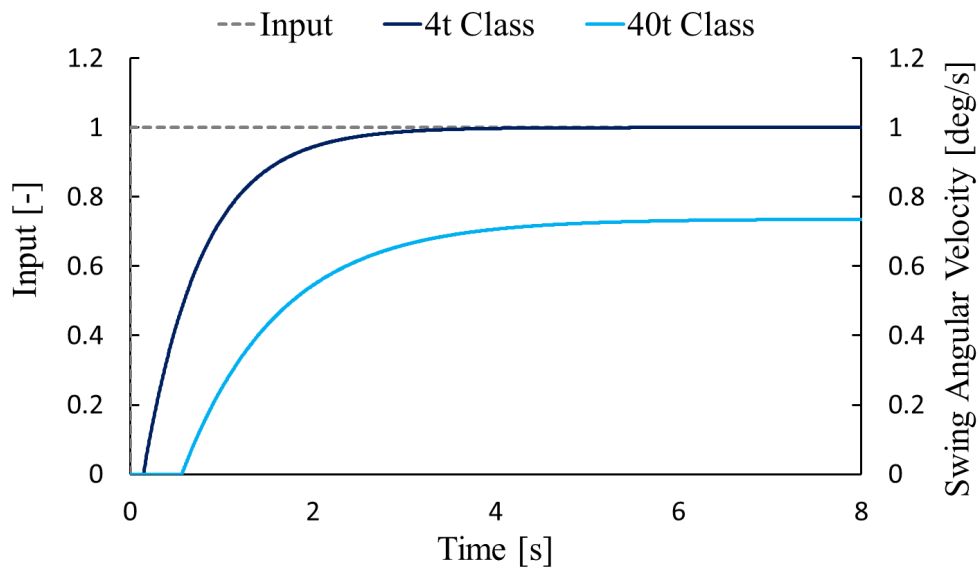


Fig. 2.18: Step Response in Swing Operation of 4t and 40t Class

験者には 4t クラス, 40t クラスを操作すること, Conditon2 及び Conditon3 では乗り換えを行う前に画像および動画が挿入されることを説明した. ここで, Conditon2 にて提示される画像は, 現在操作している機体および次に操作する機体であり, 乗り換え先の機体を枠で強調表示したものであること, Conditon3 にて提示される動画は, レバー操作入力およびそれに基づく旋回動特性を表すことを説明した. また, タスク実施に際して, 可能な限り多く土量を掘削すること, 持ち上げ旋回は右旋回, 復帰旋回は左旋回で行うこと, 可能な限り早くタスクを完了させること, 旋回は目標位置上で停止させることを指示した.

実験の評価項目は以下とした. なお本実験では, 乗り換えの影響を検証するため, 後半 10 回分のデータを評価に用いた.

#### (1) 平均作業軌跡からのばらつき

提案手法により, 乗り換えの有無に関わらず安定した軌跡で作業が行えると考えた. そこで, 旋回操作中のバケット先端座標が描く平均の軌跡からのばらつきの大きさを評価する. 平均軌跡および軌跡のばらつきの算出には, 時系列データの類似度を算出する手法である Dynamic Time Warping(DTW)[49]と複数の時系列データの平均を算出する手法である DTW Barycenter Averaging (DBA)[50]を用いた. 乗り換えによる作業軌跡への影響を評価するため, 各試験条

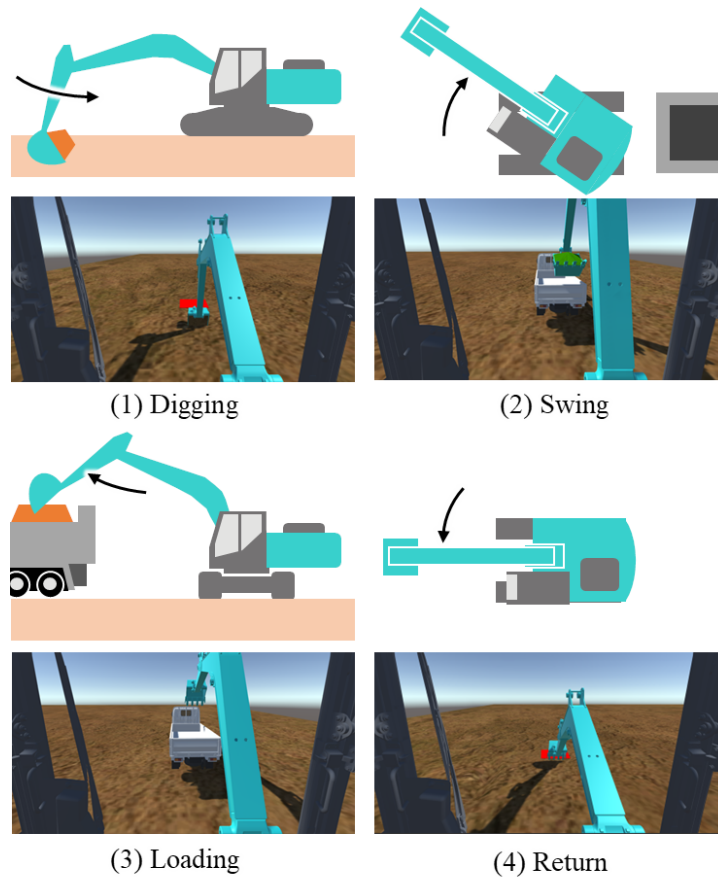


Fig. 2.19: Digging and Loading Task of Excavator

件における  $P_4$  と  $P_{40 \rightarrow 4}$ ,  $P_{40}$  と  $P_{4 \rightarrow 40}$  の作業軌跡のばらつきの全被験者平均を比較した。平均の算出には、被験者ごとにデータの平均値を算出し、これら平均値から全被験者の平均値を算出した。乗り換えの有無による差異が見られなければ、乗り換えの影響を受けなかったと評価できる。

## (2) 旋回操作時間および旋回操作時間変化量

提案手法により、乗り換えによる作業効率の低下が抑制されると考えた。作業効率の指標として、掘削積み込みタスクのうち旋回に関わる作業の操作入力時間を抽出し旋回操作時間とした。具体的には、持ち上げ旋回及び復帰旋回作業時における、旋回操作入力開始時から、旋回操作入力終了までの時間の合計とした。乗り換えによる作業効率への影響を評価するため、各試験条件における  $P_4$  と  $P_{40 \rightarrow 4}$ ,  $P_{40}$  と  $P_{4 \rightarrow 40}$  の旋回操作時間の全被験者平均を比較した。また、提案手法の効果を評価するため、条件間における旋回操作時間変化量の全被験者平均を

比較した。旋回操作時間変化量は、4tクラスに関しては $P_{40 \rightarrow 4}$ と $P_4$ の旋回操作時間の差、40tに関しては $P_{4 \rightarrow 40}$ と $P_{40}$ の旋回操作時間の差とした。この数値が小さいほど、乗り換えの影響を抑制する効果が大きいといえる。

### 2.5.3 試験結果

Fig. 2.20, 2.21 に、例として subA における 4t クラス, 40t クラスそれぞれの、各条件における平均旋回作業軌跡の俯瞰図を示す。実線は切り替え無し、破線は切り替えありの作業軌跡である。また、半透明の領域は標準偏差であり、軌跡のばらつきを表している。図より、乗り換えの有無による作業軌跡のわずかな差異は見られるものの、軌跡およびばらつきに大きな差はない。Fig. 2.22, Table 2.6 に、各条件での作業軌跡のばらつきの結果を示す。対応のある  $t$  検定の結果、乗り換えの有無による軌跡のばらつきに差異は確認されなかった。なお、有意水準は 5% とした。

次に、Fig. 2.23, Table 2.7 に、各条件での旋回操作時間の結果を示す。対応のある  $t$  検定の結果、Conditon1 における  $P_{40 \rightarrow 4}$ ,  $P_{4 \rightarrow 40}$  の旋回操作時間が、 $P_4$ ,  $P_{40}$  と比較して有意に増加することを確認した。Conditon2 及び Conditon3 では機体乗り換えの有無にかかわらず、旋回操作時間に有意な差異は確認されなかった。Fig. 2.24, Table 2.8 に、各クラスにおける旋回操作時間変化量の結果を示す。Holm の多重比較 [57] の結果、4t クラス, 40t クラスにおいて、Conditon1 と比較して、Conditon3 で旋回操作時間変化量が有意に減少することを確認した

Table 2.5: Switching Patterns of Machines

Patterns	Explanation
$P_4$	Operate only 4 t
$P_{40 \rightarrow 4}$	Switch Machine from 40 to 4 t
$P_{40}$	Operate only 40 t
$P_{4 \rightarrow 40}$	Switch Machine from 4 to 40 t

Table 2.6: Test Results of Average Standard Deviation of the Trajectory for Each Conditions

Condition	$P_4$	$P_{40 \rightarrow 4}$	$t(10)$	Hedges'	$p$ value	$P_{40}$	$P_{4 \rightarrow 40}$	$t(10)$	Hedges'	$p$ value
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		$g$		mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		$g$	
Condition1	257 $\pm$ 77	298 $\pm$ 89	1.7	0.44	0.12	613 $\pm$ 172	567 $\pm$ 315	0.50	0.17	0.63
Condition2	280 $\pm$ 100	263 $\pm$ 130	0.81	0.13	0.43	608 $\pm$ 179	655 $\pm$ 211	0.62	0.22	0.55
Condition3	242 $\pm$ 69	311 $\pm$ 126	1.5	0.61	0.16	553 $\pm$ 103	571 $\pm$ 106	0.43	0.15	0.67

Table 2.7: Test Results of Average Operation Time for Each Conditions

Condition	$P_4$	$P_{40 \rightarrow 4}$	$t(10)$	Hedges'	$p$ value	$P_{40}$	$P_{4 \rightarrow 40}$	$t(10)$	Hedges'	$p$ value
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		$g$		mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		$g$	
Condition1	11.2 $\pm$ 1.1	11.9 $\pm$ 0.96	4.4	0.57	*0.0017	16.0 $\pm$ 1.5	16.8 $\pm$ 1.7	2.7	0.43	*0.026
Condition2	11.6 $\pm$ 1.3	12.2 $\pm$ 2.2	1.5	0.27	0.17	16.3 $\pm$ 1.1	17.1 $\pm$ 1.7	1.8	0.48	0.098
Condition3	11.4 $\pm$ 1.5	11.4 $\pm$ 1.2	0.014	0.0017	0.99	15.6 $\pm$ 1.3	15.3 $\pm$ 1.4	0.91	0.17	0.37

## 2.5.4 考察

実験結果より、画像提示、動画提示条件にて乗り換えによる作業時間の増加を抑制する効果が確認され、また動画提示条件が、機体切り替えによる作業時間の増加を抑制する効果が最も大きいことが明らかとなった。また、旋回作業軌跡およびばらつきの結果より、異なるクラスへの乗り換えが作業軌跡に影響を及ぼさないことが確認されたことから、Condition1における作業時間の増加は、被験者のレバー操作入力に乗り換えの有無で変化した為であると考えられる。

Fig.2.25 に、DBA により平均化を施した subA における 4t クラス、40t クラスにおける平均旋回操作入力を示す。なお、シミュレータにおける操作入力の最大値は 1 としている。これより、4t クラス、40t クラスともに、乗り換えの有無に関わらず、操作入力開始時は最大まで入力し、ある時点で入力を減少させ旋回減速操作を行っているが、この旋回減速操作が切り替えの有無で異なっていることが分かる。そのため、この旋回減速操作の変化が作業時間の増加に起因していると考え、旋回減速操作開始時点を中心として作業時間を分割し、詳細の分析を実施した。Fig.2.26, 2.27 それぞれに、4t クラス、40t クラスにおける旋回移動操作時間、旋回停止操作時間を示す。ここで、旋回移動操作時間は操作入力開始から旋回減速操作開始までの時間、旋回停止操作時間は旋回減速操作開始から操作入力終了までの時間とした。図より、4t クラスでは旋回停止操作時間が乗り換え有で有意に増加し、一方で 40t クラスでは旋回移動操作時間が乗り換え有で有意に増加することを確認した。この結果は 4t クラスでは旋回

Table 2.8: Test Results of Increase in Average Operation Time for Each Classes

Class	Condition1	Condition2	Condition3	Condition1-2			Condition1-3			Condition2-3		
	<i>mean</i> ± <i>SD</i>	<i>mean</i> ± <i>SD</i>	<i>mean</i> ± <i>SD</i>	<i>t</i> (10)	Hedges' <i>g</i>	<i>p</i> value	<i>t</i> (10)	Hedges' <i>g</i>	<i>p</i> value	<i>t</i> (10)	Hedges' <i>g</i>	<i>p</i> value
4t	0.64 ± 0.45	0.55 ± 1.0	-0.0026 ± 0.53	0.25	0.096	0.81	3.5	1.1	*0.019	1.3	0.57	0.43
40t	0.78 ± 0.82	0.76 ± 1.2	-0.26 ± 0.82	0.042	0.014	0.96	3.3	1.0	*0.026	2.1	0.87	0.12

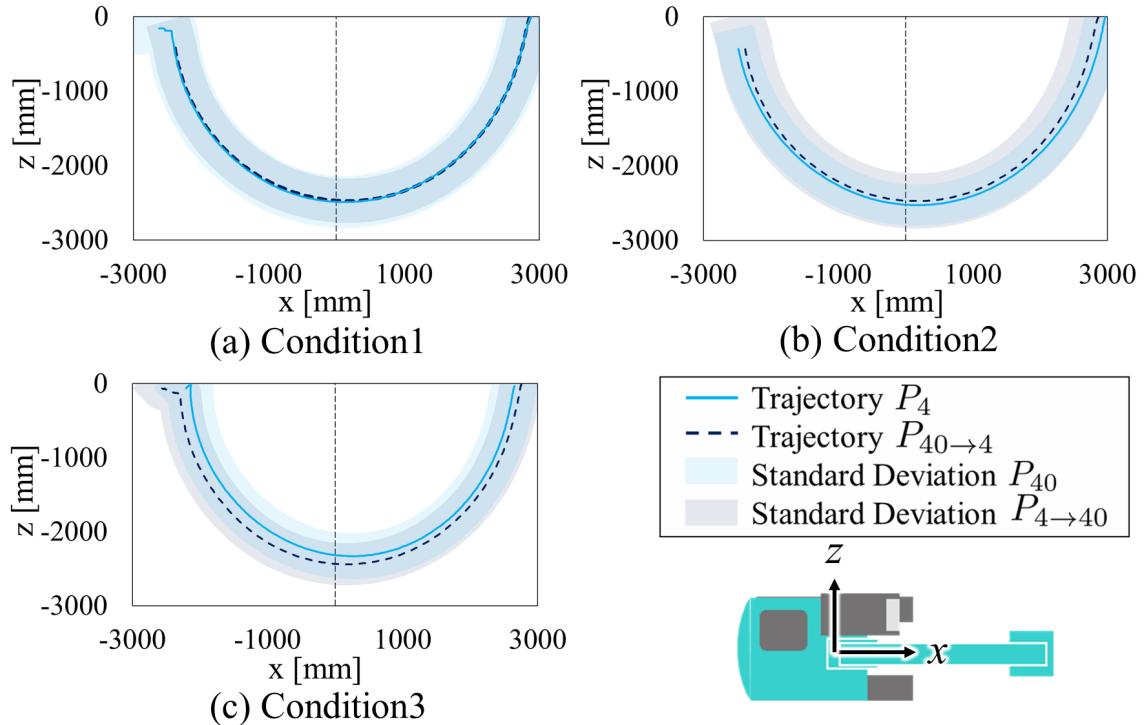


Fig. 2.20: Result of Average Swing Trajectory of 4t Class

停止に時間を要したことを，40t クラスでは旋回停止操作開始が遅れたことを意味する。

Fig.2.18 の通り，4t クラスは40t クラスと比較して，操作入力に対する応答が早く，停止操作時の素早い操作が必要となる．しかし，機体を乗り換える場合，乗り換えない場合と比較して旋回停止操作に時間がかかっている．これは被験者が乗り換え前の40t クラス操作時の影響を受け，4t クラスの応答に対応できず，停止位置調整に時間を要したことを示唆している．一方40t クラスは4t クラスと比較して，操作入力に対する応答が遅く，目標位置で停止をするために，より早い段階で旋回停止操作を開始する必要がある．しかし，機体を乗り換える場合，乗り換えない場合と比較して旋回操作時間が増加している．これは被験者が乗り換え前の4t クラス操作時の影響を受け，40t クラスでの旋回停止操作開始が遅れたことを示唆している．文脈情報を与えない，尤度モデルによる切り替えは，環境が変わった後も直ちに变化

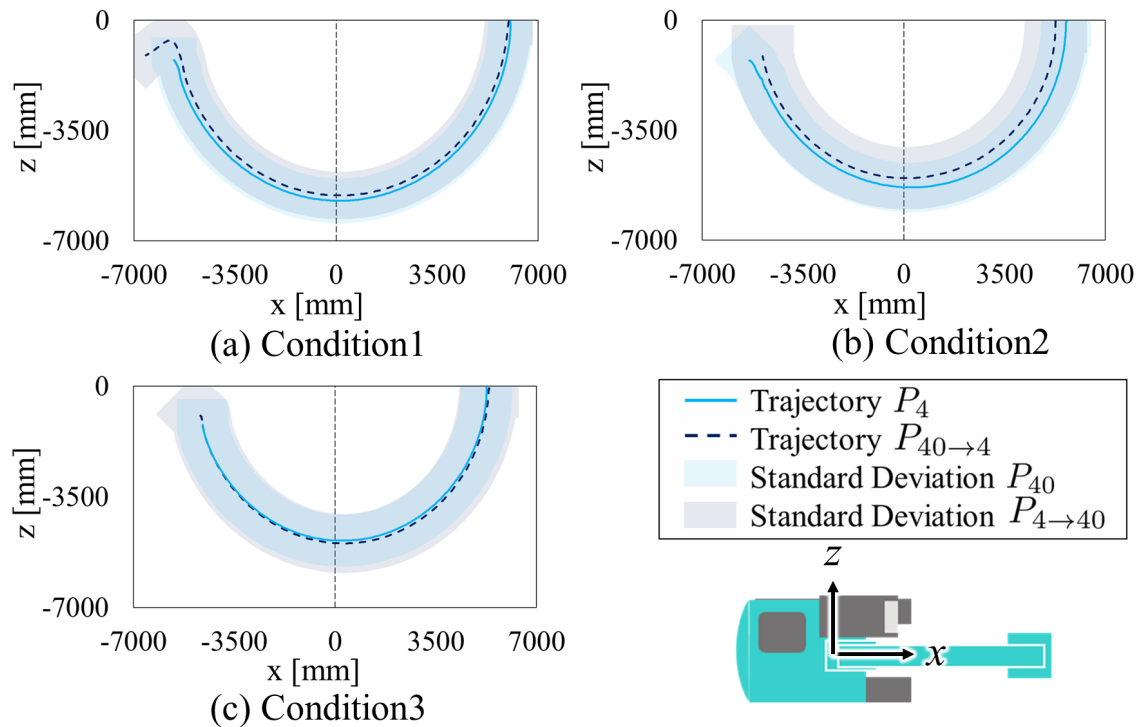


Fig. 2.21: Result of Average Swing Trajectory of 40t Class

せず、運動を行いながら徐々に切り替わる [38]. Condition1 は機体乗り換えの際に文脈情報を与えない条件であり、乗り換え後の動特性に応じた適切な内部モデルへの切り替えが遅れたことを示唆している。

Condition2 において乗り換えの影響を軽減する効果が小さかったことは、画像提示が文脈情報として十分に機能せず、適切な内部モデルへの切り替えができなかったことを意味する。画像提示手法では、被験者が機体のサイズ差の情報から、乗り換え先の機体における旋回動特性を推測することを想定した。しかし、油圧ショベルの機体特性は、搭載されるポンプやアクチュエータ性能にも依存するため、機体サイズと動特性が必ずしも線形の関係ではない。小岩井ら [58] は、システムの応答性に関する指標として、システムの立ち上がり時間を決定するパラメータである  $L$  及び  $T$  の和 ( $L+T$ ) とオペレータの応答性評価に相関があることを報告している。上記の応答性指標を用いて、今回の画像提示条件における 4t クラス、40t クラスの上部旋回体の画像上の面積差と  $L+T$  を比較すると、上部旋回体の画像上面積差は約 1.9 倍の差があったのに対し、 $L+T$  には約 2.8 倍の差異があった。このことは、機体サイズ差

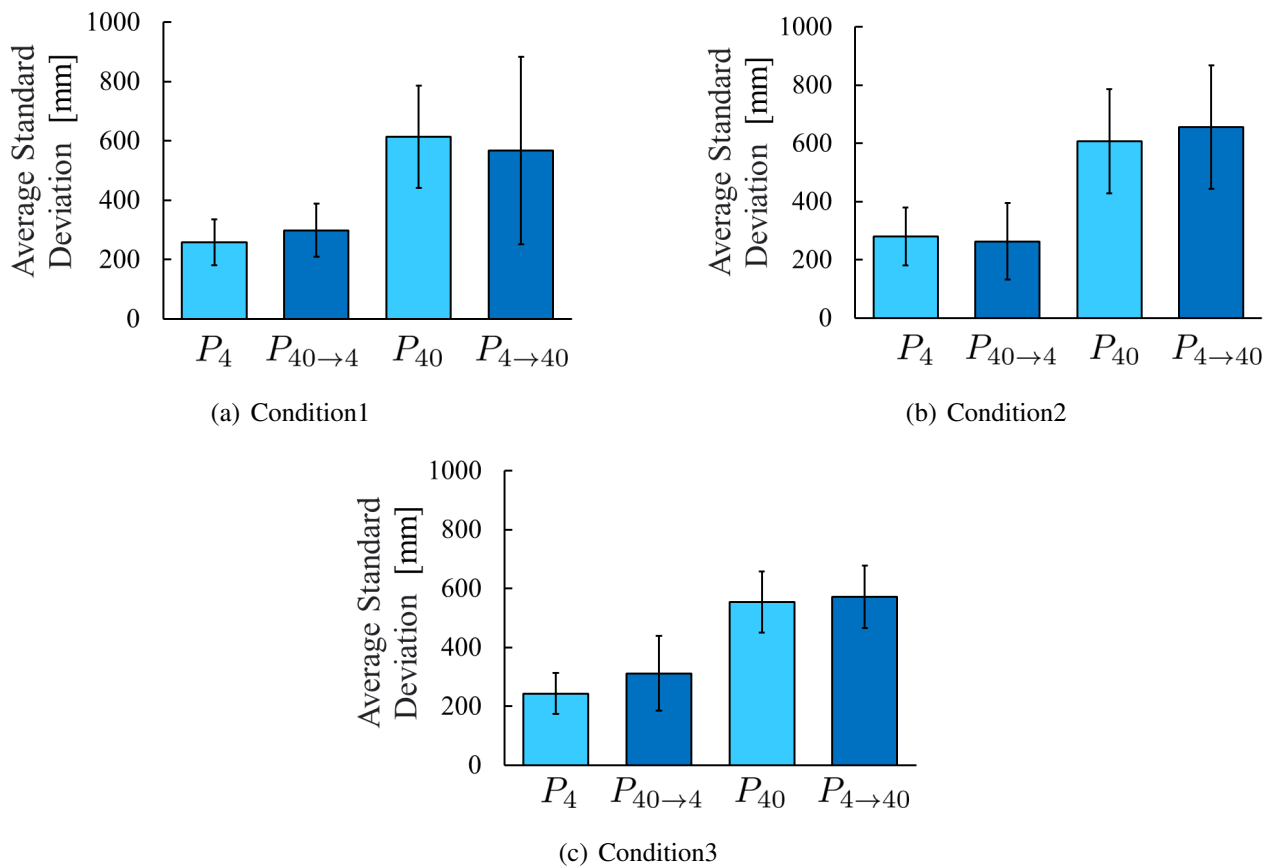


Fig. 2.22: Result of Average Standard Deviation of the Trajectory for Each Conditions. Error bars indicate standard deviation.

から推測される動特性と、実際の動特性に乖離が生じたことを示唆している。この乖離により、適切な内部モデルにおける責任信号が減少し、最終的な運動指令における適切な逆モデルからの出力の寄与度が低下した可能性が考えられる。これにより被験者は効率的な操作が行えず作業効率低下の抑制がなされなかったと考えられる。先述の乖離を考慮した画像提示手法の提案とその効果については今後検証する余地がある。また、今回の実験では4tクラス、40tクラス油圧ショベルの操縦経験のないオペレータを対象としたが、熟練者と非熟練者では認知の仕方に違いがあることが言われており [27]、重機操作に関する記憶の量が豊富な熟練オペレータでは、画像提示手法で動特性のより正確な推測が可能となると考えられる。オペレータの熟練度によって、提案手法による効果に差異が見られるかは検討の余地がある。

Condition3では、乗り換えにおける作業効率の低下を抑制する効果が確認された。このことは、2.3章における実験結果と同様、動画提示手法は内部モデル切り替えの文脈情報として

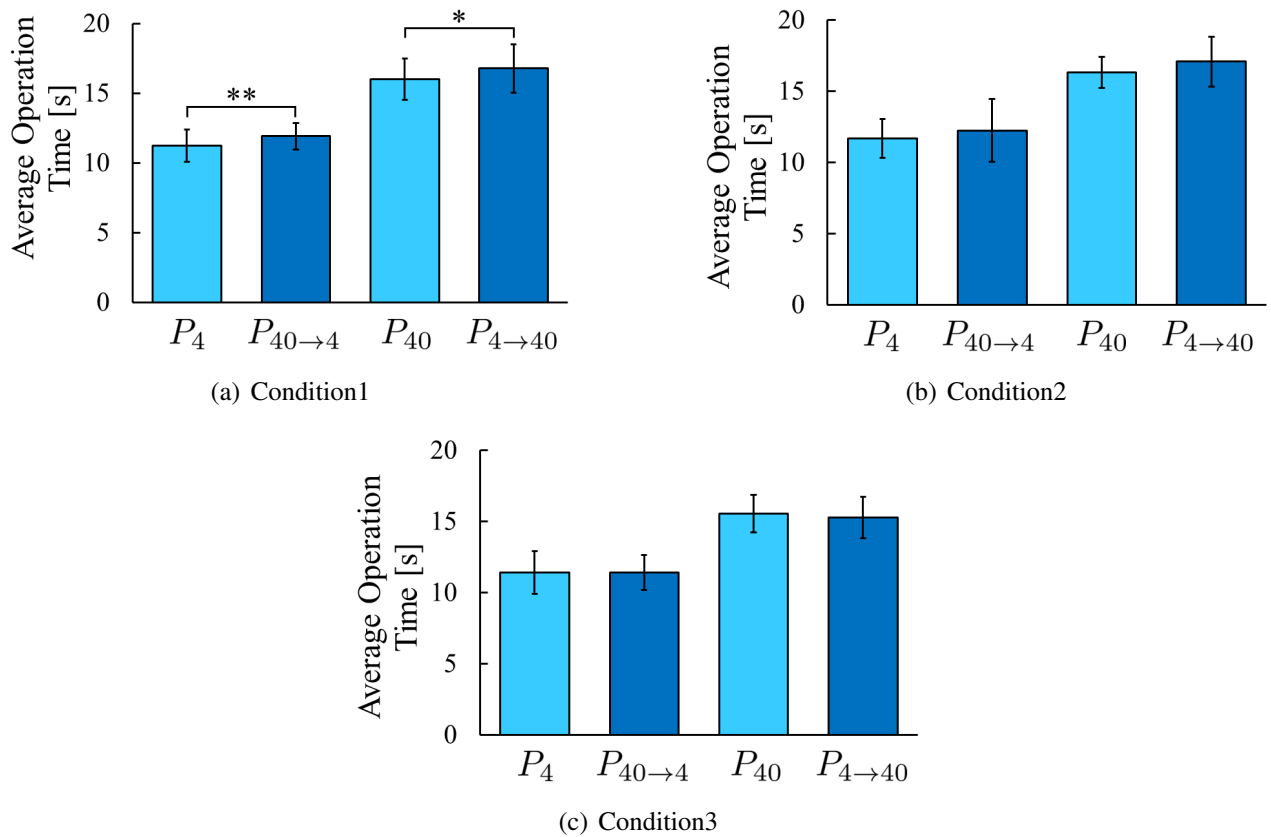


Fig. 2.23: Result of Average Operation Time for Each Conditions. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ , \*\* :  $p < 0.01$ ).

効果的でありることが本実験でも示された。

## 2.6 結言

本研究では、遠隔操作油圧ショベルにおける異なるクラスへの乗り換えが作業効率に与える影響を軽減するための手法として、内部モデルの切り替えを支援するインターフェースを提案した。提案手法として、機体乗り換え先の動特性情報を事前に提示することが内部モデルの速やかな切り替えを可能とし、乗り換えが作業効率に与える影響を軽減できるという仮説の基、オペレータに動特性情報を事前に提示する手法として機体がフルレバー操作で稼働する様子を動画により視覚提示するインターフェースを提案した。提案手法の有効性を検証するため、遠隔操作油圧ショベル実機による被験者試験を行った結果、提示をせずに動特性が変化する条件において、変化しない場合と比較して旋回操作時間が増加することを確認した。



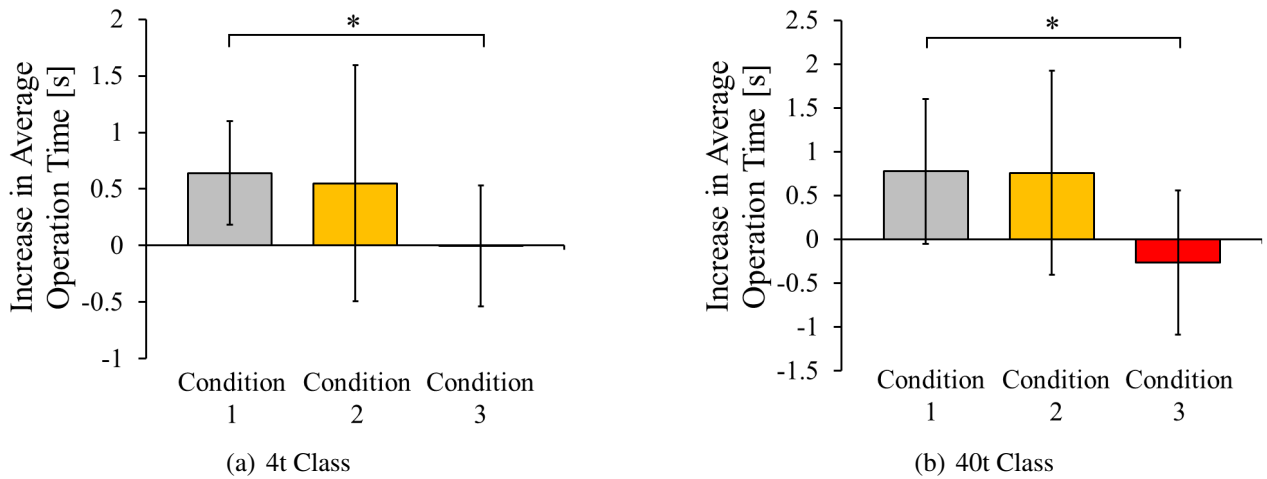


Fig. 2.24: Increase in Average Operation Time for Each Classes. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences ( $*$  :  $p < 0.05$ )

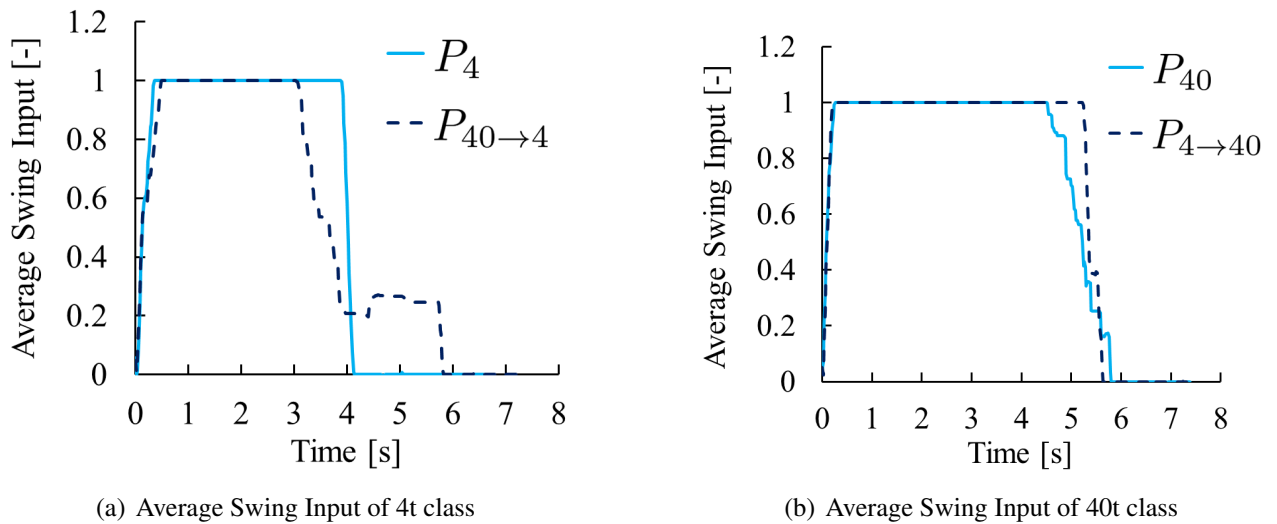
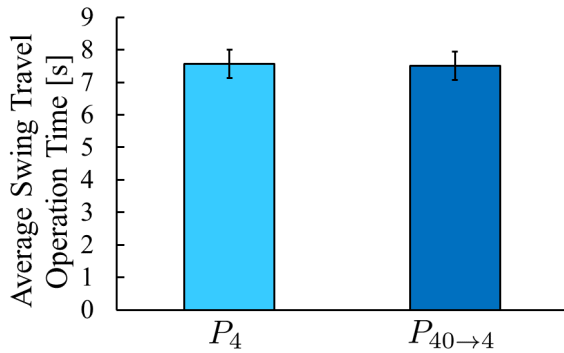
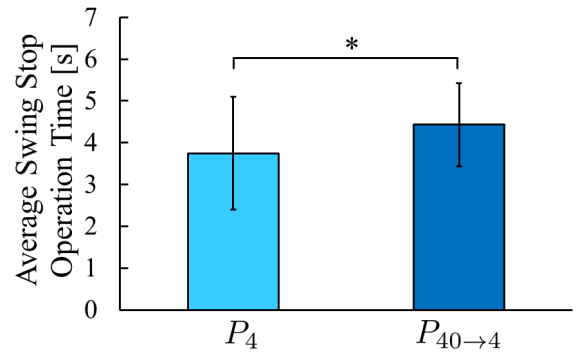


Fig. 2.25: Average Swing Input

一方提案手法では旋回操作時間の増加は確認されず，提案手法が乗り換え先の動特性の理解を支援可能であり，内部モデルの速やかな切り替えにより効率的な操作が可能となることが確認された．また，動特性情報の提示時間は可能な限り短時間であることが望ましいとの考えから，静止画により動特性情報を提示する手法として，機体サイズに着目し，現在操作している機体及び次に操作する機体の側面図を並べて表示する手法を提案した．提案手法の有効性を確認するため，シミュレータによる被験者試験を行った結果，提示をせずに乗り換える条件において，乗り換えによる旋回操作時間の増加を確認した．また画像提示手法は，動画提示手法と比較して旋回操作時間の増加を抑制する効果が小さく，内部モデル切り替えの

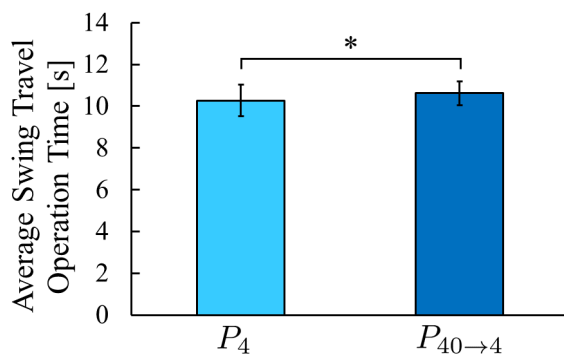


(a) Average Swing Travel Operation Time

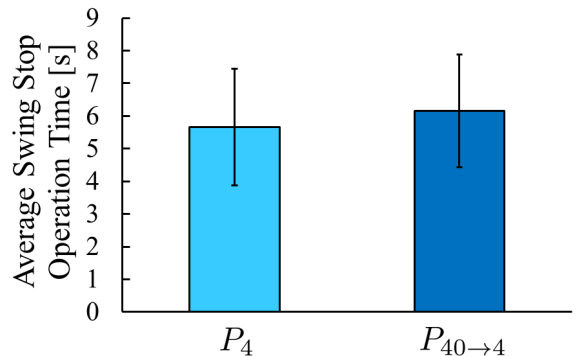


(b) Average Swing Stop Operation Time

Fig. 2.26: Time Division of 4t-class Swing Operation Time. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ )



(a) Average Swing Travel Operation Time



(b) Average Swing Stop Operation Time

Fig. 2.27: Time Division of 40t-class Swing Operation Time. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ )

効果が弱いことを確認した。以上の結果から、本章では動特性の提示が内部モデルの切り替えに効果的であるとともに、機体サイズ差は動特性の認知に影響せず、内部モデル切り替えのためには動特性情報を直接的にオペレータに提示する必要があることが明らかになり、動特性情報の提示に必要な要件が明らかとなった。

# 第3章 遠隔操作油圧ショベルにおけるア タッチメント関節負荷率フィード バック

## 3.1 緒言

本章では，オペレータにフィードバックする機体情報として，機体に掛かる負荷に着目する．増永ら [59] は，遠隔操作油圧ショベルを模したシミュレータによる油圧ショベルの掘削積み込みタスクにおいて，クラスの異なる機体に乗り換えた際の作業時間が，乗り換えを行わない場合と比較して増加することを報告しており，この作業時間の増加が，作業アタッチメント先端の移動速度低下に起因するものであることを確認している．油圧ショベルにおけるアタッチメントの動作速度は，アタッチメントに掛かる負荷が大きくなるに従って低下してゆく．よってこのバケット移動速度の低下は，異なるクラスに乗り換えて掘削作業を行う際に，乗り換えを行わない場合と比較し，より大きな負荷がアタッチメントに掛かったことを示唆している．

この要因として，遠隔操作油圧ショベルにおいてオペレータがアタッチメントにかかる負荷を知覚しにくいことが挙げられる．実搭乗において，熟練オペレータは掘削負荷を意識しながら作業を行っていると言われている [60, 61] が，遠隔操作油圧ショベルは，運転席に設置されたカメラ映像を介した視覚情報により操作を行うものであり [62]，視覚情報のみではアタッチメントの負荷を推測することが困難である．また，アタッチメントの移動速度は，ア

タッチメントの最大発揮力に近づくに従って低下することから、効率的に土を掘削するために、オペレータはアタッチメントの最大発揮力に対する負荷の程度を意識する必要がある。しかし、遠隔操作油圧ショベルでは、アタッチメントやアクチュエータのサイズといった情報が把握しづらく、そこからアタッチメントの最大発揮力を測ることは困難であると予想される。そのため、機体の乗り換えによる作業効率の低下を抑制するために、最大発揮力を考慮した負荷情報をオペレータにフィードバックする必要がある。従来より、油圧ショベルの負荷情報をオペレータにフィードバックする手法について研究され、それが作業効率に与える効果について報告されている。Lucasら [63] は、油圧ショベルを模したロボットを用いて、掘削作業時のバケット先端に掛かる反力をハプティクスデバイスにより力覚提示することで、高負荷を回避でき、消費電力が低下することを確認した。Meeraら [64] は、力覚提示可能なジョイスティックを用いた油圧ショベルの関節負荷トルクフィードバック手法を提案し、シミュレータを用いた油圧ショベルの土砂積み込みタスクにおいて、力覚提示をしない場合と比較し高負荷を回避し、また積み込み土量が増加することを確認した。Choら [65] は、モーションスケーリングと触覚フィードバックを併用した建設関連の遠隔操作ロボットシステムを提案し、タスク完了時間の短縮を確認した。また、リーダー側からの動作指令とフォロワー側からの力情報の双方向の伝送を実現可能なバイラテラル制御に関する研究も行われており、作業効率への効果が期待される [66, 67, 68]。しかし、クラス毎の最大発揮力を考慮した負荷指標のフィードバック手法に関する研究は筆者の知る限りなされていない。

そこで本研究では、「アタッチメント関節負荷率」という最大発揮力を考慮した負荷指標を定義し、これをオペレータにフィードバックすることを提案する。フィードバックの手法として、オペレータが直感的にアタッチメント負荷を知覚できるよう、力覚によるフィードバック手法を提案した。本論文では、掘削作業を対象とし、アタッチメント関節負荷率をオペレータへフィードバックすることで、異なるクラスの機体への乗り換えが作業効率に与える影響を軽減できるという仮説のもと、実験にて一般的な油圧ショベルの操作特性および従来の負

荷フィードバック手法との比較を行った。

本章ではまず、提案手法として負荷指標である「アタッチメント関節負荷率」の定義とフィードバック手法について説明する。次に、提案手法の有効性を検証するための、遠隔操作油圧ショベルを模したシミュレータ構築および実験プロトコルと実験結果について説明する。次に、実験結果の内容について協議する。最後に、結論について述べる。

## 3.2 提案手法

### 3.2.1 アタッチメント関節負荷率の定義

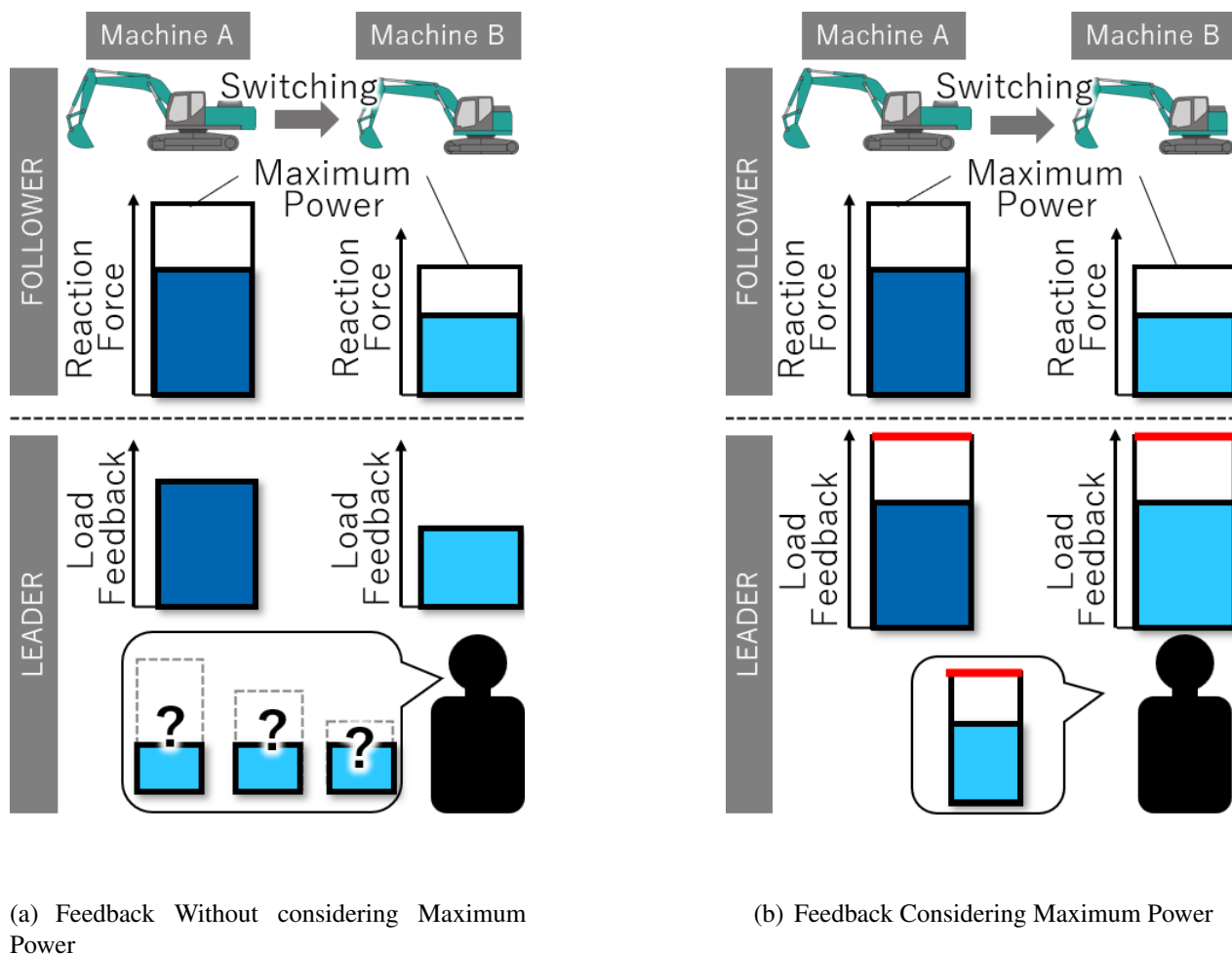


Fig. 3.1: Image of Feedback on Reaction Force

油圧ショベルは、クラス毎にアタッチメントの最大発揮力が異なり、オペレータは最大発揮

力を考慮し、クラスに応じてアタッチメントに掛かる負荷を変化させる必要がある。オペレータが乗り換え先の機体の最大発揮力を把握できない場合、Fig. 3.1(a)に示すように、フィードバックされる負荷が最大発揮力に対してどの程度であるか正しく認識できず、その結果乗り換えを行わない場合と比較してより大きな掘削負荷がかかり、作業効率が低下すると予想される。そのため、本研究ではFig. 3.1(b)に示すように、最大発揮力に対する負荷の程度を示す指標をオペレータにフィードバックすることを提案する。ブーム、アーム、バケットにはそれぞれアクチュエータとして油圧シリンダー [69] が接続されており、油圧シリンダーの性能によって関節ごとの最大発揮力が決定される。そこで本研究では、アタッチメントの各関節における最大発揮力に対する負荷の割合を「アタッチメント関節負荷率」とし、式(3.1)のように定義した。

$$L_i = \frac{T_i}{T_{max_i}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.1)$$

ここで、 $L_i$  はアタッチメント関節負荷率、 $T_i$  はアタッチメントの各関節が受ける負荷トルク、 $T_{max_i}$  は各関節の最大発揮トルクを表しており、関節の最大発揮トルクに対する負荷トルクの程度を表している。なお、添え字  $i = 1, 2, 3$  は各アタッチメントに対応しており、それぞれブーム、アーム、バケットである。また、 $T_{max_i}$  を油圧シリンダーの最大推力より導出する。油圧ショベルには、アクチュエータを保護するため設定圧力以上の圧力がかからないような仕組みとなっている。本論文ではこの設定圧力到達時の推力を油圧シリンダーの最大推力として用いることとする。また、油圧シリンダーは伸縮する方向により最大推力が異なる。そのため、 $T_{max_i}$  は、どの向きに負荷トルクを受けているかを考慮する必要がある。 $T_{max_i}$  は、Fig.3.2に示すように、各アタッチメントのリンク機構及びシリンダー推力の関係から、式(3.2)~(3.4)よ

うに表すことができる.

$$T_{max_1} = \begin{cases} r_1 F_{st_1} \sin(\theta_{r_1}) & \text{(Stretch)} \\ r_1 F_{sh_1} \sin(\theta_{r_1}) & \text{(Shrink)} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$T_{max_2} = \begin{cases} r_2 F_{st_2} \sin(\theta_{r_2}) & \text{(Stretch)} \\ r_2 F_{sh_2} \sin(\theta_{r_2}) & \text{(Shrink)} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$T_{max_3} = \begin{cases} r_3 F_{st_3} \cos(\theta_{r_{31}}) \sin(\theta_{r_{32}}) & \text{(Stretch)} \\ r_3 F_{sh_3} \cos(\theta_{r_{31}}) \sin(\theta_{r_{32}}) & \text{(Shrink)} \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで,  $r_i$  は各アタッチメントの関節とリンク間の距離であり,  $F_{st_i}$ ,  $F_{sh_i}$  はそれぞれシリンダー伸方向, 縮方向の最大推力である. また,  $\theta_{r_i}$  はリンク間のなす角である.

### 3.2.2 アタッチメント関節負荷率のフィードバック方法

アタッチメント関節負荷率の提示手法として力覚デバイスによるフィードバックを提案する. 力覚のようなハプティックフィードバックでは, より現実に近い力感覚を提示可能であるとともに [70], 認知プロセスにおける意味の解釈を短絡化した直観的認知を提供可能であることが言われており [71, 72], 負荷の認知を正確にかつ素早く行うことができると考えた. また, 力覚提示の方法として, 能動的な力覚提示が可能なアクティブ型と, 受動的な力覚提示のためのパッシブ型が存在する [73] が, 油圧ショベルの操作方式はレバーによりアクチュエータの目標速度を指令するであり, 操作静止中もアクチュエータに負荷がかかる可能性を考慮し, 本研究ではアクティブ型の力覚フィードバックを採用した. 本研究では, 式 (3.5) に

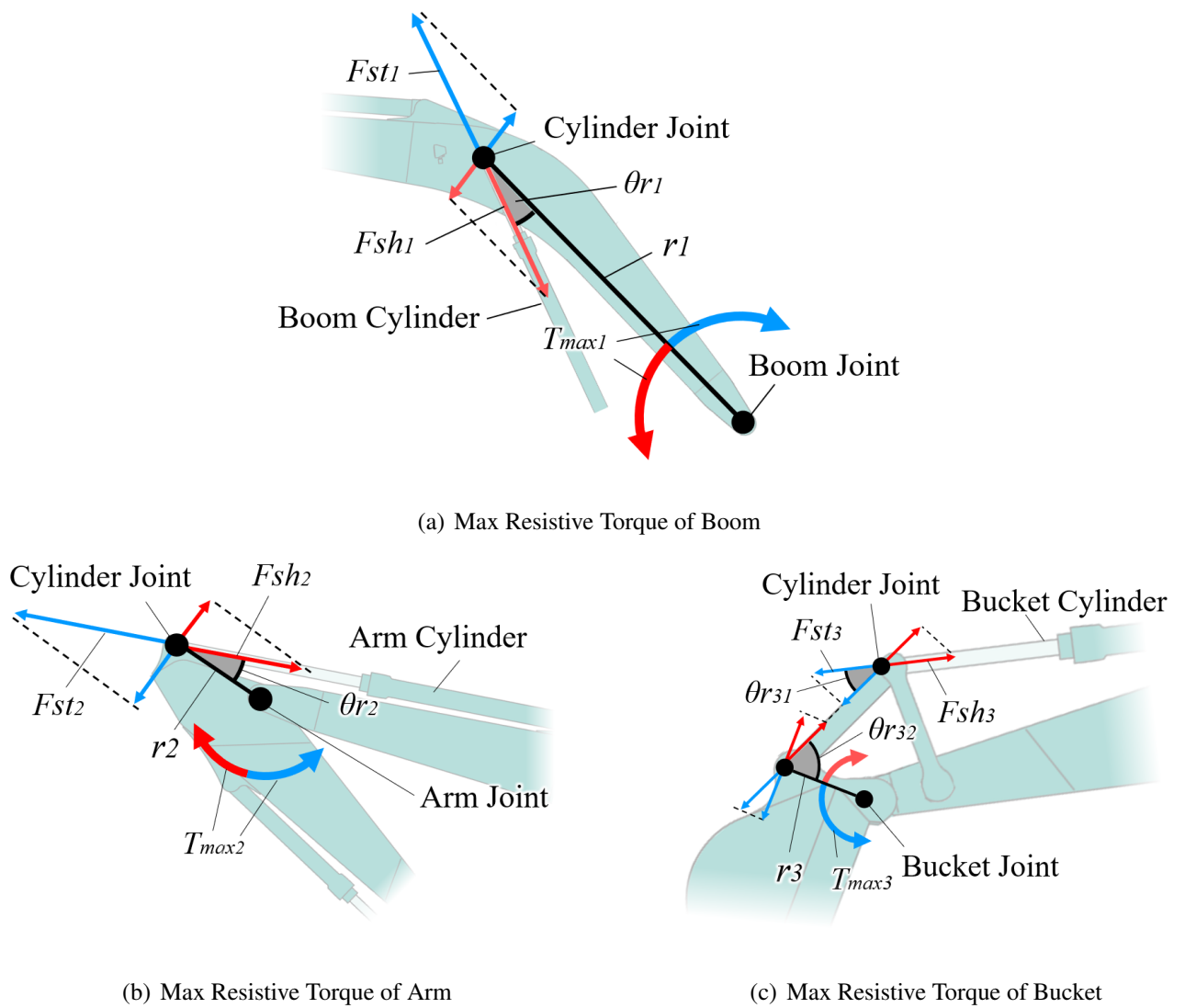


Fig. 3.2: Max Resistive Torque of Each Attachment

示すように、 $L_i$  に対して操作レバーの反力トルク  $\tau_i$  が線形に増加するように提示することとした。

$$\tau_i = \tau_{l_{max}} \cdot L_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.5)$$

ここで、 $\tau_{l_{max}}$  は、提示するレバー反力トルクの最大値である。また、反力トルクを提示する方向は、オペレータが直観的に負荷を知覚できるよう、例えばブーム上げ方向に対する負荷トルクに対してはブーム上げ方向に提示するといったように、各関節において負荷トルクがかかる方向と、レバーの操作方向が対応することとした。



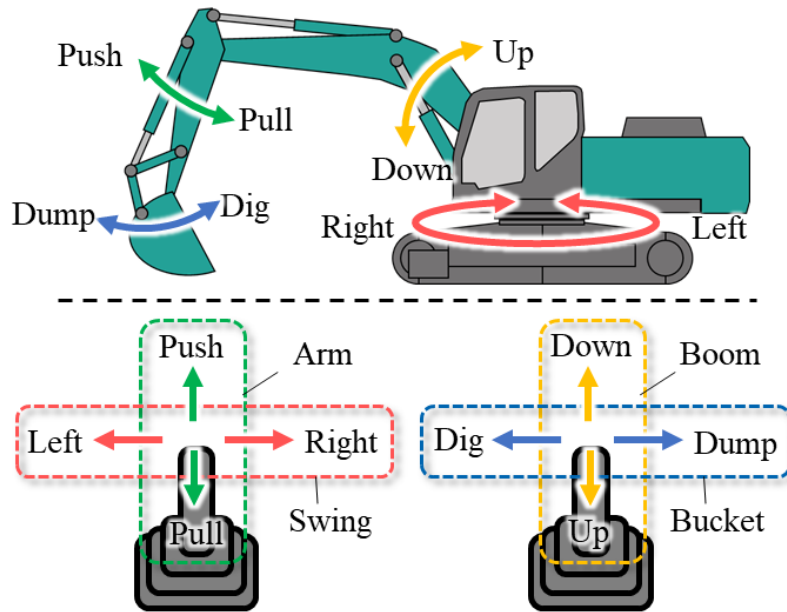


Fig. 3.3: Conventional Lever of Hydraulic Excavator

### 3.3 シミュレータを用いた検証

#### 3.3.1 シミュレータの構築

提案手法の有効性を確認するための、異なるクラスへの乗り換えが可能な、遠隔操作油圧ショベルを模したシミュレータを作成した。Fig.3.4に使用したシミュレータ、Fig.3.5にシミュレータの構成図を示す。シミュレータは2本の力覚提示操作レバー、モニター、PCから成り、シミュレーション環境はゲームエンジンUnityを用いて作成した。シミュレーション環境内には、13tクラスおよび20tクラス油圧ショベルの3Dモデルを配置し、それらを乗り換えて掘削作業を行えるようにした。また、モニターに映る映像は実機運転席からの視点となるようにした。13tクラス、20tクラスのクラス間の機体サイズの差異およびそれぞれの運転席から見た視点はFig.3.6(a), (b)に示す通りである。

機体の挙動は、操作レバーからの入力量に従ってアタッチメントの動作角速度が下記によ



Fig. 3.4: Simulator Environment

うに一時遅れ+むだ時間系で決定されるようにした.

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (3.6)$$

ここで、 $K$  はシステムゲイン、 $T$  は時定数、 $L$  はむだ時間を示す. 例として、Fig.3.7 に 13t クラス及び 20t クラスにおける、ブームおよびアームのステップ入力に対する角速度応答を示す. なお、角速度については 13 t クラスの各アタッチメントにおけるシステムゲインで正規化を施している. また、一般的な油圧ショベルには、油圧ポンプを保護するための機能として、負荷による油圧回路の圧力増加に従って、油圧ポンプの作動油吐出量を減少する制御が行われている [74]. 作動油吐出量が減少すると、アタッチメントの稼働速度は低下する. また、掘削作業では、アームが動作する比率が大きい. そこで、アームの挙動が実態と近くなるよう、掘削中のアームのゲイン  $K_A$  が、掘削反力に応じて式 (3.7) のように変更されるようにした. また、土質は高密度の土が一様に分布していると仮定した.

$$K_A = K_{A_{max}} \frac{F_{max} - F}{F_{max}} \quad (F \leq F_{max}) \quad (3.7)$$

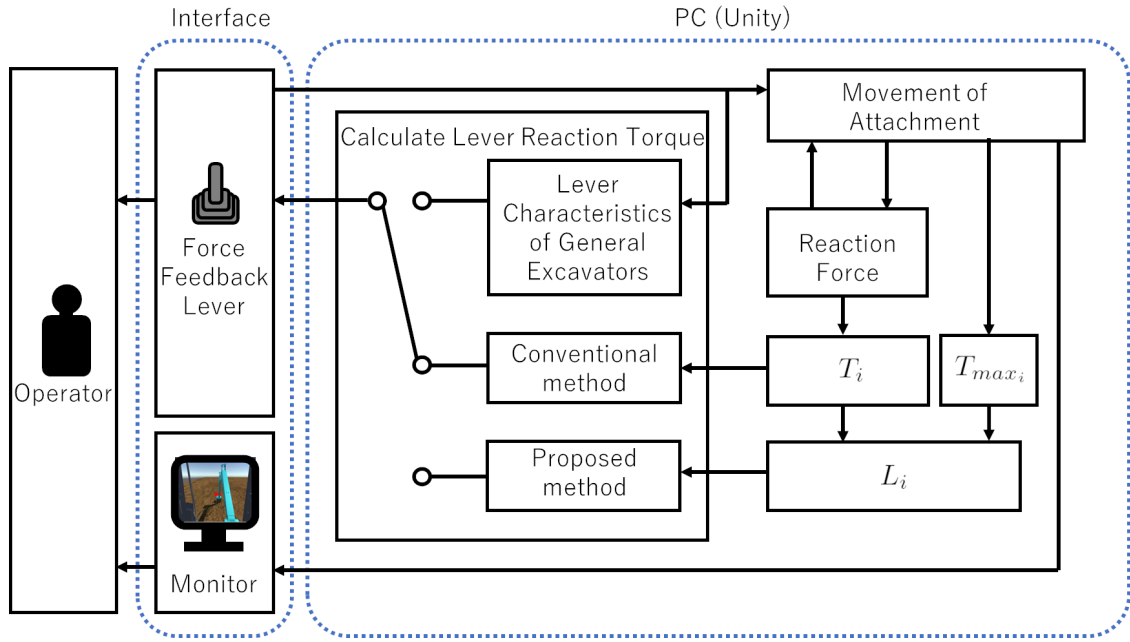


Fig. 3.5: Simulator Configuration

ここで,  $K_{Amax}$  はゲインの最大値,  $F_{max}$  はゲインがゼロとなる掘削反力である. また, 掘削反力  $F$  は, 伊藤ら [55] の手法に倣い, バケット先端に掛かることとして導出した.

各関節にかかる負荷トルク  $T_i$  は以下のように表すことができる.

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_i)^T \mathbf{F} \quad (3.8)$$

ここで,  $\mathbf{T}_i$  は各関節の負荷トルクを表すベクトル,  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_i)$  はヤコビ行列,  $\boldsymbol{\theta}_i$  は各アタッチメント角度,  $\mathbf{F}$  は掘削反力ベクトルである. また,  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_i)$  は式 (3.9) のとおりである.

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_i) = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & -l_2 s_{12} & -l_3 s_{123} \\ -l_1 c_1 & -l_2 c_{12} & -l_3 c_{123} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ただし,  $l_i (i = 1, 2, 3)$  は各アタッチメントの長さ,  $s_1 = \sin(\theta_1)$ ,  $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ ,  $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ ,  $c_1 = \cos(\theta_1)$ ,  $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ ,  $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$  であり, 各アタッチメント長さ及び角度  $\theta_i$  は Fig.3.8 のように定義される.

レバーの反力トルクについて, 本論文では提案手法のほかに以下の2つの算出方法から選



(a) Sideview and Viewpoint from the Cabin of 13t Class



(b) Sideview and Viewpoint from the Cabin of 20t Class

Fig. 3.6: Sideview of and Viewpoint from the Cabin for Each Classes

択できるようにした.

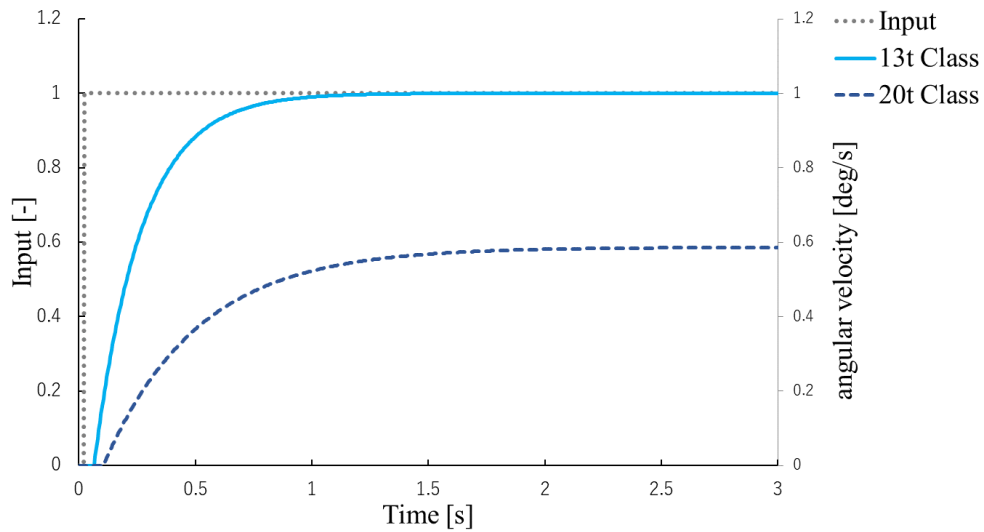
- (1)：一般的な操作レバー特性
- (2)：従来手法

(1)は、一般的な油圧ショベルの操作レバー特性を再現し、レバーの操作入力量に応じて反力トルクが線形に大きくなるようにした。ここで算出される反力トルクは掘削反力の影響を受けない。

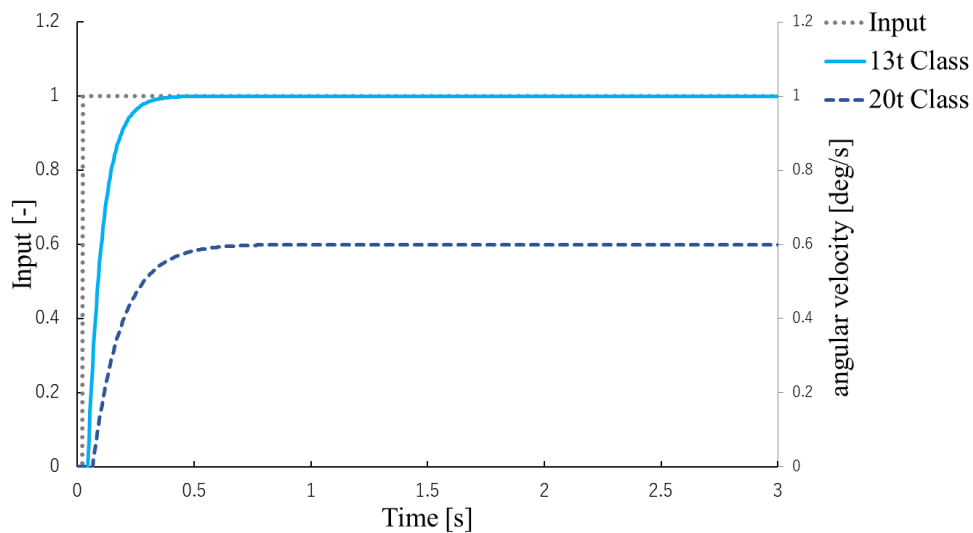
(2)における従来の負荷指標のフィードバック手法として、LucasやHaungら[63][76]は、アタッチメントの関節トルク情報を取得し、操作者にフィードバックすることを提案している。そこで、本論文では式(3.10)に示すように、関節トルク $T_i$ に対してレバーの反力トルク $\tau_{l_i}$ が線形に増加するように提示することとした。

$$\tau_{l_i} = \frac{\tau_{l_{max}}}{T_{max}} \cdot T_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.10)$$

ここで、 $T_{max}$ は、20 tクラスの最大発揮トルクである。これは、発揮力の小さい小型のクラ



(a) Step Response of Boom Operation of 13t and 20t Class



(b) Step Response of Arm Operation of 13t and 20t Class

Fig. 3.7: Step Response of Each Classes

スほど、フィードバックされる反力トルクが小さくなることを意味しており、クラス毎の関節トルクの差異を表現している。

力覚提示操作レバーは、Fig.3.9 に示す反力フィードバック機能付きステアリングホイール (Thrustmaster, T500RS) に油圧ショベルの操作レバーを取り付けたものを用いた。また、油圧ショベルにおける掘削作業は、ブーム、アーム、バケットの3つのアタッチメントを操作して行われるが、実験における被験者毎の操作技量の差の影響や、機体乗り換えの作業効率への影響を詳細に分析することを鑑み、可能な限り単純な操作で行える方が良い。そこで本論文

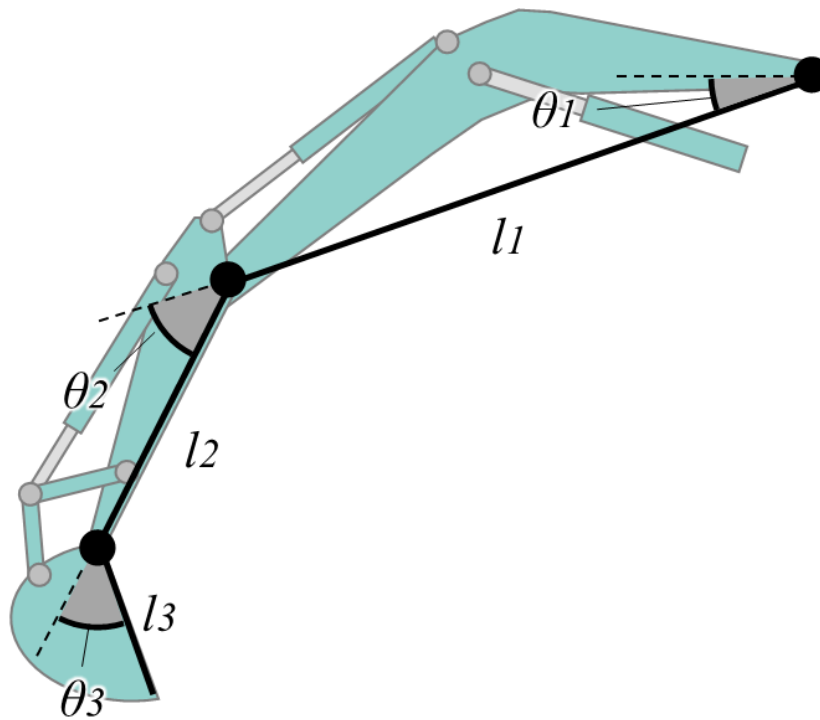


Fig. 3.8: Definition of Attachment Length and Angle

では、掘削作業において動作の比率が大きいブームおよびアーム操作のみで掘削が行えるようにし、バケットに対する操作入力はできず、また反力トルクの提示も行わないこととした。

### 3.3.2 実験プロトコル

シミュレータを用いた被験者試験を実施した。実験タスクは掘削タスクとし、Fig.3.10に示すように、初期姿勢状態で操作を開始してから、バケット先端が水平方向に所定の長さ移動するまでを1回の掘削とした。バケット先端の水平方向の移動距離は、初期姿勢状態におけるブームの根元からバケット先端までの長さの60%とした。また、掘削中は算出される土量に応じてバケットに土が入る様子を再現した。

実験条件はTable 3.1に示す3条件とした。また、C1~C3において、クラスの異なる機体への乗り換えの影響を確認するため、Table 3.2に示すように、異なるクラスの機体への乗り換えを行わない場合と行う場合とで、計4つの乗り換えパターンを用意した。乗り換えを行





Fig. 3.9: Force Feedback Lever

わない場合は、クラスを変えずに20回の掘削タスクを行った。乗り換えを行う場合は、10回掘削タスクを実施したのち、異なるクラスの機体に乗りに換えて再度10回掘削タスクを実施した。なお実験では、乗り換えの影響を検証するため、後半10回分のデータを評価に用いた。また、条件毎のタスク実施前に1クラス当たり10回掘削タスクの練習を行った。

被験者として、建設機械会社の社員を対象に実験参加者を募集した。被験者は油圧ショベルでの掘削作業経験のある手足に疾病のない成人とした。最終的に平均年齢31.0歳の健康な成人10名が実験に参加した。実験に先立ち、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。条件毎の影響を軽減するため、条件間に1時間半以上の時間を空けて実験を実施した。また、順序効果の影響を考慮し、実験条件および乗り換えパターンの実施順は被験者毎にランダム化した。なお、被験者には、ブーム及びアーム操作のみで掘削を行うこと、可能な限り短時間で多くの土量を掘削することを指示した。また、レバー反力に対する被験者間の

Table 3.1: Experimental Conditions

Condition	Explanation
C1	一般的な操作レバー特性
C2	従来手法
C3	提案手法

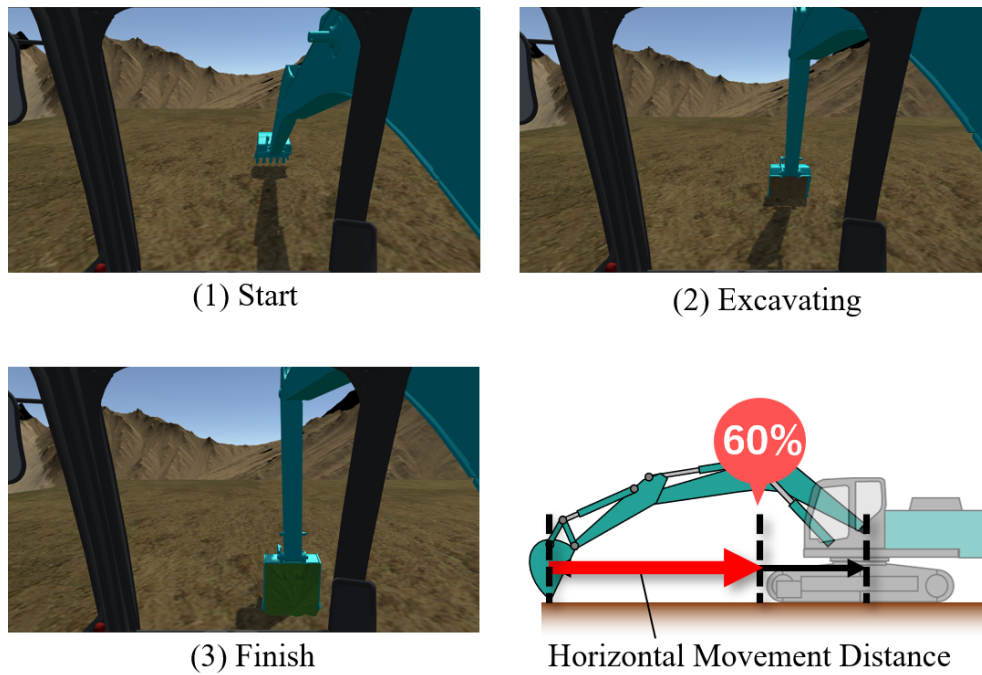


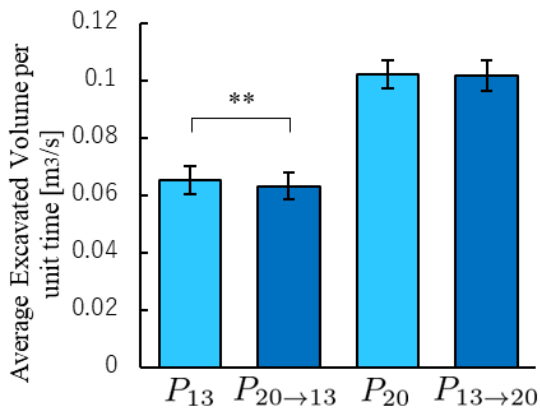
Fig. 3.10: Excavation Task

認識を統一するため、C2 及び C3 での試験では、レバーにアタッチメント関節の負荷が反力としてフィードバックされることを事前に説明した。

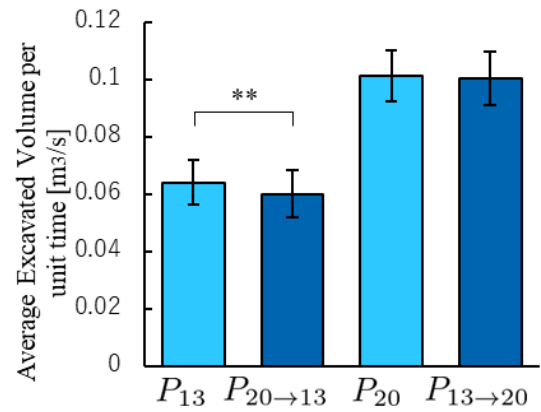
本実験では、作業効率を表す指標として、単位時間当たりの掘削土量を評価項目とした。具体的には、1 回の掘削で掘削される土量を、1 回の掘削に掛かった時間で除した値とした。なお、油圧ショベルにはバケット容量が ISO 規格として定められており、本実験において、一度に掘削される土量の上限は、それぞれのクラスのバケット容量を上限値として計算した。

Patterns	Explanation
$P_{13}$	Operate only 13t
$P_{20 \rightarrow 13}$	Switch Machine from 20t to 13t
$P_{20}$	Operate only 20t
$P_{13 \rightarrow 20}$	Switch Machine from 13t to 20t

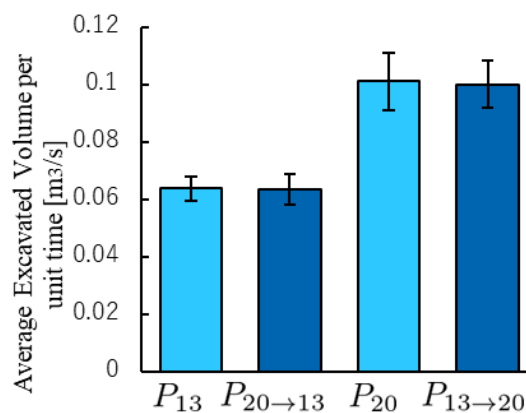




(a) C1



(b) C2



(c) C3

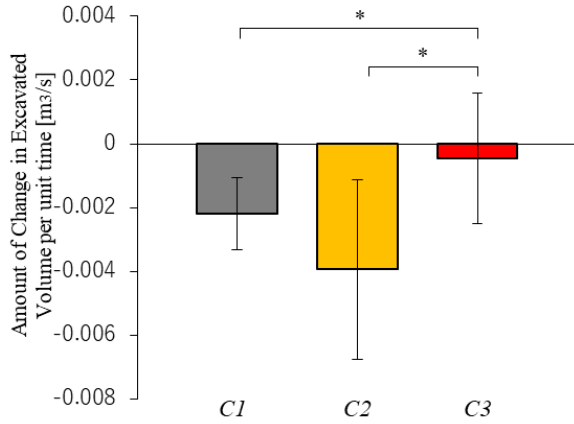
Fig. 3.11: Result of Average Excavated Volume for Each Conditions. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\*\* :  $p < 0.01$ ).

### 3.3.3 実験結果

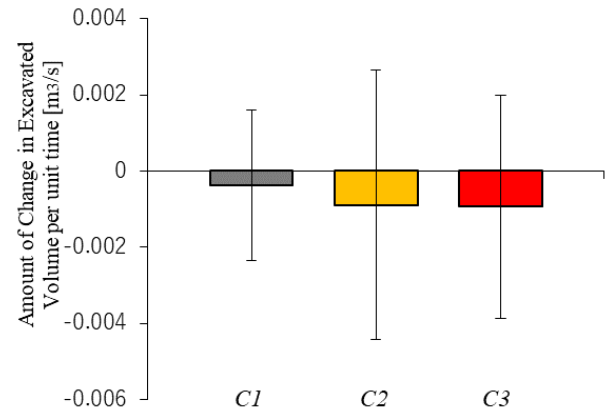
Fig.3.11 に、C1～C3における各乗り換えパターンの単位時間当たりの掘削土量の平均を示す。平均値算出には、被験者ごとの単位時間当たりの掘削土量の平均を導出し、これら平均値から全被験者の平均値を算出している。また、各条件における13 tクラスおよび20 tクラス間で対応のある  $t$  検定を行った結果、C1およびC2において、 $P_{20 \rightarrow 13}$ の単位時間当たりの掘削土量が $P_{13}$ と比較して有意に減少することを確認した。また、C3では機体乗り換えによる、単位時間当たりの掘削土量の有意な減少は確認されなかった。ここで、有意水準は5%とした。なお、各条件における検定結果はTable3.3に示す通りである。

Table 3.3: Test Results of Average Excavated Volume for Each Conditions

Condition	$P_{13}$	$P_{20 \rightarrow 13}$	$t(10)$	Hedges' $g$	$p$ value	$P_{20}$	$P_{13 \rightarrow 20}$	$t(10)$	Hedges' $g$	$p$ value
	mean $\pm$ $SD$	mean $\pm$ $SD$				mean $\pm$ $SD$	mean $\pm$ $SD$			
C1	.065 $\pm$ .0047	.063 $\pm$ .0047	5.5	.45	* < .001	.10 $\pm$ .0049	.10 $\pm$ .0052	.54	.067	.60
C2	.064 $\pm$ .0078	.060 $\pm$ .0080	4.0	.47	*.0031	.10 $\pm$ .0089	.10 $\pm$ .0093	.71	.088	.49
C3	.064 $\pm$ .0042	.063 $\pm$ .0052	.63	.069	.54	.10 $\pm$ .010	.10 $\pm$ .0080	.91	.093	.39



(a) 13t Class



(b) 20t Class

Fig. 3.12: Result of Amount of Change in Excavated Volume for Each Classes. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ ).

Table 3.4: Test Results of Amount of Change in Excavated Volume for Each Classes

Class	C1	C2	C3	C1-C2			C1-C3			C1-C3		
	mean $\pm$ $SD$	mean $\pm$ $SD$	mean $\pm$ $SD$	$t(10)$	Hedges' $g$	$p$ value	$t(10)$	Hedges' $g$	$p$ value	$t(10)$	Hedges' $g$	$p$ value
13t	-.0022 $\pm$ .0011	-.0039 $\pm$ .0028	-.00045 $\pm$ .0020	1.7	.71	.12	2.8	.90	*.043	3.1	1.2	*.037
20t	-.00038 $\pm$ .00070	-.00089 $\pm$ .0013	-.00093 $\pm$ .0010	.38	.15	.68	.41	.19	.71	.028	.013	.99

次に、提案手法における機体乗り換えの影響を抑制する効果を確認するため、単位時間当たりの掘削土量の変化量を条件間で比較した。Fig.3.12 (a), (b)それぞれに13tクラス、20tクラスでの結果を示す。掘削土量の変化量は、13tクラスに関しては $P_{20 \rightarrow 13}$ と $P_{20}$ における単位時間当たりの掘削土量の差分、20tに関しては $P_{13 \rightarrow 20}$ と $P_{20}$ における単位時間当たりの掘削土量の差分とした。Holmの多重比較の結果、13tクラスにおいて、C1 - C3間およびC2 - C3間で、掘削土量の変化量が有意に小さくなることを確認した。また、20tクラスに関して、いずれの条件においても掘削土量の変化量に有意差は確認されなかった。なお、13 tクラス、20 tクラスにおける検定結果はTable3.4に示す通りである

### 3.3.4 考察

実験結果より、C1, C2において、 $P_{20 \rightarrow 13}$ の単位時間当たりの掘削土量が、 $P_{13}$ と比較して有意に減少した一方、C3では有意差は確認されず、また3条件の中で効果量は最も小さかった。さらに、単位時間当たりの掘削土量の変化量が、C3はC1, C2と比較して最も小さかった。以上より、提案手法において、異なるクラスへの乗り換えが作業効率に与える影響を軽減する効果が確認された。

Fig. 3.13に、例としてsubBにおける13tクラス、20tクラスの各条件における平均バケット先端軌跡を示す。破線は乗り換えがない場合、実線は乗り換えがある場合の軌跡を表す。また、半透明の領域は標準偏差であり、軌跡のばらつきを表している。尚、平均軌跡の算出にはDynamic Time Wrapping(DTW)及びDTW Barycenter Averaging (DBA)を用いた。図より、C1, C2において、 $P_{13}$ と比較して、 $P_{20 \rightarrow 13}$ でより深くバケットが貫入していることが確認される。バケットが深く貫入すると、土から受ける掘削反力が増大する。Fig. 3.14に、C1~C3における $P_{13}$ 、 $P_{20 \rightarrow 13}$ の掘削反力の全被験者平均を示す。図より、C1, C2において、 $P_{20 \rightarrow 13}$ の掘削反力が、 $P_{13}$ と比較して有意に増加することが確認された。このことから、単位時間当たりの掘削土量の低下は、バケット先端軌跡の変化に伴い掘削反力が増加し、増永ら[59]が指摘するように、バケット先端速度が低下したことに起因したことを示唆している。

バケット先端軌跡が乗り換えの有無で変化したことは、被験者のレバー操作が乗り換えの有無で変化したことを示唆している。Fig. 3.15に、DBAにより平均化を施した、subBにおける13tクラス、20tクラスにおけるブームおよびアームのレバー操作入力の時系列を示す。なお、レバー操作入力の最大値は1である。図より、C1, C2において、 $P_{13}$ と比較して、 $P_{20 \rightarrow 13}$ のブームレバー操作量が、乗り換えがない場合と比較し減少していることが分かる。Fig. 3.16に、13 tクラスにおける各条件の全被験者における単位時間当たりのブーム上げ操作量を示す。図より、C1, C2において、 $P_{13}$ と比較して、 $P_{20 \rightarrow 13}$ のブームレバー操作量が、乗り換えがない場合と比較し有意に低下することが確認された。掘削作業の際は、アームの円弧運動に

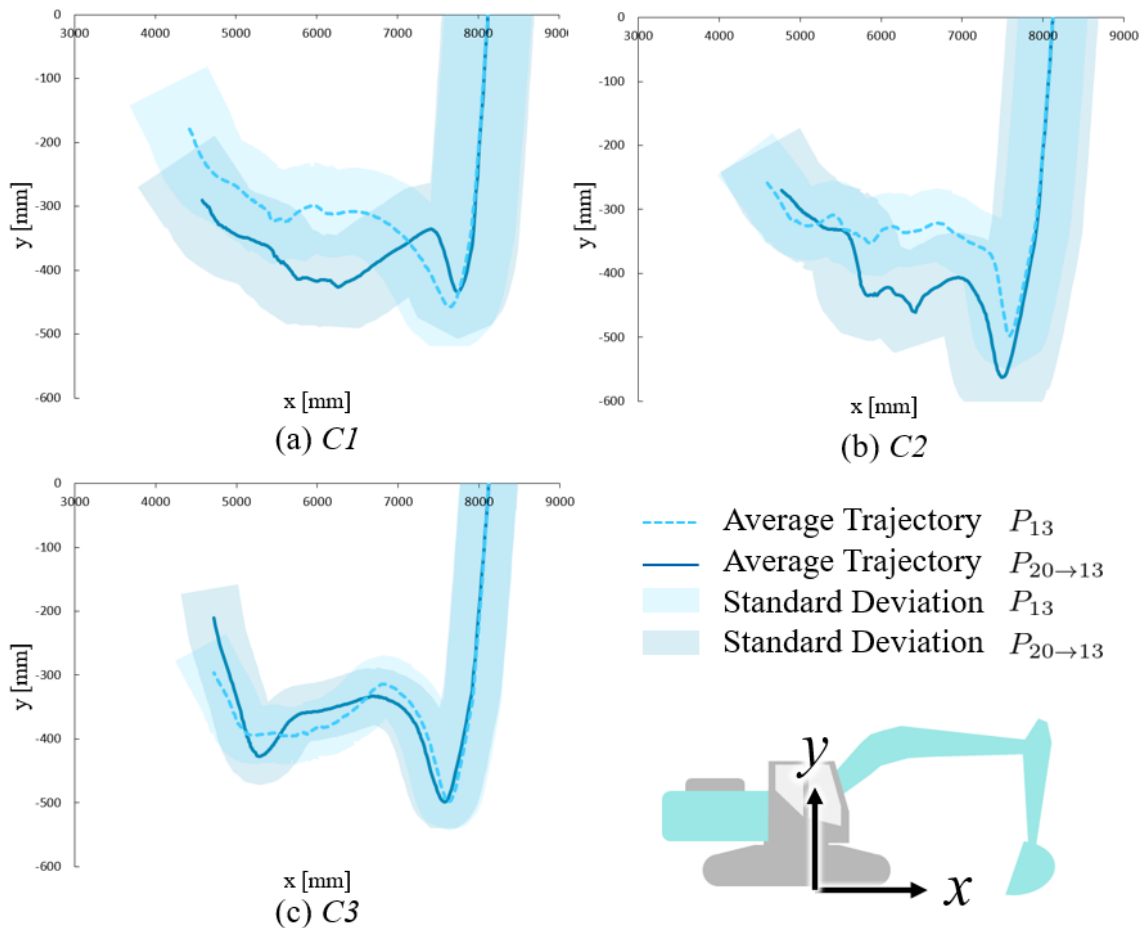


Fig. 3.13: Result of Average Digging Trajectory of 13t Class

よりバケットが深く貫入しないよう、ブームレバー操作を同時に行い、バケット貫入深さを調整する必要がある。よって、C1, C2における乗り換えの有無による作業軌跡の変化は、このブームレバー操作量の減少により、ブームが十分に上がらず、バケットが深く貫入したために引き起こされたことを示唆している。

Fig.3.7の通り、13tクラスは20tクラスと比較して、操作入力に対する応答が早く、バケット貫入深さの調整のために、20tクラス操作と比較してより素早い操作が必要となる。そのため、C1において、被験者は乗り換え前の20tクラス操作時の影響を受け、13tクラスの応答に対して素早い操作を行えなかったことを示唆している。Fig.3.17に、C1における $P_{13}$ と $P_{20\rightarrow 13}$ の、施行毎の単位時間当たり掘削土量の推移を示す。なお、各施行におけるデータ点は全被験者における平均値である。図より、 $P_{20\rightarrow 13}$ において、乗り換え直後から10試行終了時まで、単位時間当たり掘削土量が $P_{13}$ と比較して減少していることが確認された。よって本実験に

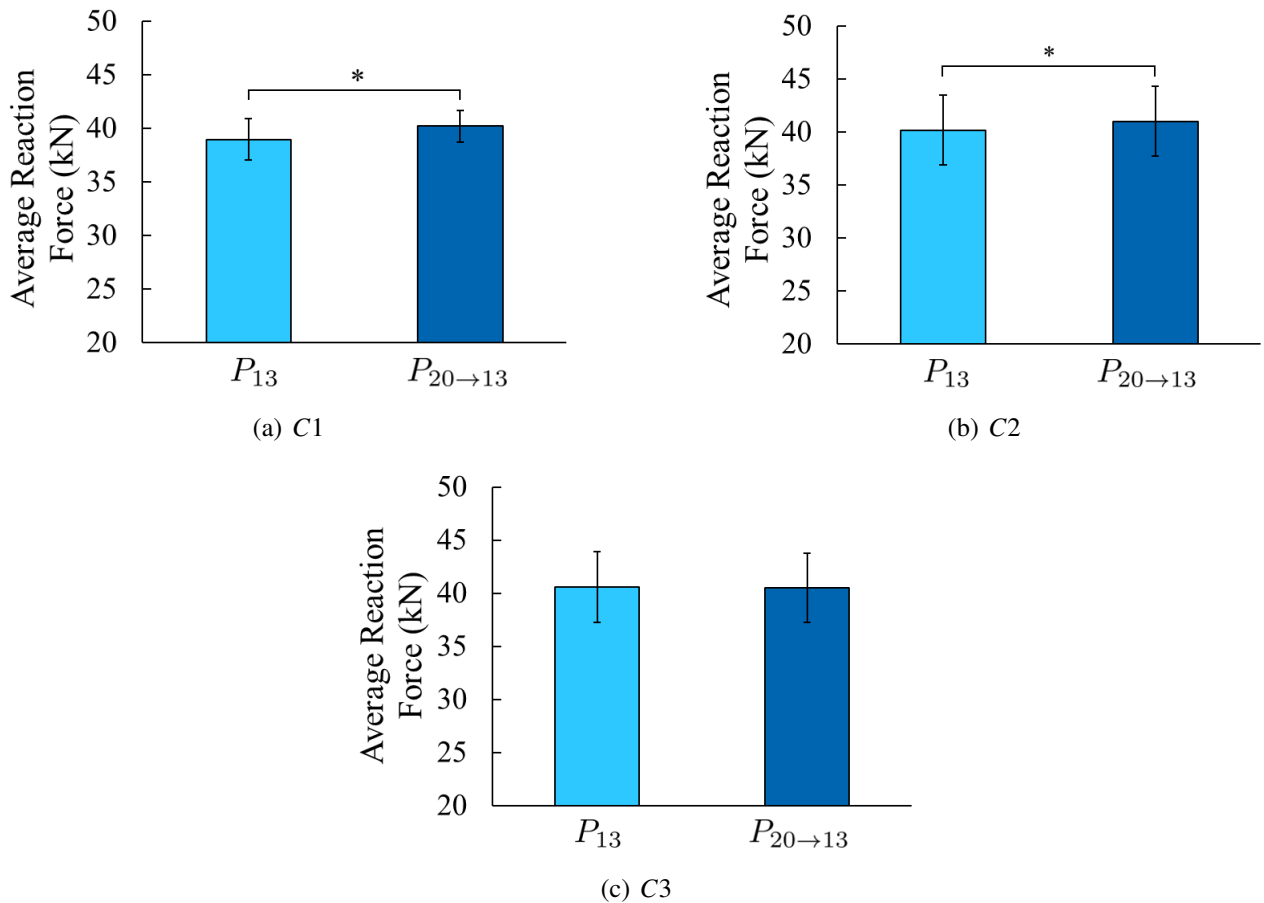


Fig. 3.14: Average Reaction Force of 13t Class for each Conditions. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (\* :  $p < 0.05$ ).

においても、乗り換えに伴う内部モデルの切り替えが直ちに行えなかったことが示唆された。

C2は、発揮力の小さい小型のクラスほど、フィードバックされる反力トルクが小さくなる。

Fig. 3.18 に、DBA により平均化を施した、subB における  $P_{13}$ 、 $P_{20}$  のブームレバー反力トルクの時系列を示す。図より、20t クラスと比較して、発揮力の小さい 13t クラスにおいて、レバーの反力トルクが小さくなっている。被験者は、乗り換えによる反力トルクの変化により、アタッチメントに掛かる負荷が最大発揮力に対してどの程度であるか判断できず、反力トルクの減少を掘削反力の減少と認識し、 $P_{13}$  と比較し深くバケットを貫入させたことを示唆している。

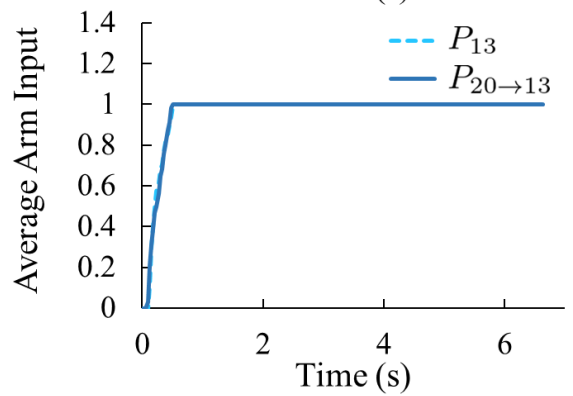
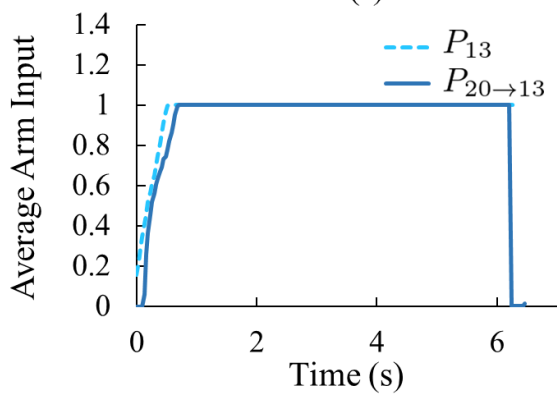
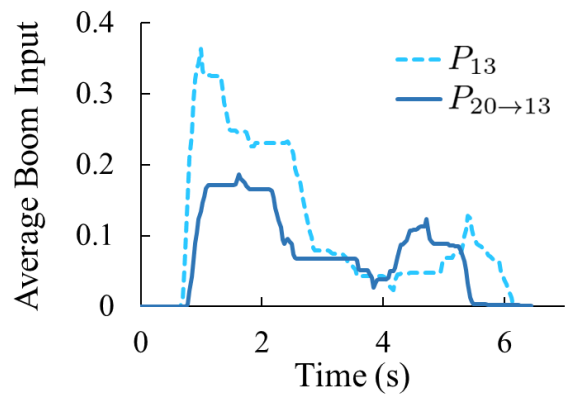
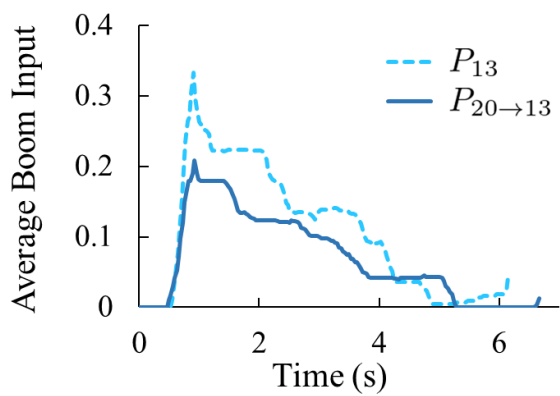
一方 C3 では、乗り換えによる作業効率の低下は確認されなかった。この結果は、提案手法が、異なるクラスの機体への乗り換えが作業効率に与える影響を軽減できるという筆者の仮説を支持するものとなった。

今回の実験では、13tクラスおよび20tクラス間の乗り換えを行ったが、他の機体クラスへの乗り換えは検証できていない。小型クラスと大型クラス間の乗り換えなど、クラスの差異が大きくなるような場合では、乗り換えによる動特性や最大発揮力の差異が大きくなり、乗り換えによる作業効率の低下がより顕著に起こり得る。一方でアタッチメント関節負荷率は最大発揮力の差異の影響を受けないことから、提案手法により乗り換えによる作業効率への影響を軽減できると予想される。また、今回の実験はシミュレータを用い、実機による検証は行っていない。実際の環境では土質条件が一樣ではなく負荷の予測がより困難となるため、負荷を知覚可能な提案手法において、乗り換えによる作業効率への影響を軽減できると予想される。また、今回の実験は関節トルクおよびアタッチメント関節負荷率に対応する反力トルクの大きさは全被験者で同一の条件で行われた。しかし力の知覚特性には個人差があり、高齢者や女性の場合は更にばらつきが大きくなる可能性が指摘されている [77]。その場合、機体の負荷の正確な認知が行えない可能性が考えられることから、今後力知覚特性の個人差を考慮した反力トルクの決定方法を検討し、その効果を検証により明らかにする必要がある。

### 3.4 結言

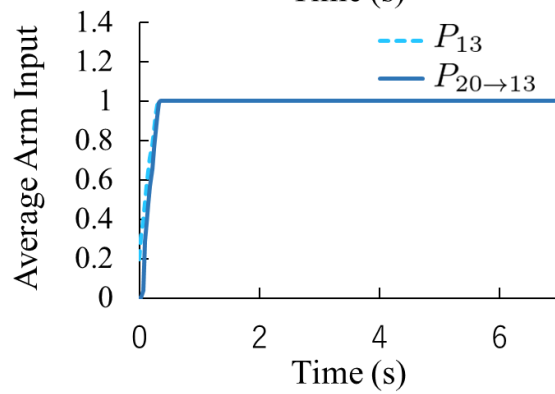
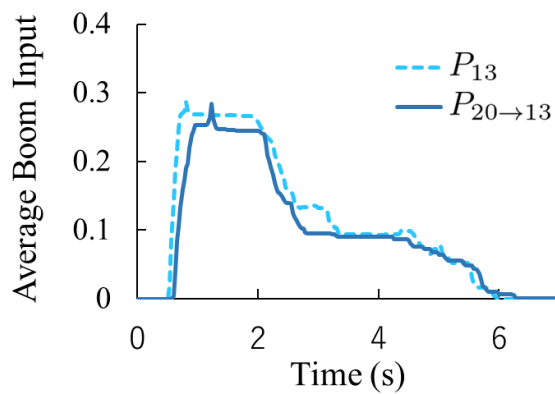
本研究では、遠隔操作油圧ショベルにおける異なるクラスへの乗り換えが作業効率に与える影響を軽減するための手法として、アタッチメント関節負荷率という指標を提案した。また、アタッチメント関節負荷率をオペレータにフィードバックする手法として、反力レバーによる力覚提示手法を提案した。シミュレータを用いた被験者実験の結果、13 tクラスにおける一般的な操作特性、および従来の負荷フィードバック手法において、異なるクラスに乗り換える場合、乗り換えを行わない場合と比較し、作業効率が  $p < .01$  で有意に低下することを確認した。一方提案手法では、作業効率の有意な減少は確認されず、また他の条件と比較しても、作業効率の低下は  $p < .05$  で有意に抑制できることを確認し、提案手法の有効性を確認した。これは、アタッチメント関節負荷率が、最大発揮力を考慮した指標であり、被験者

が負荷の程度を正確に認識できたためであることが示唆された。このことから、提案手法からクラス差の影響を受けずに負荷を認知することが可能となり、効率的に作業を行えることが期待される。



(a) C1

(b) C2



(c) C3

Fig. 3.15: Average Input Time Series of 13t Class for Each Conditions



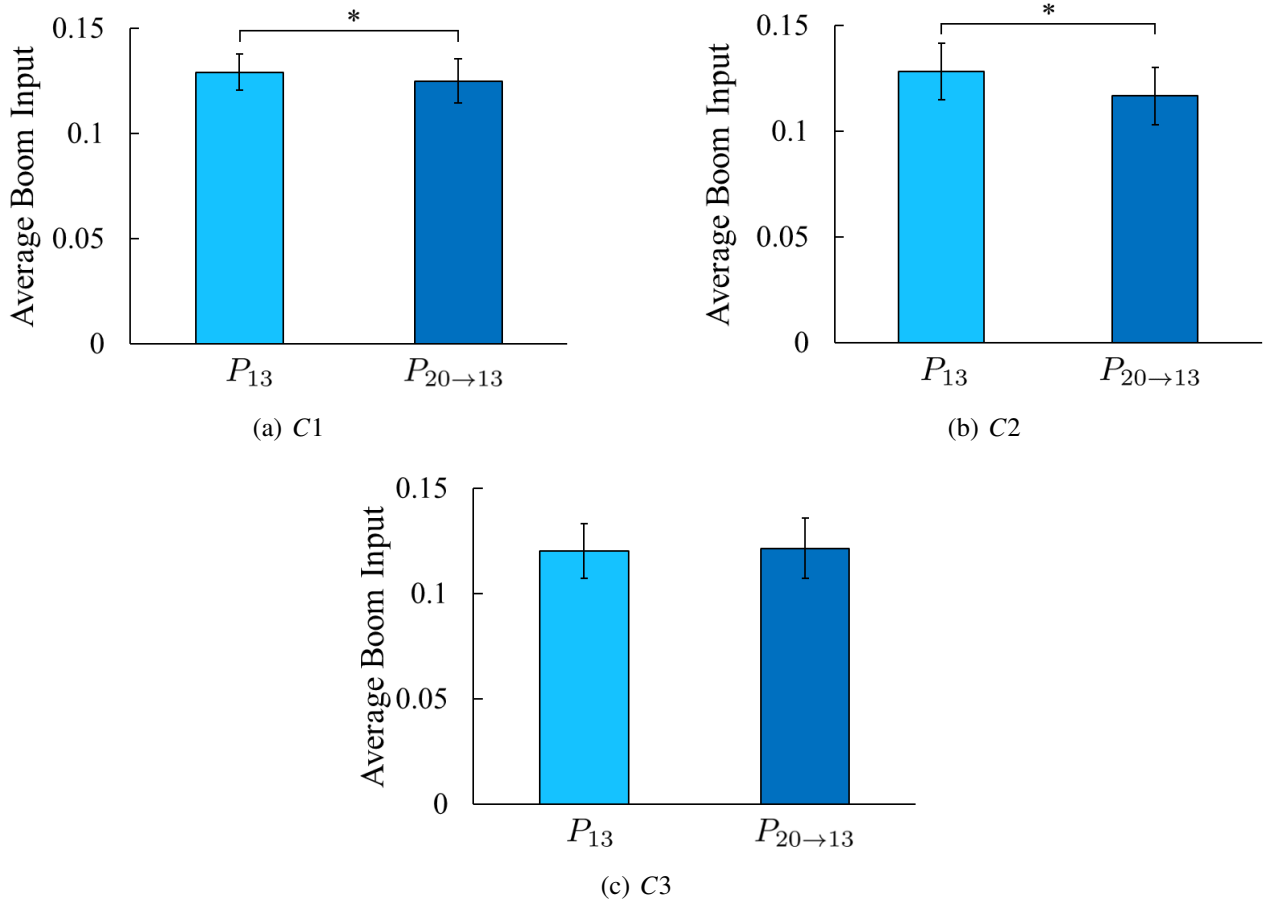


Fig. 3.16: Average Input of 13t Class for Each Conditions

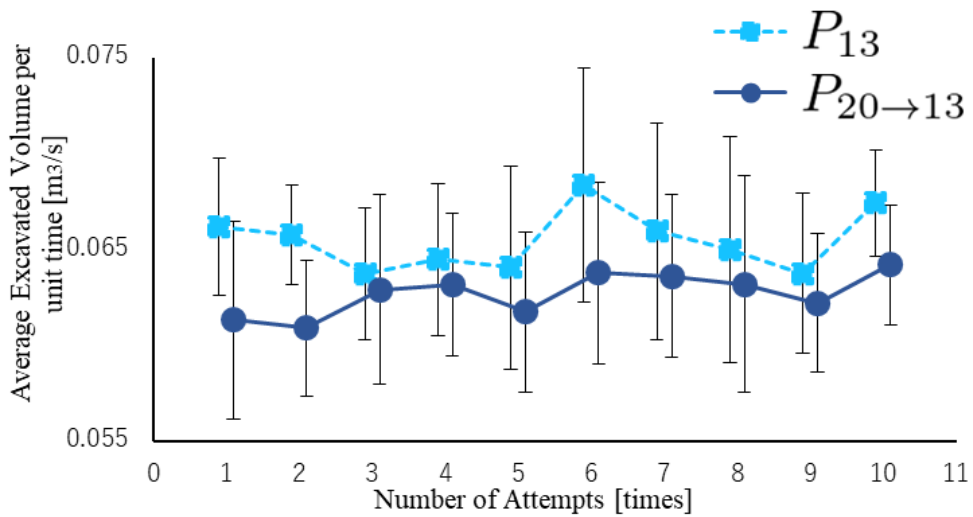


Fig. 3.17: Transition of Average Excavated Volume for All Subjects in C1. Error Bars Indicate Standard Deviation.

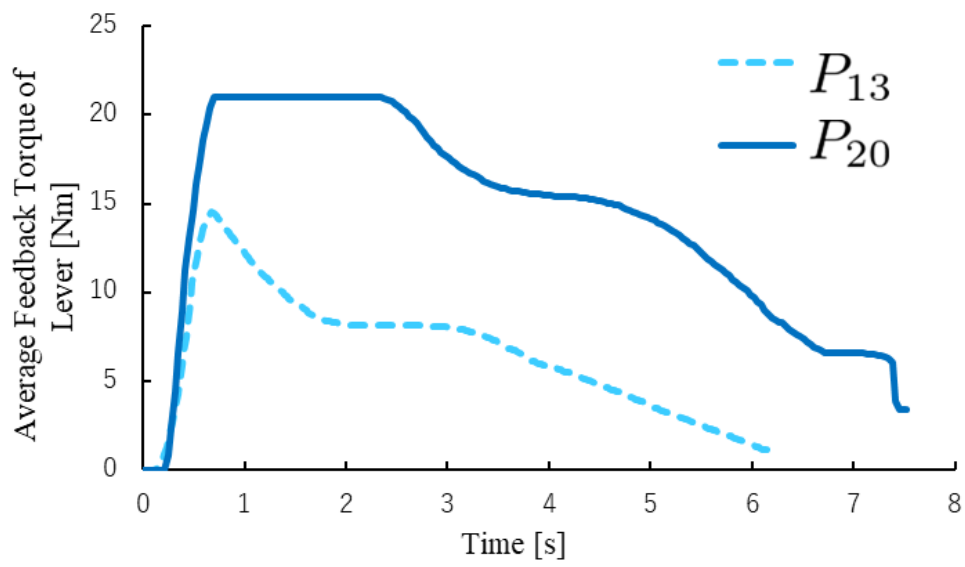


Fig. 3.18: Average Boom Lever Force of 13t Class in C2

## 第4章 結論

本研究では、遠隔操作油圧ショベルシステムに対して、人間の認知プロセスに着目し、遠隔ショベルの乗り換えが作業効率に与える影響を軽減するインターフェースシステムを提案した。具体的には、視覚情報の変化の影響を軽減するための手法として、オペレータの内部モデルの切り替えを支援するための動特性提示インターフェースを提案し評価した。また、クラス差の影響を考慮しつつ遠隔操作ショベルにおいては受け取りにくい情報をフィードバックすることを目的とし、アタッチメント関節負荷率という指標を提案し評価した。以下に、本論文の各章に対する概要と結論を総括する。

第2章では、内部モデルの切り替えを支援するための動特性提示インターフェースを提案し評価した。油圧ショベルはクラス毎に動特性が異なり、オペレータは乗り換えの度に個々のクラスの動特性に応じた操作を行う必要がある。オペレータはクラスに対応した内部モデルを構築し、乗り換えの度にそれらを切り替えることで効率的な作業が可能になるが、遠隔操作油圧ショベルは実搭乗と比較してオペレータへのフィードバック情報が欠如し、内部モデルを直ちに切り替えることが困難である。速やかな内部モデルの切り替えのためには操作する対象の動作を意識的に理解している必要があることから、機体乗り換えの際に、乗り換え先の動特性情報を事前にオペレータに提示する手法を提案した。具体的には、動特性のような機体の動作に関する情報をオペレータが直感的に理解できると考え、視覚的な提示とし、運転席視点で次に操作する機械がフルレバー操作で稼働する様子をオペレータに動画提示することを提案した。提案手法の有効性を検証するため、実機を用いた検証を実施した。実験では、動特性の差異が大きければその変化の影響がより顕著に内部モデルの切り替えに影響

すると考え、旋回操作を対象とした。また、機体乗り換えの際に発生するアタッチメントや目線高さといった視覚情報の変化が実験に影響を及ぼす可能性を排除するため、姿勢によって決定する上部旋回体の慣性およびエンジン回転数を変えることで、それぞれ異なる動特性を実現し乗り換えを模擬した。実験の結果、何も提示をせず直ちに乗り換える場合、乗り換ええない場合と比較し旋回操作時間が有意に増加し、作業効率が低下することを確認した。一方で、提案手法では乗り換えの有無にかかわらず、旋回操作時間に有意な差異は確認されなかった。また、動特性変化の影響を抑制する効果を条件間で比較するため、旋回操作時間の変化量を比較した結果、何も提示をせず直ちに乗り換える場合と比較して、提案手法では旋回操作時間変化量が有意に減少することを確認し、動特性の変化が作業効率へ与える影響を抑制する効果があることが確認された。このことは、被験者が動特性の変化に伴い適切な内部モデルの切り替えを行うことができないことが示唆されたと同時に、提案手法では被験者は乗り換え先の動特性を理解でき、適切な内部モデルに切り替えることができたことが示唆された。

次に、機体乗り換えをする前に情報を提示することによる作業時間への影響を考慮すると、可能な限り短時間でオペレータが乗り換え先の機体の動特性を把握できることが望ましいと考え、静止画により動特性をオペレータに提示するインターフェースを提案した。静止画では動特性のような時間応答を提示することは困難であるため、本研究では機体サイズの変化をオペレータに提示すれば、オペレータはそこから旋回動特性を推測できると考えた。機体乗り換えの際には、アタッチメントの大きさや目線高さといった視覚情報が変化するが、モニターからでは奥行き感の知覚が困難であり、そこから機体サイズを認知することは困難である。よって静止画によりオペレータに機体サイズを認知させる手法として、現在操作している機体及び次に操作する機体の側面図を並べて表示することを提案した。提案手法の効果を確認するため、シミュレータを用いた被験者実験を実施した。実験の結果、何も提示をせず直ちに乗り換える場合、乗り換ええない場合と比較し旋回操作時間が有意に増加し、作業効

率が低下することを確認した。また、画像提示、動画提示条件にて乗り換えの有無による作業時間の増加は確認されず、提案手法の有効性が確認された。次に、動特性変化の影響を抑制する効果を条件間で比較するため、旋回操作時間の変化量を比較した結果、動画提示条件が、何も提示をせず直ちに乗り換える場合と比較し旋回操作時間変化量が有意に減少することを確認した。一方で、画像提示条件では何も提示をせず直ちに乗り換える場合と比較して旋回操作時間変化量に際は確認されず、以上から画像提示手法は動画提示条件と比較し、機体切り替えによる作業時間の増加を抑制する効果が小さいことが明らかとなった。このことは、機体サイズ差の提示はオペレータの動特性の理解に作用せず、内部モデル切り替えのためには動特性を直接オペレータに提示する必要がある必要があることが明らかとなった。以上の結果から、本章では機体が動作する様子を視覚提示することで、オペレータは乗り換え先の動特性を理解でき、内部モデルの切り替えが可能であるとともに、機体サイズ差は動特性の理解には作用せず、内部モデル切り替えのためには動特性情報を直接視覚提示する必要があることが明らかとなった。

第3章では、クラス毎の最大発揮力を考慮した負荷指標のフィードバック手法を提案した。オペレータにフィードバックする機体情報として、効率的な作業のためにオペレータは掘削反力を意識していることから、掘削反力によりアタッチメントに掛かる負荷に着目した。遠隔操作油圧ショベルは、運転席に設置されたカメラ映像を介した視覚情報により操作を行うものであり、オペレータは視覚情報のみではアタッチメントの負荷を推測することが困難である。また、アタッチメントの移動速度は、アタッチメントの最大発揮力に近づくに従って低下することから、効率的に土を掘削するために、オペレータはアタッチメントの最大発揮力に対する負荷の程度を意識する必要がある。しかし、遠隔操作油圧ショベルでは、アタッチメントやアクチュエータのサイズといった情報が把握しづらく、そこからアタッチメントの最大発揮力を測ることは困難である。そのため、機体の乗り換えによる作業効率の低下を抑制するために、最大発揮力を考慮した負荷情報をオペレータにフィードバックする方法と

して、「アタッチメント関節負荷率」という最大発揮力を考慮した負荷指標を定義し、これをオペレータにフィードバックすることを提案した。またフィードバックの手法として、オペレータが直感的にアタッチメント負荷を知覚できるよう、力覚によるフィードバック手法を提案した。提案手法の効果を検証するため、掘削動作シミュレータを作成し、被験者試験を実施した。一般的な操作レバー特性および最大発揮力を考慮しない従来の負荷フィードバック手法で実験を行った結果、一般的な操作レバー特性、および従来の負荷フィードバック手法において、異なるクラスに乗り換える場合、乗り換えを行わない場合と比較し、単位時間辺りの掘削土量が減少し、作業効率が低下することを確認した。一方で提案手法では乗り換えによる作業効率の低下は確認されなかった。また、提案手法における機体乗り換えの作業効率への影響を抑制する効果を確認するため、単位時間当たりの掘削土量の変化量を条件間で比較した。その結果、一般的な操作レバー特性、従来の負荷フィードバック手法と比較し、提案手法で掘削土量の変化量が有意に小さくなることを確認し、提案手法が乗り換えの影響を抑制可能であることが確認された。これは、アタッチメント関節負荷率が、最大発揮力を考慮した指標であり、被験者が負荷の程度を正確に認識できたためであることが示唆された。

本研究では、遠隔操作油圧ショベルシステムに対して、人間の認知プロセスに着目し、オペレータの乗り換えの影響を軽減するインターフェースシステムを提案した。研究結果から、クラスの変化がオペレータの認知に与える影響を軽減するために必要な情報提示の要件が明らかになったとともに、オペレータの認知に与える影響を軽減することで遠隔操縦パフォーマンスの向上に寄与することを確認でき、乗り換え時もオペレータのスキルが最大限発揮できる遠隔操作システムが実現可能であることが示唆された。しかし、本研究では特定の作業における効果までしか確認はされておらず、他の作業や複合動作における乗り換えの影響を軽減する手法の検討および効果検証は今後の課題である。また、オペレータの技量差における検証もできていない。熟練オペレータと非熟練オペレータでは、認知の仕方に差異があることから、熟練オペレータにおける乗り換えの影響調査及び提案手法の効果確認を行って

ゆく必要がある。更に、今後は第2章、第3章の研究成果を統合した遠隔操作コックピットシステムを構築し、システムの有用性を検証する必要がある。

最後に、提案手法が実現し得る建設現場の将来について述べる。建設業における少子高齢化の課題から現場生産性の向上が必須となっている現状において、オペレータのスキルが最大限発揮される遠隔操作インターフェースにより、オペレータは作業効率を落とすことなく作業現場の機械を乗り換えて作業することが可能となり、実搭乗では実現できなかった高い生産性を達成することが可能となり、建設業における働き方改革を大きく推進できると確信している。今後も、現場の生産性向上実現に向けた研究を進めていきたい。

## 参考文献

- [1] 国立社会保障・人口問題研究所:日本の将来推計人口(令和5年推計), [https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp202311\\_ReportALL.pdf](https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp202311_ReportALL.pdf), (2024年5月27日)
- [2] 国土交通省:最近の建設業を巡る状況について【報告】, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001428484.pdf>, (2024年5月27日)
- [3] 国土交通省:建設業就業者の現状, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>, (2024年5月27日)
- [4] 一般社団法人日本建設業連合会:「建設業ハンドブック2021」, 一般社団法人日本建設業連合会(2021)
- [5] 国土交通省:建設現場で働く人々の誇り・魅力・やりがい検討委員会提言～建設現場でいきいきと活躍するために～, <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001368313.pdf>, (2024年5月27日)
- [6] K. Tateyama: “A New Stage of Construction in Japan - i-Construction,” IPA News Letter, vol. 2, pp.2–11 (2017)
- [7] 国土交通省:インフラ分野のDXアクションプラン, <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001474432.pdf>, (2024年5月22日)
- [8] 土井下健治, 村本英一, 神田俊彦:「建設機械へのICT応用」, Komatsu technical report, Vol.56, No.163, pp.2–6 (2010)
- [9] 金森宗一郎, 味田悟, 岡本由仁:「建設機械分野のDXの取組み」, 一般社団法人日本建設機械施工協会誌, Vol.74, No.7, pp. 9–13 (2022)
- [10] K. Chayama, A. Fujioka, K. Kawashima, H. Yamamoto, Y. Nitta, C. Ueki, A. Yamashita, and H. Asama: “Technology of Unmanned Construction System in Japan,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.4, pp.403–417 (2014)
- [11] H. Sulaiman, M. N. A. Saadun, and A. A. Yusof: “Modern Manned, Unmanned and Teleoperated Excavator System,” Journal of Mechanical Engineering and Technology, Vol.7, No.1, pp.57–68 (2015)
- [12] 村松敏光:「情報化施工と今後の動向」, 建設機械, Vol. 2002, No.1, pp.8–19 (2002)
- [13] 松井宗広:「雲仙普賢岳における無人化施工について」, 砂防学会誌 Vol. 47, No.1, pp.51–53 (1994).
- [14] 茂木正晴, 山元弘:「無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動」, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp. 495–500 (2016)
- [15] 茂木正晴, 藤野健一, 油田信一:「無人化施工におけるヒューマンインターフェースの作業効率評価」, 日本ロボット学会誌, Vol.83, No.6, pp.426–429 (2015)



- [16] L. J. Sol, and Y. Ham: “Exploring human-machine interfaces for teleoperation of excavator,” Construction Research Congress 2022 (2022)
- [17] 茂木正晴, 橋本毅, 梶田洋規: 「操縦装置と画像システムによる油圧ショベル遠隔操作の作業効率改善」, 土木技術資料, Vol.58, No.9, pp.18–21 (2016).
- [18] D. Kim, J. Kim, K. Lee, C. Park, J. Song, and D. Kang: “Excavator tele-operation system using a human arm,” Automation in Construction, Vol.18, No.2, pp.173—182 (2009)
- [19] 伊藤卓, 辻敏夫, 栗田雄一, 佐伯誠司, 山崎 洋一郎: 「座席振動フィードバックを用いた油圧ショベル遠隔操作システム」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-B03 (2018)
- [20] H. Nagano, H. Takenouchi, N. Cao, M. Konyo, and S. Tadokoro: “Tactile feedback system of high-frequency vibration signals for supporting delicate teleoperation of construction robots,” Advanced Robotics, Vol.34, No.11, pp.730–743 (2020)
- [21] 一般社団法人 日本建設機械工業会: 建設機械出荷・生産実績統計, [https://www.cema.or.jp/general/statistics/tmfjj600000003nc-att/production\\_performance\\_statistics\\_basedonthenumberofunits\\_2023.pdf?1718341270901](https://www.cema.or.jp/general/statistics/tmfjj600000003nc-att/production_performance_statistics_basedonthenumberofunits_2023.pdf?1718341270901), (2024年6月14日)
- [22] 中野馨: 「感覚情報処理のモデル化」, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.5, pp.451–456 (1984)
- [23] 伊藤宏司: 「生体における情報処理と運動制御」, 計測と制御, Vol.33, No.4, pp.249–254 (1994)
- [24] 酒井邦嘉: 「視覚情報の統合と記憶のメカニズム 認知記憶のニューロン機構」, 生物物理, Vol.34, No.5, pp.179–184 (1994)
- [25] 持丸正明: 「デジタルヒューマン技術の最新動向と建設機械への適用可能性」, 建設の施工企画, pp.29–33 (2010)
- [26] 篠原一光: 「認知心理学から見たヒューマンエラー」, Medical Gases, Vol.17, No.1, pp.7–13 (2015)
- [27] 小松原明哲: 「認知人間工学からのベテラン作業者のヒューマンエラーの防止」, 安全工学, Vol.38, No.6, pp.352–358 (1999)
- [28] 土井俊央, 石原啓介, 山岡俊樹: 「ユーザインタフェース操作におけるメンタルモデル構築と活動状態指向性・作業記憶の関係に関する一考察—メンタルモデル構築のためのユーザ特性の検討」, デザイン学研究, Vol.62, No.4, pp.61–66 (2015)
- [29] 佐伯胖, 西田正吾: 「認知科学の視点からみたヒューマンインタフェース」, 電気学会雑誌, Vol.109, No.8, pp.645–648 (1989).
- [30] 佐藤徳孝, 松野文俊: 「レスキューロボット遠隔操縦インタフェース技術」, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.156–159 (2010)
- [31] 河村拓実: 「ロボット視点の情報のみからなる 2D 映像を常時観察しつつ任意点までの奥行き誤差を認知できるインタフェースの提案と実用上の課題」, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.896, pp.1–19 (2021)
- [32] 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.30, No.6, pp.400–403 (2015)

- [33] J. Moon, Y. Son, S. Park, and J. Kim: “Development of immersive augmented reality interface for construction robotic system,” In 2007 International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1192–1197 (2007)
- [34] M. Kawato: “Internal models for motor control and trajectory planning,” *Current opinion in neurobiology*, Vol. 9, Issue.6, pp.718–727 (1999)
- [35] M. Biren and S. Schaal, “Forward models in visuomotor control,” *Journal of Neurophysiology*, Vol. 88, Issue.2, pp.942–953 (2002)
- [36] M. D. Wolpert, and M. Kawato: “Multiple paired forward and inverse models for motor control,” *Neural networks*, vol.11, No,7-8, pp.1317–1329 (1998)
- [37] E. Nakano, J. R. Flanagan, H. Imamizu, R. Osu, T. Yoshioka and M. Kawato: “Composition and decomposition learning of reaching movements under altered environments: An examination of the multiplicity of internal models,” *Systems and Computers in Japan*, vol. 33, No.11, pp.80–94 (2002)
- [38] H. Imamizu, N. Sugimoto, R. Osu, K. Tsutsui, K. Sugiyama, Y. Wada and M. Kawato: “Explicit contextual information selectively contributes to predictive switching of internal models,” *Experimental Brain Research*, Vol.181, pp.395–408 (2007)
- [39] C. Andy: “Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science,” *Behavioral and brain sciences*, Vol.36, No.3, pp.181–204 (2013)
- [40] I. Hayashi, M. Ogino, S. Kita and J. Leveille: “Recognition for Switching of Feedback and Feedforward Process in Motor internal model,” 9th EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies, pp.245–246 (2016)
- [41] T. Addou, N. Krouchev, and J. Kalaska: “Colored context cues can facilitate the ability to learn and to switch between multiple dynamical force fields,” *Journal of Neurophysiology*, Vol.106, pp.163–183 (2011)
- [42] N. I. Krouchev, and J. F. Kalaska: “Context-dependent anticipation of different task dynamics: rapid recall of appropriate motor skills using visual cues,” *Journal of Neurophysiology*, Vol.89, No.2, pp.1165–1175 (2003)
- [43] R. Ranganathan, J. Wieser, K. M. Mosier, F. A. Mussa-Ivaldi, and R. A. Scheidt: “Learning redundant motor tasks with and without overlapping dimensions: facilitation and interference effects,” *Journal of Neuroscience*, Vol.34, No.24, pp.8289–8299 (2014)
- [44] 吉田達哉, 辻内伸好, 伊藤彰人, 鞍谷文保, 安藤博昭, 青柳多慶夫, 荒井邦晴: 「油圧ショベルの操作コントローラ開発のための油圧システムの同定」, 計測自動制御学会論文集, Vol.53, No.10, pp.557–563 (2017)
- [45] E. Matsuda, D. Yano, and T. Kondo: “Olfactory Cues to Reduce Retrograde Interference During the Simultaneous Learning of Conflicting Motor Tasks,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 34, No.4, pp.746–755 (2022)
- [46] N. Cothros, W. Jeremy, and L. G. Paul: “Visual cues signaling object grasp reduce interference in motor learning,” *Journal of neurophysiology*, Vol.102, No.4, pp.2112–2120 (2009)
- [47] I. S. Howard, D. M Wolpert, and D. W Franklin: “The effect of contextual cues on the encoding of motor memories,” *Journal of neurophysiology*, Vol.109, No.10, pp.2632–2644 (2013)

- [48] I. S. Howard, J. N. Ingram, D. W. Franklin, D. M. Wolpert: “Gone in 0.6 seconds: the encoding of motor memories depends on recent sensorimotor states,” *Journal of Neuroscience*, Vol. 32, No.37, pp.12756–12768 (2012)
- [49] H. Sakoe and S. Chiba: “Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition,” *IEEE transactions on acoustics, speech and signal processing*, Vol. 26, No.1, pp.43–49 (1978)
- [50] F. Petitjean, A. Ketterlin, and P. Gancarski: “A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering,” *Pattern Recognition*, Vol.44, No.3, pp. 678–693 (2011)
- [51] 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*, Vol. 73, No.1, pp.15–24 (2017)
- [52] 河村拓実, 藤本康孝: 「遠隔操作の実行段階での映像拡大に起因する予測誤差と補償可能性の考察」, *日本機械学会論文集*, No.87, Vol.898, 21-00161 (2021)
- [53] K. Koiwai, R. Miyazaki, T. Yamamoto, K. Ueda, K. Yamashita, and Y. Yamazaki: “Responsiveness evaluation index for an excavator operation based on control engineering approach,” *IEEJ Trans. Elec. Info. Sys*, Vol.138, No. 5, pp.506–511 (2018)
- [54] R. Sekizuka, M. Ito, C. Raima, S. Saiki, Y. Yamazaki and Y. Kurita: “Force feedback design of operation levers considering the characteristics of human force perception to improve hydraulic excavator operability,” *IEEE Access*, Vol.10, pp.926–938 (2021)
- [55] M. Ito, C. Raima, S. Saiki, Y. Yamazaki, and Y. Kurita: “Effects of Machine Instability Feedback on Safety During Digging Operation in Teleoperated Excavators,” *IEEE Access*, Vol.9, pp. 28987–28998 (2021)
- [56] K. Matsumura, M. Ito, S. Saiki, Y. Yamazaki, and Y. Kurita: “Influence of Restrictions on Range of View From Cockpit in Operation of Hydraulic Excavator,” *IEEE Access*, Vol.8, pp.50520–90527 (2020)
- [57] S. Holm: “A simple sequentially rejective multiple test procedure,” *Scandinavian journal of statistics*, Vol.6, pp.65–70 (1979)
- [58] K. Koiwai, T. Yamamoto, R. Miyazaki, K. Ueda, K. Yamashita, and Y. Yamazaki: “A consideration on responsiveness evaluation for an excavator based on control engineering approach,” In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* , pp.467–470 (2017)
- [59] J. Masunaga, M. Ito, C. Raima, Y. Okawa, R. Sekizuka, S. Saiki, Y. Yamazaki, Y. Kurita: “Effect of Switching from a Teleoperated Excavator with Different Size on Work Efficiency”, *Augmented Humans 2022*, pp. 301-304 (2022)
- [60] Y. Sakaida, D. Chugo, H. Yamamoto, K. Kawabata, and A. Hajime: “The analysis of excavator operation by skillful operator-extraction of common skills”, In *2008 SICE Annual Conference*, pp. 538-542 (2008)
- [61] 境田右軌, 中後大輔, 山元弘, 川端邦明, 浅間一: 「熟練オペレータによる油圧ショベルの掘削作業解析: 掘削方向とバケット姿勢の関連」 *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2P1-B19 (2008)

- [62] M. Moteki, N. Akihiko, S. Yuta, S. Mishima, and K. Fujino: “Research on Improving Work Efficiency of Unmanned Construction: Improving Work Efficiency of Unmanned Construction by Using Appropriate Visual Information and Necessity of Haptic Function for Construction Machine Operation Interface”, ISARC, vol. 33, pp.1-8 (2016)
- [63] L. Carvalho, P. Rezeck, M. V. Lima, L. Pinto, G. Freitas, E. R. Nascimento, D. G. Macharet, L. Chaimowicz, G. Pessin, and M. F. M. Campos: “On the Evaluation of Force Feedback Augmented Teleoperation of Excavator-like Mobile Manipulators,” 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (2020)
- [64] C. S. Meera , P. Sairam, V. Veeramalla, and A. Kumar, “Design and Analysis of New Haptic Joysticks for Enhancing Operational Skills in Excavator Control,” Journal of Mechanical Design, vol.142, pp.1-7 (2020)
- [65] Cho, Yongmin, and Frank L. Hammond, “Improving efficiency and safety in teleoperated robotic manipulators using motion scaling and force feedback,” 2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication, pp.1236–1242 ( 2020)
- [66] 大場航, 岩野航平, 岡田昌史: 「半自律掘削制御系における次元の異なるリーダ・フォロワバイラテラル制御系の設計」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2023, 1A2-B07 (2023)
- [67] M. Okada, and K. Iwano: “Human interface design for semi-autonomous control of leader-follower excavator based on variable admittance and stagnation/trajectory bifurcation of non-linear dynamics” Mechanical Engineering Journal, Vol.8, No.6, pp.21-00127 (2021)
- [68] D. Takahashi, S. Sakaino, T. Tsuji, and Y. Kaneko: “Bilateral Control of a Velocity Control System Using Electric and Hydraulic Actuators,” Electrical Engineering in Japan, Vol.194, No.1, pp.27–36 (2016)
- [69] 高井靖仁: 「油圧シヨベル用シリンダ変遷」, KYB 技報, Vol. 50, pp.95–100 (2015)
- [70] 黄健: 「次世代マルチメディアサービスへの期待 ハプティックデバイスによる力感覚の提示とその応用」, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, pp.45–50 (2010)
- [71] 広川美津雄, 井上勝雄, 岩城達也, 加島智子: 「直感的インタフェースデザインの設計論の基礎的考察」 日本感性工学会論文誌, Vol.13, No.5, pp.543–554 (2014)
- [72] Blackler, Alethea, Vesna Popovic, Douglas Mahar: “Intuitive interaction applied to interface design,” New Design Paradigms: Proceedings of International Design Congress (IDC) 2005 (2005)
- [73] 竹田真之介, 小柳健一, 李豊羽, 塚越拓哉, 野田堅太郎, 大島徹: 「指の曲げ状態を用いたハイブリッド型力覚提示グローブの制御系構築」, 日本機械学会年次大会, pp. J111-04 (2022)
- [74] 小岩井一茂, 濱永慎也, 山本透, 南條孝夫, 山崎洋一郎: 「油圧シヨベルのイベント駆動型トルク制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol.54, No.2, pp.261–268 (2018)
- [75] 小柳健一, 古荘純次, 井上貴文: 「力覚提示システムのための高安全性アクチュエータ」, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.3, pp.377–384 (2004)
- [76] L. Huang, T. Kawamura, and H. Yamada: “Construction Robot Operation System with Object’s Hardness Recognition Using Force Feedback and Virtual Reality,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 24, No.6, pp.958–966 (2012)

- [77] 竹村和紘, 山田直樹, 岸篤秀, 農沢隆秀, 田中良幸, 栗田雄一, 辻敏夫:「人間の主観的な力知覚モデルの提案とステアリング操作系への応用」, 日本機械学会論文集, Vol.78, No.795, pp.3705-3714 (2012)

# 引用既発表論文

## A. 学術雑誌等掲載論文

- [1] Masaki Nagai, Junya Masunaga, Masaru Ito, Chiaki Raima, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, Yuichi Kurita, “ Proposal of Visual Presentation Interface to Reduce the Effect of Machine Switching for Teleoperated Hydraulic Excavators, ” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.36, No.2, pp.309-319 2024.
- [2] Masaki Nagai, Masaru Ito, Chiaki Raima, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, Yuichi Kurita, “ Effects of Load Information Feedback Considering Class Differences on Machine Switching in Teleoperated Hydraulic Excavators, ” IEEE Access, Vol.12, pp. 43747 - 43757, 2024.

## B. 国際学会等講演論文

- [1] Masaki Nagai, Masaru Ito, Chiaki Raima, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, Yuichi Kurita, ” Load Information Feedback Method for Teleoperated Hydraulic Excavators Considering Switching to Different Classes, ” IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2023), Georgia Institute of Technology, USA, 2023.

# 謝辞

本研究の推進及び本論文の作成は、多くの方々のご支援・ご助言によって、完成することができました。ここに感謝の意を込め、御礼を申し上げます。

広島大学 大学院 先進理工系科学研究科 栗田 雄一 教授には、研究の推進や論文の作成において、丁寧なご指導とご高配を賜りました。また、次世代ヒューマンインタフェース共同研究講座の運営に関しましてもご尽力いただきましたこと、さらに、学生による共同研究テーマにつきましても、ご助言・ご意見を賜ったこと、心より感謝いたします。

また、本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言・ご意見を賜りました、広島大学 大学院 工学研究科(先進理工系科学研究科) 辻 敏夫 教授、山本 透 教授に深く感謝致します。

さらに、東京国際大学 人間社会学部 来間千晶 専任講師には、本研究を進めるにあたり、大変多くのアドバイスやご協力を賜りました。深く感謝致します。

コベルコ建機株式会社 常務執行役員 山崎 洋一郎 氏、技術開発本部長 山下耕治氏、新事業推進部長 佐伯 誠司 氏、戦略技術開発部長小岩井 一茂 氏、知的財産部部長 田中精一 氏 には、研究所の運営や研究遂行のための環境の構築にご尽力いただくと共に、研究の方向性についても的確なご助言を賜ったこと、心より感謝申し上げます。また、戦略技術開発部 データ連携システム機能開発グループ 伊藤 卓 氏には、研究の進め方、論文執筆等の指導だけでなく、講座助教としてのあり方について、不慣れであった筆者に対して多大なるご指導をいただき、心より感謝申し上げます。

また、本研究の検証実験においては、コベルコ建機株式会社 戦略技術開発部 上田 員弘 氏、梶山 広行 氏、羽馬 涼太 氏には、遠隔操作ショベルの立ち上げから、検証に至るまで、ご

協力をいただき、安全な実験の遂行、そして有益な成果を得ることができました。深く感謝致します。

コベルコ建機株式会社との共同研究テーマに取り組んでいただいた広島大学 生体システム論の学生とは、ともに研究に関する議論をしていく中で、素晴らしい成果を多数創出できただけでなく、自身の成長にもつながったことに深く感謝致します。

最後に、広島大学へ出向した共創研究所の皆様には、日ごろから研究についてアドバイスや運営のご協力を率先して取り組んでいただきました。至らないことが多々あった筆者にとって強い助けとなりました。深く感謝致します。

最後に、広島大学 大学院 博士課程後期への進学、学位取得に向けた取り組みに理解を示し、支えてくれた妻に心から感謝致します。