

マルチモーダルフィードバックを用いた
遠隔操作ショベルのクロスプラットフォーム
コックピットシステム

(A Cross-Platform Cockpit System for
Teleoperated Excavators Using Multi-Modal Feedback)

広島大学 工学研究科
システムサイバネティクス専攻
D181678 伊藤 卓

2021年3月

目次

| | | |
|------------|--|-----------|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 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 | 3 |
| 1.3 | 本論文の章構成 | 6 |
| 第2章 | 油圧ショベルの旋回操作における難易度モデルの構築 | 8 |
| 2.1 | 緒言 | 8 |
| 2.2 | ポインティング動作モデルに関する従来研究 | 11 |
| 2.3 | 視野角を考慮した旋回操作難易度モデルの構築 | 14 |
| 2.3.1 | シミュレーション試験 | 14 |
| 2.3.2 | 視野角を考慮した旋回操作難易度モデルの提案 | 19 |
| 2.3.3 | 提案モデルの評価 | 19 |
| 2.3.4 | 実機試験 | 21 |
| 2.3.5 | 考察 | 27 |
| 2.4 | 動特性を考慮した旋回操作難易度モデルの構築 | 28 |
| 2.4.1 | シミュレーション試験 | 28 |
| 2.4.2 | 動特性を考慮した旋回操作難易度モデルの提案 | 31 |
| 2.4.3 | 提案モデルの評価 | 33 |
| 2.4.4 | 考察 | 34 |
| 2.5 | 結言 | 34 |
| 第3章 | 遠隔操作油圧ショベルにおける掘削時の機体不安定度フィードバック | 36 |
| 3.1 | 緒言 | 36 |
| 3.2 | 機体不安定度の定義 | 38 |
| 3.2.1 | 上方向不安定度 | 40 |
| 3.2.2 | 前方向不安定度 | 42 |
| 3.2.3 | 機体不安定度 | 42 |
| 3.3 | 掘削作業シミュレータを用いた検証 | 43 |
| 3.3.1 | 掘削作業シミュレータの構築 | 43 |
| 3.3.2 | 被験者試験 | 50 |
| 3.3.3 | 試験結果 | 52 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.3.4 | 考察 | 55 |
| 3.4 | 結言 | 56 |
| 第4章 | マルチモーダルな遠隔操作ショベルのクロスプラットフォームコックピットシステム | 57 |
| 4.1 | 緒言 | 57 |
| 4.2 | クロスプラットフォームシステムの構成 | 59 |
| 4.2.1 | クロスプラットフォームコックピット | 59 |
| 4.2.2 | 遠隔操作油圧ショベル | 64 |
| 4.2.3 | シミュレータシステム | 67 |
| 4.3 | システム検証 | 68 |
| 4.3.1 | 立体視システム検証 | 70 |
| 4.3.2 | 傾きフィードバックシステム検証 | 71 |
| 4.3.3 | ジョイスティック遠隔操作システム検証 | 71 |
| 4.3.4 | クロスプラットフォームシステム検証 | 73 |
| 4.4 | 遠隔操作油圧ショベルの作業効率検証 | 74 |
| 4.4.1 | 被験者試験 | 74 |
| 4.4.2 | 試験結果 | 76 |
| 4.4.3 | 考察 | 76 |
| 4.5 | 機体不安定度フィードバック実機検証 | 77 |
| 4.5.1 | 被験者試験 | 77 |
| 4.5.2 | 試験結果 | 80 |
| 4.5.3 | 考察 | 82 |
| 4.6 | 結言 | 84 |
| 第5章 | 結論 | 86 |
| | 参考文献 | 90 |
| | 引用既発表論文 | 96 |
| | その他既発表論文 | 97 |
| | 謝辞 | 98 |

第1章 序論

1.1 研究背景

現在日本では、少子高齢化に伴う労働力不足が問題となっている。国立社会保障・人口問題研究所によると、生産年齢人口(15~64歳)は、1995年の8,726万人をピークに、2065年には4,529万人とおよそ半分となると予測されている [1]。そのため、今後経済を維持または発展させていくには、一人ひとりの生産性を高めることと、働き手のすそ野を広げることが必須である。このような背景から、政府は一億総活躍社会の実現に向け2016年より「働き方改革」を推進している [2]。これは、働く人の置かれた個々の事情に応じ、多様な働き方を選択できる社会を実現し、働く人一人ひとりがより良い将来の展望を持てるようにすることを目指しており、ワークライフバランスの改善、労働生産性の向上、高齢者の就業促進や女性・若者が活躍しやすい環境整備などがテーマとされている。とりわけテレワークのようなICT(Information and Communication Technology)を活用した新しい働き方は、人々が多様で柔軟な働き方を選択することを可能にし、このような課題の解決に寄与すると期待されている [3]。

このような働き方改革が特に必要な職種のひとつが建設業である。建設業はFig. 1.1のように他産業に比べ高齢化が著しく、今後10年間で退職することが見込まれる55歳以上の就業者が35.3%を占めるのに対し、29歳以下の若手就業者はわずか11.6%となっている [4]。この原因は、前述の少子高齢化に加えて建設業特有の事象も影響していると考えられる。建設業は、いわゆる3K(きつい、危険、きたない)といったイメージが定着しており、若者から敬遠される職業のひとつである。実際に離職率も全産業に比べて高く、建設業離職者(離職時若年

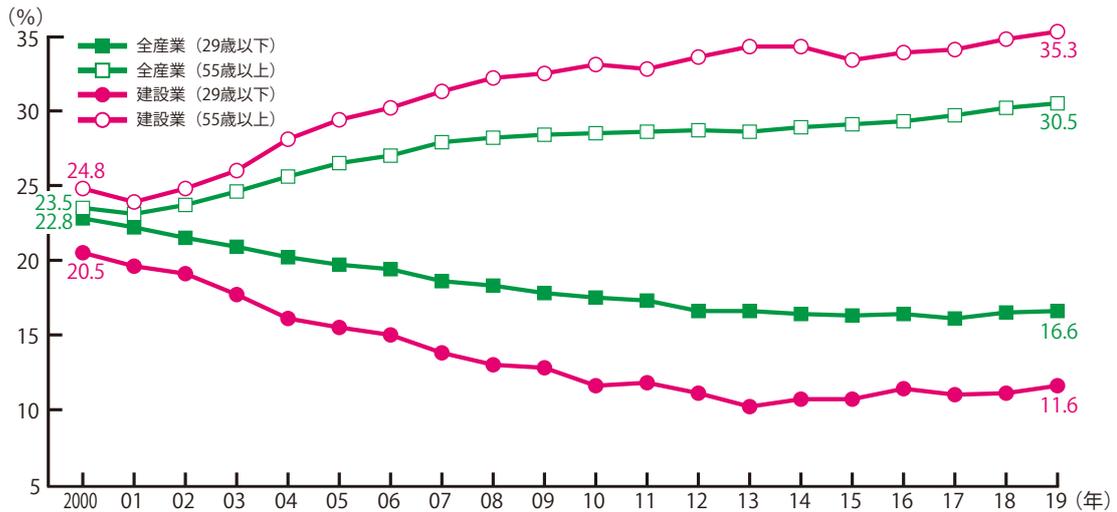


Fig. 1.1: Number of workers for construction fields[4].

層)が仕事を辞めた一番の理由も、「遠方の作業場が多い」「休みが取りづらい」「作業に危険が伴う」等の割合が高い [5]. また、死傷者数も全産業と比較して2倍以上である [6]. とりわけ建機オペレータについては不足が慢性化しており、労働者の減少を上回る生産性の向上が必要であるとともに、就業環境の改善による入職促進と定着が必須である.

このような背景から、国土交通省は2016年より「i-Construction」という取り組みを推進している [7, 8]. 「生産性の向上」「魅力ある建設現場」「建設現場の死亡事故ゼロ」「新3K(給与が高い, 休暇が取れる, 希望が持てる)」を目指し、「ICT技術の全面的な活用」「基準の標準化」「施工時期の平準化」といった取り組みが進められている. なかでもICT技術の全面的な活用は、測量や検査時にUAV(ドローン)等などによる3次元データ計測データを活用し、施工段階において自動制御が可能なICT建機 [9] を活用するなど、すべての建設生産プロセスで3次元データとICT建機を一貫して活用する取り組みである [10]. しかし、ICT建機を活用し生産性が向上したとしても、建設機械に搭乗して操作する必要がある限り依然として就業環境の問題は残る. また、AI(人工知能)やGNSS(衛星測位システム)を用いた建設機械の自動化についても研究が進められている [11] が、製造業等とは異なり建設業は基本的に現地・単品生産のため、その全てを自動化することは困難であり、従来通り人が判断し操作を行う必要がある状況が続くと考えられる.

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。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就業環境の改善が期待できる。しかし、現在主流の遠隔操作建設機械は、一般のオペレータでは、作業内容により作業時間が2倍以上要するケースがあることが課題となっている [12]。そのため、主に土砂災害や火山災害等が発生した後の復旧工事など、2次災害の恐れが強い危険な場所での施工にしか用いられておらず、復旧作業に継続して従事しているオペレータが主に対応している状況にある [13]。よって、遠隔操作における作業効率を改善するとともに、一般的な土木工事等に従事するオペレータでも搭乗操作と比較して違和感なく操縦可能な遠隔操作システムが必要である。また、そのような遠隔操作システムが実現できた場合でも、建設機械を効率よく安全に操作するための技能習得ならびに維持には多くの操縦時間が必要であるため、建設業への入職促進と定着のためには効率的に操作教育・練習が可能なシステムが必要である。

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(2019年度)[14]においても49.0%と半数近く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

遠隔操作建設機械の歴史は古く、1969年に富山県常願寺川の災害において、水中ブルドーザが遠隔操作された事が現在最も古い遠隔操作の事例とされている [15]。この時はまだ遠望からの直接目視による有線操作であった。1983年には、現北陸地方整備局立山砂防工事事務所において、施工効率の面で実用性に難があるものの、無線操作方式による油圧ショベルを利用した崩落危険個所での掘削作業が行われている [16]。また1970年代には現中部地方整備局で、地下水流入の危険性、高温多湿の劣悪な作業環境といった作業員の安全性の確保の観

点から、映像装置を利用した遠隔操作による無人ケーソン施工が行われている [13, 17].

この技術が広く認識されるようになったのは、1991年の雲仙普賢岳噴火で発生した火砕流の復旧活動として、1993年に現国土交通省の「試験フィールド制度」を活用した民間技術公募により「無線遠隔操作施工(無人化施工)」が採択されたことに始まる [15]-[18]. これは、これまでの遠隔操作建設機械やテレビカメラ、無線技術などのすべての技術が総合的に使われた「システム」として成立した世界で初めての無人化施工であり、操作室・カメラ車の導入、ダンプ、クローラダンプ、ブルドーザ、油圧ショベル等の建設機械による構成であった [13]. 無人化施工はこれを契機に日本において発展を続けてきた技術であり、2004年の新潟中越地震での崩落土砂撤去 [19], 2011年の東日本大震災における福島原発での瓦礫撤去作業 [18], 2016年の熊本地震における崩落斜面の復旧工事 [20] などに用いられており、研究が進められてきた [21, 22]. しかし、前述のように搭乗操作と比較し作業効率が低下する等の問題から、一般土木工事で使用されるまでには至っていない. この問題の原因は、主に遅延と操作システムの差異であると考えられる.

遠隔操作では、通信遅延に伴う操作・映像遅延が発生する. 一般的に通信遅延が 200ms を超えると操作性に影響があると言われている [23] が、5G などの技術により解決されつつある [24]. しかし、操作システムの差異については課題が残っている. 現在主流の遠隔操作油圧ショベルは、Fig. 1.2 のように直接目視もしくは油圧ショベルに搭載されたカメラや作業現場に設置したカメラ車からの映像を複数のモニタで見ながら小型リモコンで操作するといったもの [25, 26] であり、搭乗での操作と比較して操作感覚や作業空間の把握といった知覚・認知システムが異なる [13]. よって、操作インターフェースの操作感覚を実機と同様にするとともに、搭乗操作時に得られる操作に必要な情報をもれなくオペレータにフィードバックすることが必要となる.

ここで、実機搭乗の際にオペレータが受けとる音や振動を遠隔操作コックピット側で再現することを考える. しかし、例えばわずかな傾きを再現するには、高価なアクチュエータ、制



Fig. 1.2: Currently mainstream teleoperated hydraulic excavator system[27].

御装置が必要になるという問題がある。遠隔操作においては、実機搭乗では難しい、情報をカット、変換、増強してオペレータにフィードバックすることが可能となる。そのため、オペレータが必要な情報は何かという観点で検討・評価することで、より低コストで、作業効率を落とさない遠隔操作システムが実現できると考えられる。具体的には、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、オペレータに理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルな遠隔操作コックピットを提案する。従来研究では、フィードバックの追加や映像の高解像度化 [28] などの評価はあったが、オペレータが必要な情報は何かという観点で検討・評価されている研究は著者の知限りでは行われていない。

また、効率的に操作教育・練習が可能なシステムとして操作シミュレータを導入することが考えられる。操作シミュレータを用いることで実際の施工やフィールドの確保をせずに油圧ショベル操作の技能習得・維持を行うことができるが、実機搭乗を再現しようとする装置が大きく、高コストとなる問題がある。そこで本論文では、実機に近いインターフェースを備えたコックピットシステムにより、遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シ

シミュレータによる訓練が可能なシステムを提案する。

このように、遠隔操作油圧ショベルに関して、従来研究では行われていない観点で多面的に検討・評価し、遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットを構築することを目標とする。

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、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルで、かつ遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットを構築する。

第1章では、建設業が直面している社会的な課題と、遠隔操作油圧ショベルに関する取り組みについてまとめ、一般土木等をテレワーク化できる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、本論文において目指すマルチモーダルを用いたクロスプラットフォームコックピットのコンセプトを明確にする。

第2章では、人間の知覚特性に合ったインターフェースについて、視覚系に着目し、旋回動作における難易度モデル構築について述べる。旋回動作をポインティング動作とみなし、旋回動作シミュレータを構築し、従来の難易度モデルに対し視野角を追加した旋回難易度モデルを提案し評価する。さらに、油圧ショベルの動作特性を考慮した旋回難易度モデルを提案し評価する。最後に、提案した旋回難易度モデルの有用性について考察する。

第3章では、オペレータに理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとして、機体不安定度フィードバックについて述べる。掘削作業時に着目し、掘削反力と機械姿勢から導かれる、アタッチメントではなく機体が動き出すまでの余裕度の指標となる機体不安定度を提案する。また、機体不安定度をフィードバックする手法として直感的なメータによる提示手法を提案する。次に、その効果を確認するためのシミュレータ

を構築し，被験者試験を実施した結果について述べる．最後に，提案手法の有無による結果の比較および考察を行う．

第4章では，前章で提案した機体不安定度フィードバックを搭載し，油圧ショベルを遠隔操作できるだけでなく，油圧ショベルシミュレータの操作が可能な，遠隔操作油圧ショベルのクロスプラットフォームコックピットシステムについて述べる．まず，コックピットシステムに採用した3次元視覚情報提示システム，油圧ショベル搭乗席の傾きをフィードバックするモーションシミュレータシートなどについて述べる．次に，それらのシステムを用いた油圧ショベル操作シミュレータの構成について述べ，それらについての検証を行った結果を示す．最後に提案した遠隔操作コックピットシステムの評価を実施し，提案したマルチモーダルな遠隔操作油圧ショベルのクロスプラットフォームコックピットシステムの考察を行う．

第5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 油圧ショベルの旋回操作における難 易度モデルの構築

2.1 緒言

建設機械である油圧ショベル Fig. 2.1 は，その機構の自由度の高さと先端に取り付けるアタッチメントの種類が多さから掘削，解体，整地など様々な作業に利用されている．さらに近年では災害現場において遠隔操作油圧ショベルが運用されるなど多くの現場で活用されている．しかし，その汎用性の高さにもかかわらず，フィードバック情報の不足や視認性の低さなど人間工学に基づいた設計上の問題が存在し，それらが作業効率の低下を招いていると言われている [29]．

一般的な土木工事における油圧ショベルの動作は，大きく分けて旋回，掘削，走行の3つに分けられ，オペレータは運転席左右にあるジョイスティックを使って油圧ショベルを操作する．その内，旋回作業を行う場合には，国際標準化機構 (ISO) の規格においては，左ジョイスティックを左右方向に傾けることで油圧ショベルの回転方向と回転速度を決定する．とりわけ積み込み作業では，バケットを目標物の真上に移動させるなど，油圧ショベルの正確な位置決めが重要となる．そこで，この旋回動作によるバケットの位置決め作業をポインティング動作と考える．従来の意味でのポインティング動作とは，GUI(Graphical User Interface) 上でマウスやタッチパッドを使ってターゲットを指し示したり，選択したりすることであるが，旋回操作によるバケットの位置決めもその一種であると考えることができる．例えば，Hayashi と Tamura[30] は，遠隔操作型油圧ショベルシステムのジョイスティック振動の有効性を検証

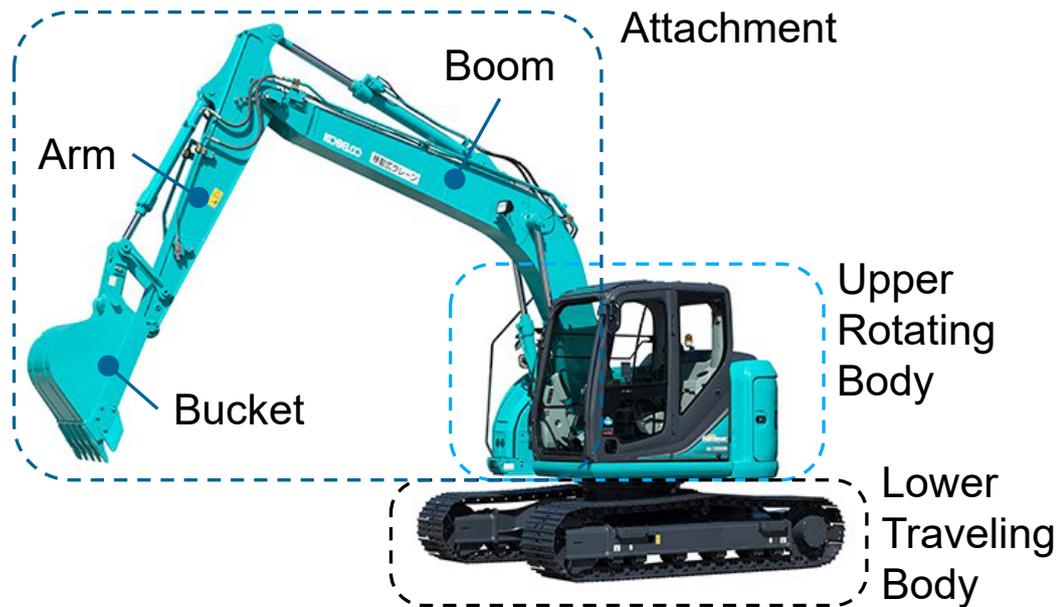


Fig. 2.1: Hydraulic excavator.

するために、バケットを用いたポインティング課題実験を行っている。

ポインティング動作は、人間の基本的な運動特性として注目されており、長年にわたり様々な研究が行われてきた。例えば Woodworth らは、ポインティング動作を動作計画時間と調整時間の2つの動作に分割したモデルを提案した [31]。また Uno らは、ポインティング動作中の腕の関節に焦点を当て、回転トルクの合計が最小化される最小トルク変化運動規範モデルを提案した [32]。中でも現在広く用いられているのが、Fitts の法則と言われるモデルである。

Fitts は、ポインティング課題を完了するまでに必要な時間に関して、ポインティング動作を評価およびモデル化した [33]。このモデルは、ポインティング課題の開始位置から目標位置までの距離と目標のサイズがポインティング課題完了時間に影響することを示している。このモデルは非常に単純であり、入力環境や方法に依存しない。多くの研究において、このモデルを用いたインターフェースの改善が試みられており、心理学の分野でも使用されている。例えば Burno らは、このモデルを用いて、3次元空間におけるジェスチャ動作入力インターフェース、マウス、およびタッチスクリーンでのポインティング動作のパフォーマンスを評価した [34]。また Kim らは、視線入力と非侵襲 BMI (Brain Machine Interface) を組み合わせ



Fig. 2.2: Boom of hydraulic excavator obstructs operator's visibility.

せたインターフェースを提案し、このモデルを用いて評価した [35].

Fitts の法則を油圧ショベルの旋回動作に適用する場合、旋回開始位置から目標位置までの距離と目標のサイズのみが旋回動作を完了するまでの時間に影響することになるが、オペレータの視野角も影響を与える可能性がある。例えば油圧ショベル運転席の右側にはブームがあり、Fig. 2.2 のようにオペレータの視界を遮っている。また、遠隔操作油圧ショベルではモニタの大きさにより見ることができる範囲が制限される。Kittusamy により提案されている油圧ショベルの運転効率に関するチェックリストにおいて、視界範囲に関連する項目を含め、作業効率に影響を与える項目が示されている [36] が、視野角が作業効率にどのように影響するかについては言及されていない。視界の制限が大きいほど、旋回動作が完了するまでの時間が長くなると考えられるため、油圧ショベルの旋回操作難易度をモデル化するには、オペレータの視野角を考慮に入れる必要がある。

一方で、油圧ショベルではシステム自身のむだ時間や慣性といった動特性の影響も無視できない。油圧ショベルは、エンジンに連結された油圧ポンプによる油圧出力により動作する

が、油圧アクチュエータへの油量はオペレータにより操作されるコントロールバルブを介し制御されるため、操作入力を行ってから動作が開始されるまでにむだ時間が発生する。また、上部旋回体は大きな慣性を持つため、旋回動作は加速域と減速域で行われることが多い [37]。そのため、動特性の影響も考慮に入れる必要がある。これらを考慮に入れることで油圧ショベルの旋回動作に着目した難易度モデルを提案することを目標とする。このモデルにより、油圧ショベル、もしくは遠隔操作油圧ショベルシステムの旋回作業効率を評価することが可能となる。

本章では、まず、ポインティング動作に関する従来研究を述べ、目標とする油圧ショベルの旋回動作に着目した難易度モデルが検討されていないことを明確にする。次に、視野角と機体の動特性それぞれに対し、旋回動作を模したシミュレータを用いて被験者試験を実施し、その結果に基づき旋回操作難易度モデルを提案し、評価する。また、視野角については実際の機械を用いて被験者試験を実施し、提案した旋回操作難易度モデルが、実機においても有効であるか評価する。

2.2 ポインティング動作モデルに関する従来研究

ポインティング動作の難易度をモデル化するために多くの研究が試みられてきた。前述のように、既存のモデルの一つに Fitts の法則がある。これはポインティング課題の難易度指標 ID とポインティング課題完了時間 MT の関係をモデル化したものである。Fitts の法則によると、ポインティング課題開始位置から目標までの距離が長くなる、また、目標サイズが小さくなるにつれて MT が増加する (Fig 2.3)。MacKenzie は Fitts の法則を改良し、以下のように表現した [38]。

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (2.1)$$

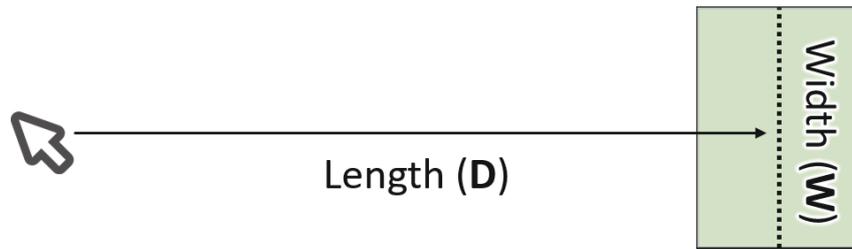


Fig. 2.3: Pointing operation by mouse.

ここで、 D は、ポインティング課題開始位置から目標までの距離、 W は目標サイズ(幅)である。 MT は ID に対して直線的に増加する傾向があり、これは実験的に得られた定数 a, b を用いて以下のように表すことができる。

$$MT = a + bID \quad (2.2)$$

Fittsの法則はもともと1次元の単純な運動応答モデルとして提案されていたが、MacKenzieはこのモデルを拡張して2次元のポインティング動作に適用できるようにした[39]。その後、MurataとIwaseは、3次元のポインティング動作を考慮するように拡張した[40]。その他にも、様々な研究がFittsの法則を拡張して、目標までの距離と目標サイズ以外の効果について検討している。

Jaxらは、曲線 OI 上に障害物があると仮定してポインティング動作を行った場合の課題完了時間を予測するために、以下の式を提案した[41]。

$$MT = a + bID + cOI \quad (2.3)$$

ここで、 a, b, c は実験で得られた定数である。

AccotとZhaiは、細長い経路を通過する際に必要となる、車両が経路の幅を超えてはみ出

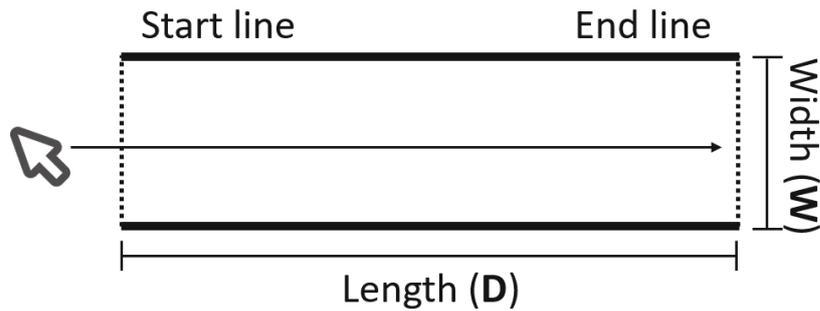


Fig. 2.4: Steering operation by mouse.

さないように操舵する操作の難易度を提案した (Fig. 2.4)[42].

$$ID = \frac{D}{W} \quad (2.4)$$

MacKenzie と Buxton は, Fitts の法則を 2 次元に拡張する際に, 目標の高さ H を組み込んだ以下の式を提案した [43].

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{\min(W, H)} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Bi らはスマートフォンサイズでのポインティング動作試験を実施し, 小型モニタ向けにより正確な難易度モデルを提案している [44]. このように適切に設計されたポインティング難易度モデルを用いることで, ポインティングデバイスや環境の操作性を評価することができる.

また, 操作遅延についても研究されている. Teather と Stuerzlinger はマウス操作からカーソルが動くまでに遅延が生じる環境でポインティング試験を実施した場合, 225 [ms] の遅延が生じるとポインティング性能が著しく低下することを示している [45]. また, Friston らは遅延環境下でのポインティングデバイスの速度波形に着目し, 86 [ms] の遅延が生じると速度波形が異なったものとなることを報告している [46].

ここで, 視野角を考慮したポインティング動作モデルは筆者の知る限り提案されていない.

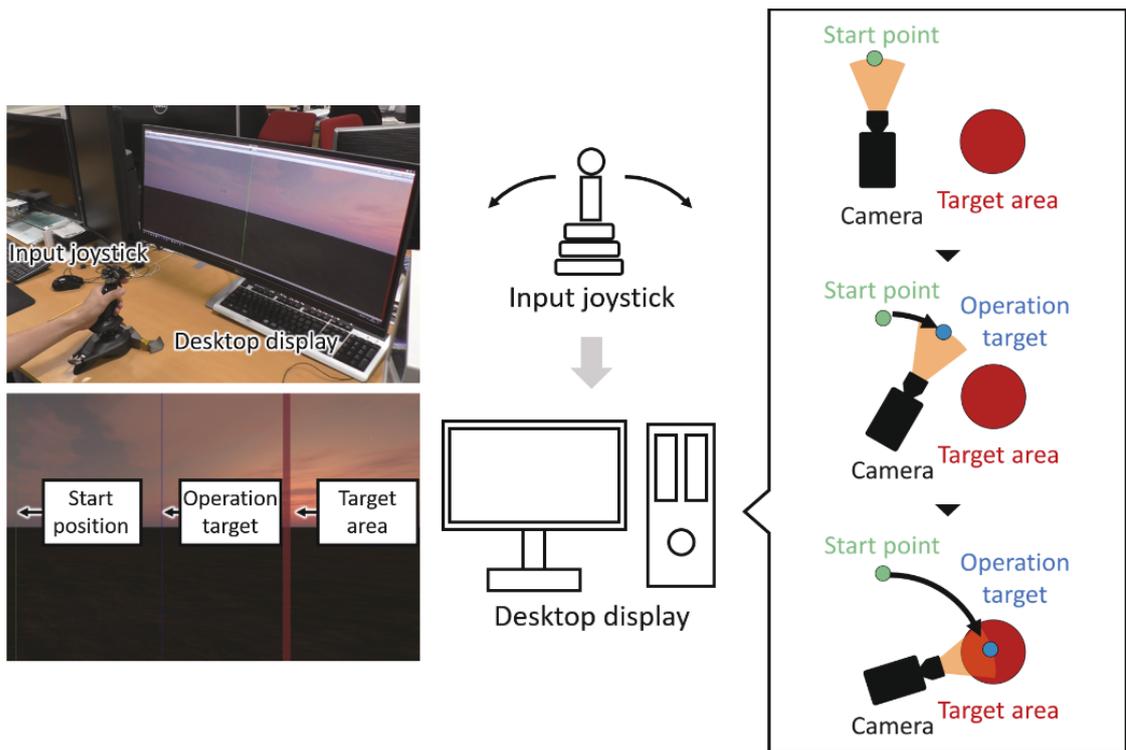


Fig. 2.5: Simulation experimental task.

例えば視野角が狭くなるにつれ、ポインティング難易度は上がると予想されるが、これらがポインティング難易度にどのように影響するかは明らかにはなっていない。また、単純な遅延の影響についての研究は存在するが、動特性を持ったポインティング動作モデルは筆者の知る限り提案されていない。よって、本章では旋回操作のシミュレーション環境を開発し、視野角と動特性に対するポインティング難易度の関係をそれぞれ提案し評価した。

2.3 視野角を考慮した旋回操作難易度モデルの構築

2.3.1 シミュレーション試験

視野角の影響を明確にし、油圧ショベルの旋回操作難易度モデルを開発するために、旋回操作を模擬したシミュレーションシステムを構築し、被験者試験を実施した。



Fig. 2.6: Simulator display image when field-of-view size is changed.

シミュレータと試験条件

シミュレーションシステムは，パソコン，モニター，操作を入力するジョイスティックで構成され，実験システムは3Dゲームエンジン Unity を用いて作成した．モニターには，旋回開始位置，操作ターゲット，および目標領域が表示され，ジョイスティックを傾けると，シミュレータ内のカメラと操作ターゲットがジョイスティックの向きと傾きに応じて回転する．回転の最大角速度は 60 [deg/s] とし，ジョイスティックの最大傾きを θ_{\max} としたときの，ジョイスティックの傾き θ と角速度 ω の関係を次式に示す．

$$\omega = \frac{60\theta}{\theta_{\max}} \quad (2.6)$$

被験者試験の課題について説明する (Fig. 2.5)．被験者は Unity 環境内のカメラが映し出す映像をモニターで見ながら，旋回課題を行う．Unity 上のカメラは緑の線で示される開始地点を向いた状態で開始し，被験者のジョイスティック操作に応じて，カメラが旋回する．カメラの中央には黒い線で示される操作ターゲットが存在し，その操作ターゲットを赤い領域で示される目標領域の中で停止させたら課題完了とした．被験者には事前情報として，目標領域が右方向に存在すること，できるだけ課題を素早く終わるように伝えた．各課題の間には 5 秒の休憩を設けた．シミュレータでは，旋回開始位置から目標領域までの角度，目標領域幅，および視野角を変更できる．モニターで視野角を変更した例を Fig. 2.6 に示す．

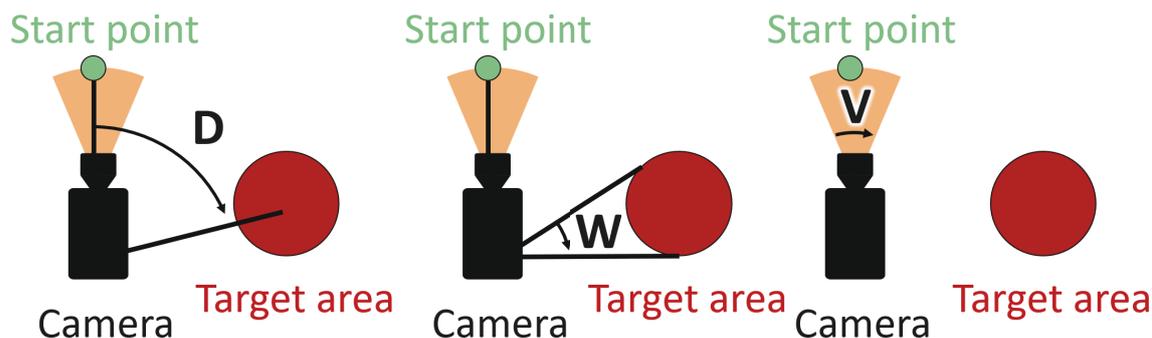


Fig. 2.7: Definition of parameters used in index of difficulty models for simulation.

Fig. 2.7 に、旋回操作のパラメータの定義と実験条件を示す。 D は旋回開始位置からの目標領域中心までの角度、 W は目標領域の幅で、カメラ位置を中心とした角度で示す。 V は視野角である。 D および W はそれぞれ 3 条件 (D : 60 [deg], 90 [deg], 120 [deg], W : 1.43 [deg], 11.42 [deg], 22.62 [deg]) を設定し、 V は 4 条件 (10 [deg], 20 [deg], 30 [deg], 60 [deg]) とした。

被験者は、各条件において 3 回課題を行い、課題完了までにかかる時間の計測を行った。条件の提示順はランダムとした。3 回の測定結果について、平均時間を算出し、それをその条件における課題完了時間とした。また、被験者ごとの慣れを統一するため、条件が変わるごとに事前練習を 3 回行なってから試験を実施した。被験者は 21 歳から 22 歳までの 10 人の健康な成人男性 (Sub.A~J) で広島大学の学生から参加者を募集した。被験者試験に先立ち、ヘルシンキ宣言に基づき、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。

シミュレーションによる試験結果

Table 2.1 に、全条件における全ての被験者の平均課題完了時間と標準偏差を示す。また、Fig. 2.8~2.10 に、旋回開始位置から目標領域までの角度、目標領域の幅、視野角に対する課題完了時間を示す。Fig. 2.8 は旋回開始位置から目標領域までの角度、Fig. 2.9 は目標領域の幅、Fig. 2.10 は視野角についてである。それぞれについて、One-way ANOVA を実施したところ、全ての場合について、条件間で有意な差が得られた ($F(2, 12) = 86.143, p < 0.01, F($

Table 2.1: Pointing conditions and results (simulation experiment).

| Field-of-view size | Target distance | Target size | Movement time | Standard deviation |
|--------------------|-----------------|-------------|---------------|--------------------|
| V | D | W | MT | SD |
| [deg.] | [deg.] | [deg.] | [s] | - |
| 10 | 60 | 1.43 | 2.44 | 0.21 |
| | | 11.42 | 1.93 | 0.18 |
| | | 22.62 | 1.40 | 0.21 |
| | 90 | 1.43 | 3.01 | 0.38 |
| | | 11.42 | 2.36 | 0.15 |
| | | 22.62 | 1.95 | 0.23 |
| | 120 | 1.43 | 3.83 | 0.45 |
| | | 11.42 | 2.97 | 0.20 |
| | | 22.62 | 2.53 | 0.36 |
| 20 | 60 | 1.43 | 2.41 | 0.28 |
| | | 11.42 | 1.62 | 0.15 |
| | | 22.62 | 1.27 | 0.16 |
| | 90 | 1.43 | 2.78 | 0.23 |
| | | 11.42 | 2.13 | 0.31 |
| | | 22.62 | 1.77 | 0.20 |
| | 120 | 1.43 | 3.31 | 0.33 |
| | | 11.42 | 2.71 | 0.21 |
| | | 22.62 | 2.24 | 0.29 |
| 30 | 60 | 1.43 | 2.04 | 0.26 |
| | | 11.42 | 1.47 | 0.22 |
| | | 22.62 | 1.17 | 0.15 |
| | 90 | 1.43 | 2.67 | 0.21 |
| | | 11.42 | 1.86 | 0.22 |
| | | 22.62 | 1.65 | 0.19 |
| | 120 | 1.43 | 3.14 | 0.40 |
| | | 11.42 | 2.32 | 0.29 |
| | | 22.62 | 2.15 | 0.22 |
| 60 | 60 | 1.43 | 1.51 | 0.24 |
| | | 11.42 | 1.27 | 0.22 |
| | | 22.62 | 1.09 | 0.06 |
| | 90 | 1.43 | 2.41 | 0.63 |
| | | 11.42 | 1.62 | 0.15 |
| | | 22.62 | 1.58 | 0.13 |
| | 120 | 1.43 | 2.75 | 0.30 |
| | | 11.42 | 2.18 | 0.15 |
| | | 22.62 | 2.18 | 0.25 |

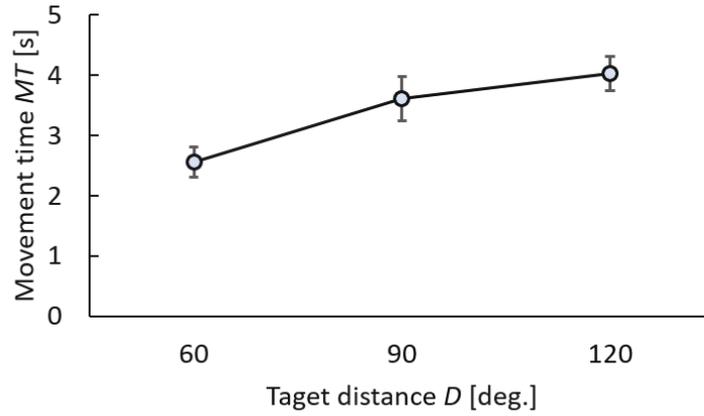


Fig. 2.8: Influence of target distance on measurement time (simulation experiment).

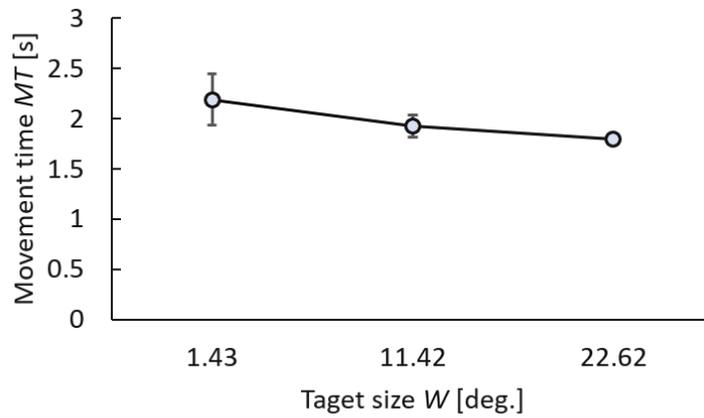


Fig. 2.9: Influence of target size on measurement time (simulation experiment).

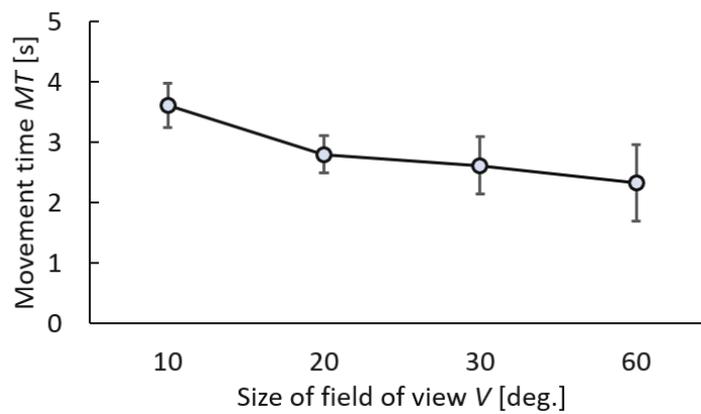


Fig. 2.10: Influence of size of field-of-view on measurement time (simulation experiment).

2, 12) = 371.798, $p < 0.01$, $F(3, 12) = 289.732, p < 0.01$).

Fig. 2.8, 2.9 からわかるように、旋回開始位置から目標領域までの角度が大きくなる、また目標領域の幅が小さくなるにつれて、課題完了時間が長くなっており、Fitts の法則と同様の傾向が得られた。また、Fig. 2.10 からわかるように、視野角が小さくなるほど、課題完了時間が長くなることを確認した。Jhonson らは、遠隔操作ロボットを用いて実験を行い、作業効率は提示された画像の視野角に依存することを示しており [47]、本試験で得られた結果は、この結果とも一致している。

以上より、旋回開始位置から目標領域までの角度が大きくなる、目標領域の幅が小さくなる、視野角が小さくなるほど、旋回操作の難易度が高くなることが明らかになった。

2.3.2 視野角を考慮した旋回操作難易度モデルの提案

この結果を元に、視野角を考慮した旋回操作難易度モデルの提案を行う。提案に際し、下記の 2 条件を考慮した。

- $W = 0$, または $V = 0$ の場合, $ID = 1$
- $D = 0$ の場合, $ID = 0$

これを満たす新たな難易度モデルを下記に提案する。

$$ID_{\text{new1}} = \log_2 \left(\frac{D}{W} \cdot \frac{D}{V} + 1 \right) \quad (2.7)$$

これは従来の Fitts モデルに視野角 V を加えたものとなっている。

2.3.3 提案モデルの評価

提案した難易度モデルと従来の難易度モデルを比較した。Fig. 2.11, 2.12 に、Sub.A での結果について、難易度モデルと課題完了時間との関係を示す。横軸は難易度指標 ID 、縦軸は課

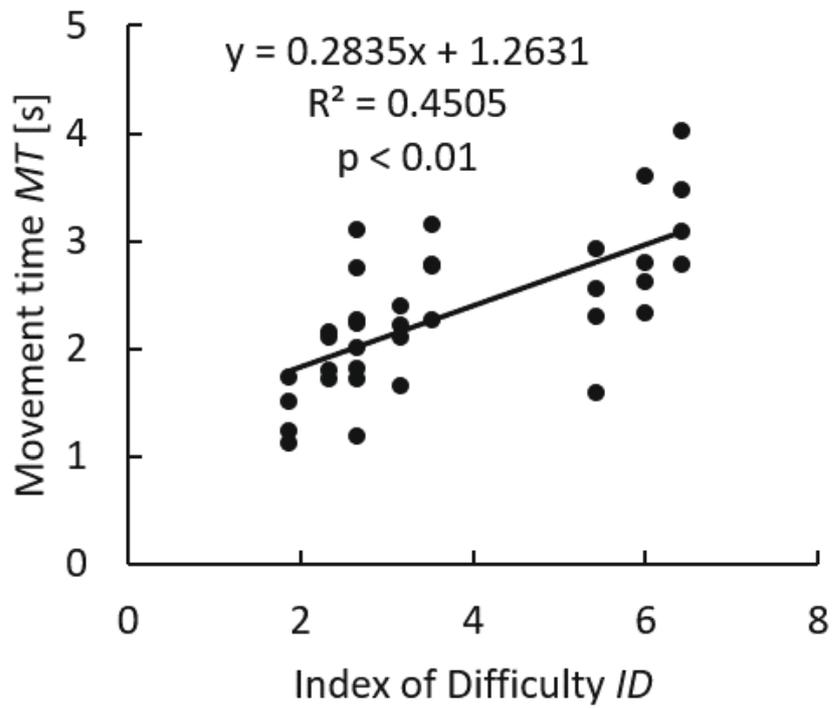


Fig. 2.11: Scatter diagram of original index of difficulty and measurement time (simulation).

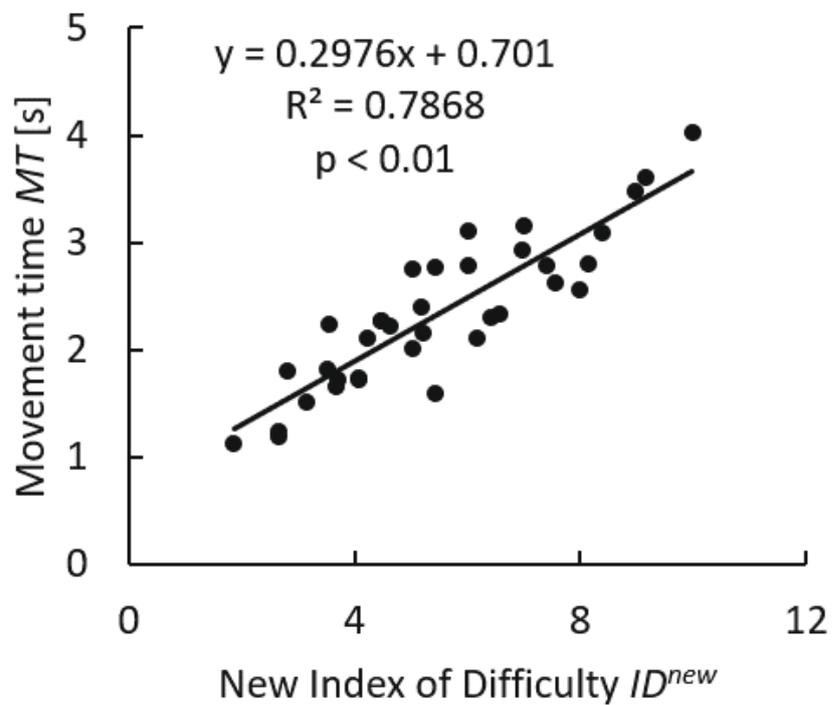


Fig. 2.12: Scatter diagram of proposed index of difficulty and measurement time (simulation).

Table 2.2: Coefficients of determination and p -values (simulation experiment).

| Subject | Coefficient of determination : R^2 | | P -value : p | |
|---------|--------------------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| | ID | ID_{new1} | ID | ID_{new1} |
| A | 0.45 | 0.79 | 7.4×10^{-8} | 5.9×10^{-9} |
| B | 0.40 | 0.73 | 3.1×10^{-5} | 4.4×10^{-8} |
| C | 0.61 | 0.83 | 2.3×10^{-8} | 8.8×10^{-15} |
| D | 0.47 | 0.79 | 3.6×10^{-6} | 4.9×10^{-8} |
| E | 0.43 | 0.69 | 1.5×10^{-5} | 3.0×10^{-9} |
| F | 0.60 | 0.87 | 2.9×10^{-8} | 2.1×10^{-16} |
| G | 0.42 | 0.74 | 1.7×10^{-5} | 2.0×10^{-8} |
| H | 0.56 | 0.79 | 1.7×10^{-8} | 3.9×10^{-9} |
| I | 0.62 | 0.80 | 9.9×10^{-9} | 1.4×10^{-13} |
| J | 0.54 | 0.72 | 3.1×10^{-7} | 8.1×10^{-9} |

題完了時間 MT を示し、近似直線とその式、決定係数 R^2 と p 値を表示している。Fig. 2.11 は従来の Fitts モデルについて、Fig. 2.12 は提案した難易度モデルについてである。これらより、Fitts モデルでの決定係数が 0.4505 であったのに対し、提案モデルでは 0.7869 と上昇した。また、Table 2.2 に全被験者の決定係数 R^2 と p 値を示す。以上より、シミュレーションにおいては、全ての被験者において提案モデルを用いることで決定係数が上昇することを確認した。

2.3.4 実機試験

提案した難易度モデルが実際の油圧ショベルに対しても適用するか確認するために、シミュレータ試験と同様の操作について、油圧ショベルを用いた実験を実施した。

試験条件

試験は油圧ショベル SK200-9(コベルコ建機株式会社) を用いて実施した。実験環境を Fig. 2.13 に示す。バケット先端には操作ターゲットである棒がくくり付けられおり、油圧ショベルの周囲にカラーコーンを設置し、2つのカラーコーンの間を目標領域とした。視野角は運転席に設けたパーテーションにより、見える範囲を制限することで変更した。

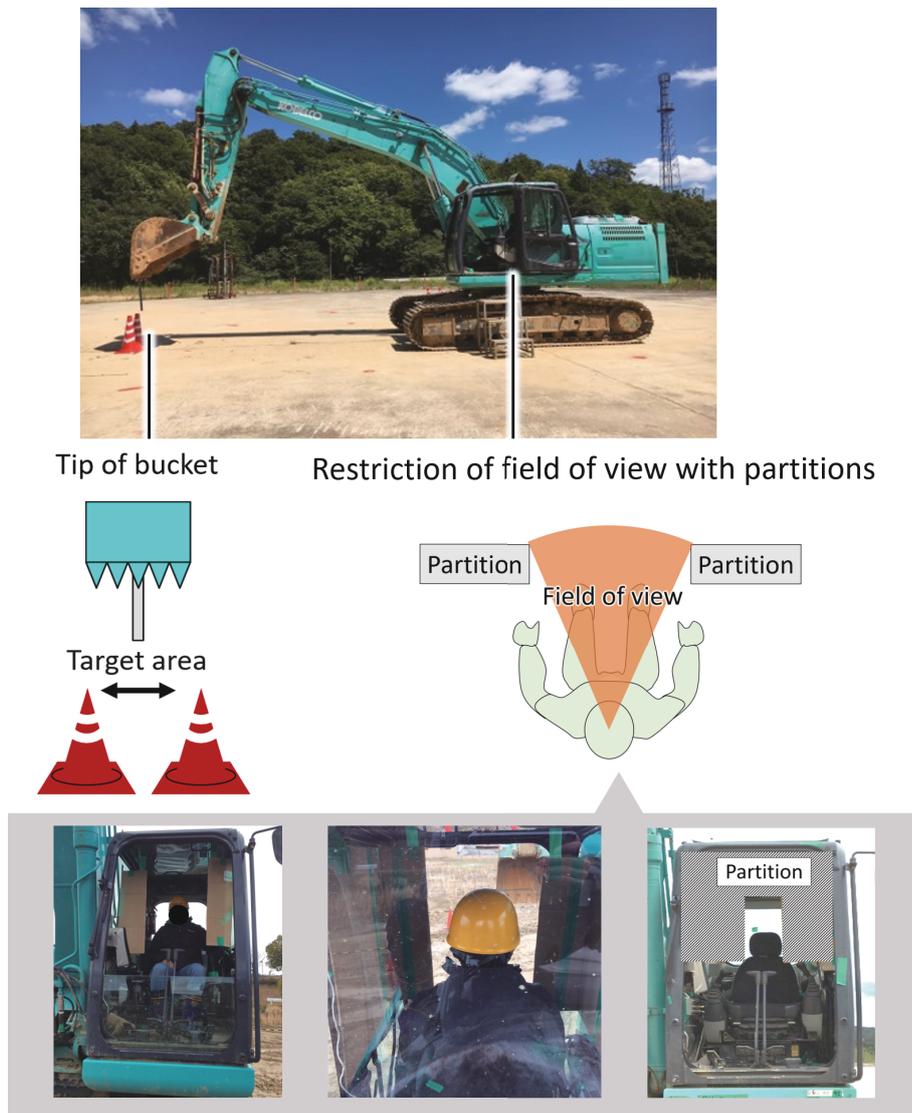


Fig. 2.13: Actual experimental landscape.

被験者試験の課題と実験条件について説明する (Fig. 2.14). 被験者は機械に搭乗して巡回課題を行う. 操作ターゲットである棒を, 油圧ショベルの巡回操作のみを行い, 目標領域内へ停止させたら課題完了とした. 被験者には事前情報として, できるだけ課題を素早く終わるように伝えた. また, パラメータ定義については, シミュレータ試験と同様で, D および W はそれぞれ 3 つの条件 (D : 30 [deg], 60 [deg], 90 [deg], W : 2.64 [deg], 5.29 [deg], 7.94 [deg]) を設定し, V は 3 条件 (60 [deg], 90 [deg], 120 [deg]) とした.

被験者は, 各条件において 3 回課題を行い, 課題完了までにかかる時間の計測を行った. 条件の提示順はランダムとした. 3 回の測定結果について, 平均時間を算出し, それをそ

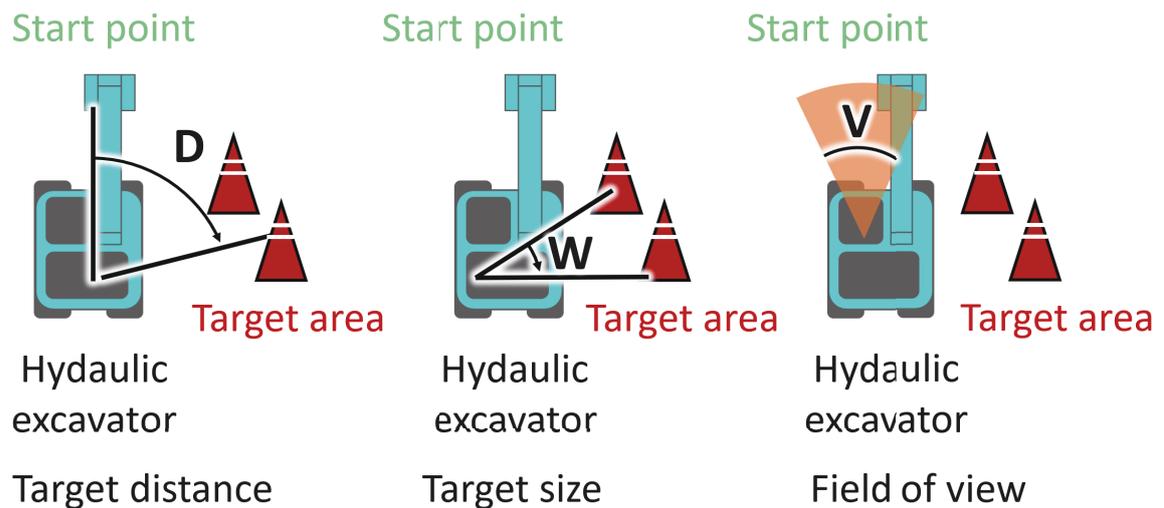


Fig. 2.14: Definition of parameters used in index of difficulty models for hydraulic excavator experiment.

の条件における課題完了時間とした。被験者は油圧ショベルの操作経験のある 21 歳から 52 歳までの 10 人の健康な成人男性 (Sub.A~J) で、コベルコ建機株式会社から参加者を募集した。被験者試験に先立ち、ヘルシンキ宣言に基づき、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。

実機による試験結果

Table 2.3 に、全条件における、従来の難易度指標 ID 、提案する難易度指標 ID_{new1} と、全ての被験者の平均課題完了時間と標準偏差を示す。また、Fig. 2.15~2.17 に、旋回開始位置から目標領域までの角度、目標領域の幅、視野角に対する課題完了時間を示す。Fig. 2.15 は旋回開始位置から目標領域までの角度、Fig. 2.16 は目標領域の幅、Fig. 2.17 は視野角についてである。それぞれについて、One-way ANOVA を実施したところ、全ての場合について、条件間で有意な差が得られた ($F(2, 8) = 18.381, p < 0.01, F(2, 8) = 283.353, p < 0.01, F(2, 8) = 43.841, p < 0.01$)。

また、Fig. 2.18, 2.19 に、Sub.A での結果について、難易度モデルと課題完了時間との関係を示す。横軸は難易度指標 ID 、縦軸は課題完了時間 MT を示し、近似直線とその式、決定係数 R^2 と p 値を表示している。Fig. 2.18 は従来の Fitts モデルについて、Fig. 2.19 は提案した

Table 2.3: Pointing conditions and results (hydraulic excavator experiment).

| V | D | W | ID | ID_{new1} | MT | SD | |
|--------|--------|--------|------|-------------|------|------|------|
| [deg.] | [deg.] | [deg.] | - | - | [s] | - | |
| 60 | 30 | 2.64 | 3.63 | 2.74 | 3.87 | 0.66 | |
| | | 5.29 | 2.74 | 1.94 | 3.58 | 0.55 | |
| | | 7.94 | 2.26 | 1.53 | 3.35 | 0.48 | |
| | 60 | 2.64 | 4.57 | 4.57 | 5.35 | 1.12 | |
| | | 5.29 | 3.63 | 3.63 | 4.98 | 0.89 | |
| | | 7.94 | 3.10 | 3.10 | 4.73 | 0.71 | |
| | 90 | 2.64 | 5.13 | 5.70 | 5.54 | 0.56 | |
| | | 5.29 | 4.17 | 4.73 | 5.34 | 0.66 | |
| | | 7.94 | 3.62 | 4.17 | 5.13 | 0.35 | |
| 90 | 30 | 2.64 | 3.63 | 2.26 | 3.80 | 0.65 | |
| | | 5.29 | 2.74 | 1.53 | 3.42 | 0.66 | |
| | | 7.94 | 2.26 | 1.18 | 3.30 | 0.47 | |
| | 60 | 2.64 | 4.57 | 4.01 | 4.47 | 0.72 | |
| | | 5.29 | 3.63 | 3.10 | 4.26 | 0.45 | |
| | | 7.94 | 3.10 | 2.59 | 4.36 | 0.69 | |
| | 90 | 2.64 | 5.13 | 5.13 | 5.68 | 1.05 | |
| | | 5.29 | 4.17 | 4.17 | 5.16 | 0.71 | |
| | | 7.94 | 3.62 | 3.62 | 4.96 | 0.52 | |
| | 180 | 30 | 2.64 | 3.63 | 1.53 | 3.78 | 0.69 |
| | | | 5.29 | 2.74 | 0.96 | 3.25 | 0.59 |
| | | | 7.94 | 2.26 | 0.70 | 3.12 | 0.48 |
| 60 | | 2.64 | 4.57 | 3.10 | 4.42 | 0.67 | |
| | | 5.29 | 3.63 | 2.26 | 4.19 | 0.53 | |
| | | 7.94 | 3.10 | 1.82 | 4.06 | 0.50 | |
| 90 | | 2.64 | 5.13 | 4.17 | 5.41 | 0.83 | |
| | | 5.29 | 4.17 | 3.25 | 5.07 | 0.65 | |
| | | 7.94 | 3.62 | 2.74 | 4.73 | 0.58 | |

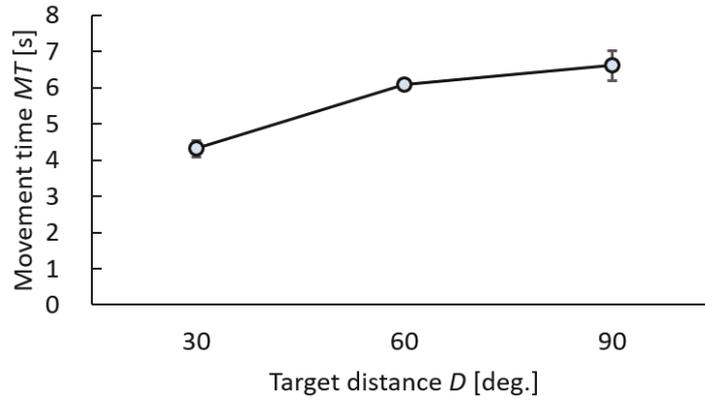


Fig. 2.15: Influence of target distance on measurement time (hydraulic excavator experiment).

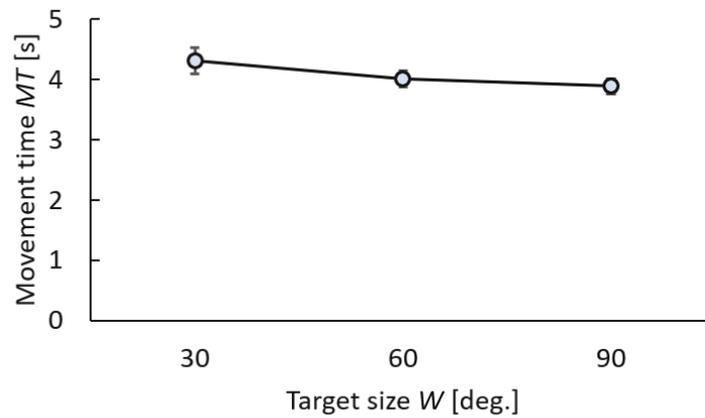


Fig. 2.16: Influence of target size on measurement time (hydraulic excavator experiment).

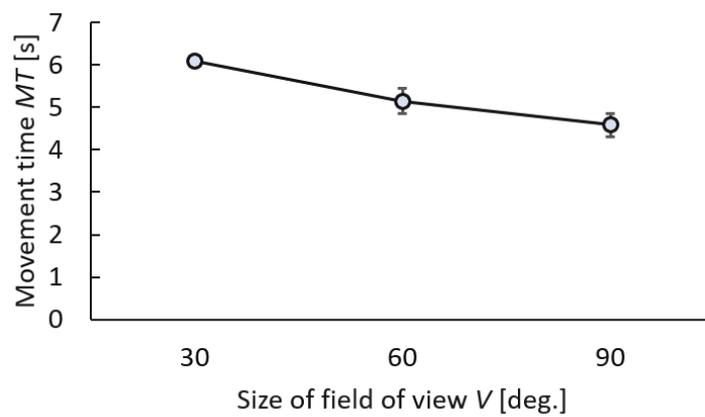


Fig. 2.17: Influence of size of field-of-view on measurement time (hydraulic excavator experiment).

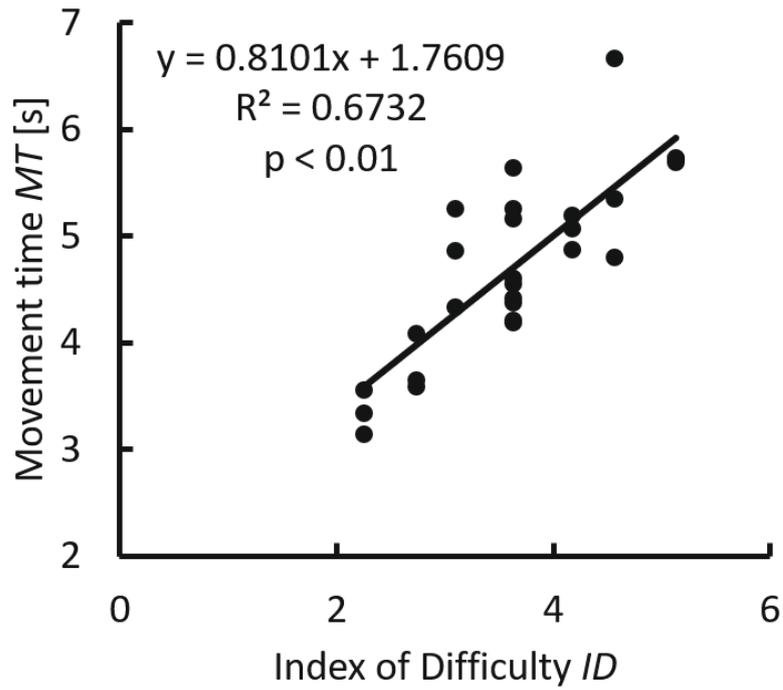


Fig. 2.18: Scatter diagram of original index of difficulty and measurement time (hydraulic excavator experiment).

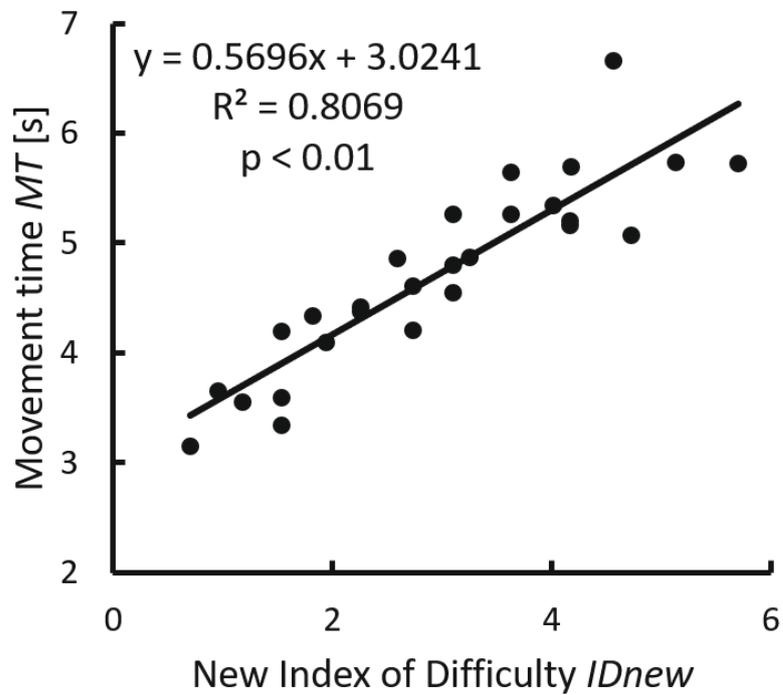


Fig. 2.19: Scatter diagram of proposed index of difficulty and measurement time (hydraulic excavator experiment).

Table 2.4: Coefficients of determination and p -values (hydraulic excavator experiment).

| Subject | Coefficient of determination : R^2 | | P -value : p | |
|---------|--------------------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| | ID | ID_{new1} | ID | ID_{new1} |
| A | 0.67 | 0.81 | 9×10^{-10} | 1.1×10^{-9} |
| B | 0.67 | 0.87 | 1.1×10^{-9} | 1.1×10^{-16} |
| C | 0.64 | 0.69 | 4.5×10^{-9} | 3.2×10^{-9} |
| D | 0.66 | 0.88 | 2.1×10^{-9} | 5.5×10^{-17} |
| E | 0.55 | 0.80 | 2.5×10^{-7} | 1.3×10^{-9} |
| F | 0.64 | 0.69 | 4.5×10^{-7} | 4.0×10^{-9} |
| G | 0.48 | 0.65 | 2.7×10^{-6} | 2.9×10^{-9} |
| H | 0.63 | 0.67 | 9.6×10^{-9} | 1.3×10^{-9} |
| I | 0.53 | 0.85 | 5.3×10^{-7} | 1.5×10^{-9} |
| J | 0.46 | 0.63 | 5.9×10^{-6} | 7.2×10^{-9} |

難易度モデルについてである。これらより、Fitts モデルでの決定係数が 0.6732 であったのに対し、提案モデルでは 0.8069 と上昇した。また、Table 2.4 に全被験者の決定係数 R^2 と p 値を示す。以上より、実機での旋回操作においても、全ての被験者において提案モデルを用いることで決定係数が上昇することを確認した。

2.3.5 考察

提案の難易度モデルは、従来の難易度モデルと比較し、決定係数が上昇した。つまり、視界の制約がある油圧ショベルに対して、旋回操作の難易度をより正確に表しているモデルであると言える。これを用いることで油圧ショベルの運転席の設計や、遠隔操作油圧ショベルのモニタサイズの決定などに適用できると考える。また、油圧ショベルの操作性についても評価できる可能性がある。Card らは、(2.2) の a, b を使用して、ヒューマンコンピュータインターフェースの操作性を評価し、 a の値が小さいほどインターフェースの操作性が向上したことを確認した [48]。油圧ショベルの旋回速度は、 a, b に影響があると考えられるため、これを元に操作性の良い旋回速度を決定できる可能性がある。ただし、本節のシミュレータ試験の結果については、旋回速度はジョイスティックの入力と比例するとしたため、油圧ショベルの

動特性が考慮に入られていない。動特性を考慮することで油圧ショベルの旋回操作性をより説明できる難易度モデルが構築できる可能性がある。よって、次節より動特性を考慮した難易度モデル構築を試みた。

2.4 動特性を考慮した旋回操作難易度モデルの構築

本節では動特性の影響を明確にし、油圧ショベル旋回操作難易度モデルを開発することを目標とした。実機においては大きく動特性を変更するのは困難であるため、シミュレーションシステムにて被験者試験を実施した。

2.4.1 シミュレーション試験

シミュレータと試験条件

動特性の影響を明確にし、油圧ショベルの旋回難易度モデルを開発するために、2.3.1で構築したシミュレータを改造し、被験者試験を実施した。ジョイスティックによるシミュレータ内のカメラと操作ターゲットの回転動作を下記のように変更した。油圧ショベルにおいて、ジョイスティックからの入力には油圧回路、油圧シリンダを経由してアタッチメントや旋回動作を発生させることから応答遅れが発生する。本研究では、油圧ショベルの旋回動作の動特性 $G(s)$ を、下記のように一次遅れ+むだ時間系と仮定した。

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (2.8)$$

ここで、 K はシステムゲイン、 T は時定数、 L はむだ時間である。むだ時間は入力を与えてから出力が現れるまでの時間であり、時定数は立ち上がり時間に関する定数である。この変更点以外のシミュレータ構成、被験者試験の課題については2.3.1と同じである。

Table 2.5: Parameters of transfer function in simulation experiment

| Condition | Dead time [s] | | Time constant [s] | |
|-----------|---------------|-----------|-------------------|-----------|
| | L_{acc} | L_{dec} | T_{acc} | T_{dec} |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.16 | 0.08 | 0.6 | 0.35 |
| 3 | 0.16 | 0.08 | 1.2 | 0.69 |
| 4 | 0.32 | 0.16 | 0.6 | 0.35 |
| 5 | 0.32 | 0.16 | 1.2 | 0.69 |
| 6 | 0.32 | 0.16 | 2.4 | 1.40 |
| 7 | 0.64 | 0.32 | 1.2 | 0.69 |
| 8 | 0.64 | 0.32 | 2.40 | 1.40 |

次に実験条件を示す。時定数 T とむだ時間 L については、Table 2.5 に示す値を用いた。油圧ショベルの旋回においては、加速時と減速時でこれらのパラメータが異なるため、加速時と減速時の時定数とむだ時間はそれぞれ $T_{acc}, T_{dec}, L_{acc}, L_{dec}$ とした。旋回開始位置から目標領域までの角度 D は 60 [deg], 90 [deg], 120 [deg] の 3 条件、目標の大きさ W は 0.5 [m] とし、視野角は一定とした。

被験者は、旋回開始位置から目標領域までの角度 D の 3 条件と、動特性パラメータの 8 条件を組み合わせた計 24 条件について 3 回課題を行い、課題完了までにかかる時間の計測を計測を行った。条件の提示順はランダムとした。3 回の測定結果について、平均時間を算出し、それをその条件における課題完了時間とした。また、被験者ごとの慣れを統一するため、条件が変わるごとに事前練習を 3 回行なってから試験を実施した。被験者は 4 人の健康な成人男性 (Sub.A~D) で広島大学の学生から参加者を募集した。被験者試験に先立ち、ヘルシンキ宣言に基づき、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。

シミュレーションによる試験結果

Fig. 2.20~2.22 に、Sub.A での加速時の時定数 T_{acc} とむだ時間 L_{acc} に対する課題完了時間を示す。Fig. 2.20 は $D = 60$ [deg], Fig. 2.21 は $D = 90$ [deg], Fig. 2.22 は $D = 120$ [deg] につい

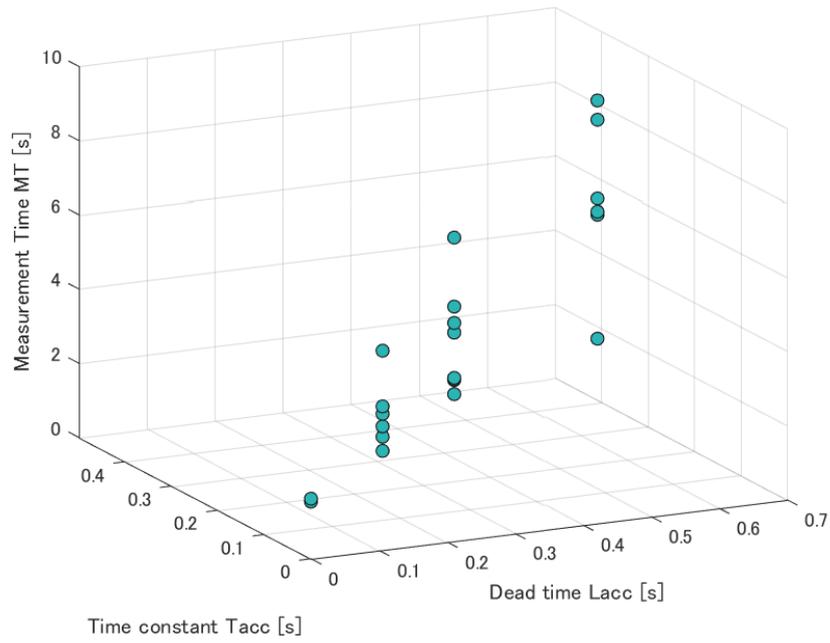


Fig. 2.20: Measurement time when dead time and time constant are changed ($D = 60$ [deg]).

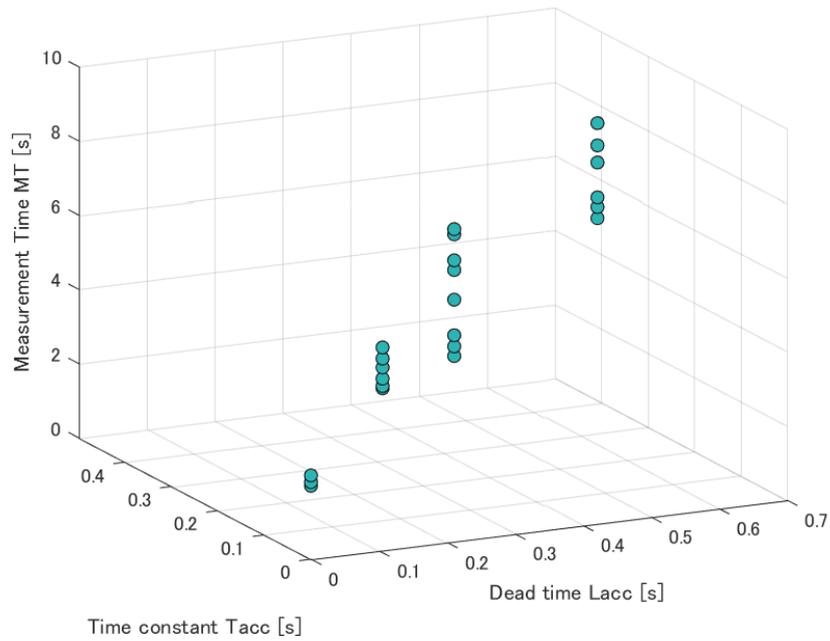


Fig. 2.21: Measurement time when dead time and time constant are changed ($D = 90$ [deg]).

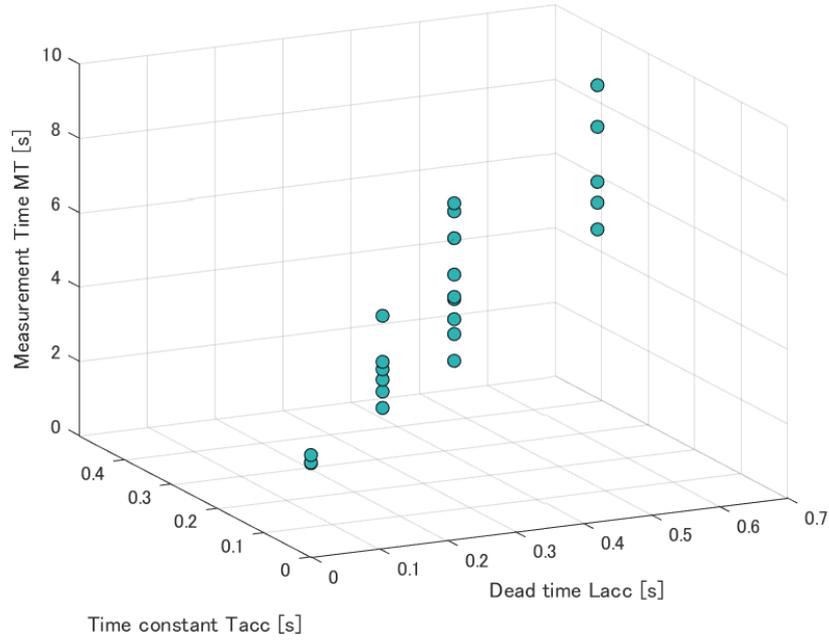


Fig. 2.22: Measurement time when dead time and time constant are changed ($D = 120$ [deg]).

てである。これより，目標距離が同じであれば，むだ時間と時定数が大きくなるほど，課題完了時間が長くなることが確認できた。

2.4.2 動特性を考慮した旋回操作難易度モデルの提案

この結果を元に，動特性を考慮した難易度モデルの提案を行う。むだ時間，時定数が大きくなれば，課題完了時間が長くなるという結果を考慮し，新たな難易度モデルを下記に提案する。

$$ID_{\text{new2}} = \log_2 \left\{ \frac{D}{W} (L_{\text{acc}} + L_{\text{dec}} + T_{\text{acc}} + T_{\text{dec}}) + 1 \right\} \quad (2.9)$$

これは従来の Fitts モデルに $T_{\text{acc}}, T_{\text{dec}}, L_{\text{acc}}, L_{\text{dec}}$ を加えたものとなっている。

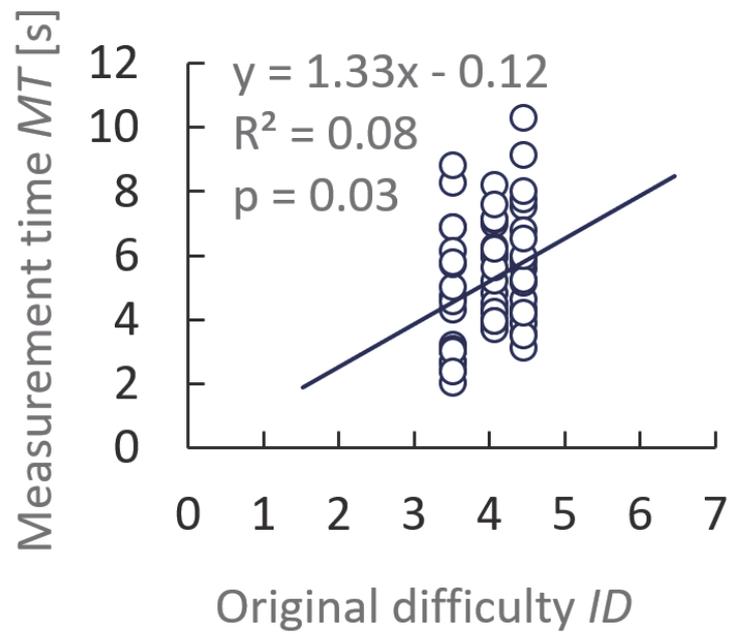


Fig. 2.23: Scatter diagram of original index of difficulty and measurement time (simulation).

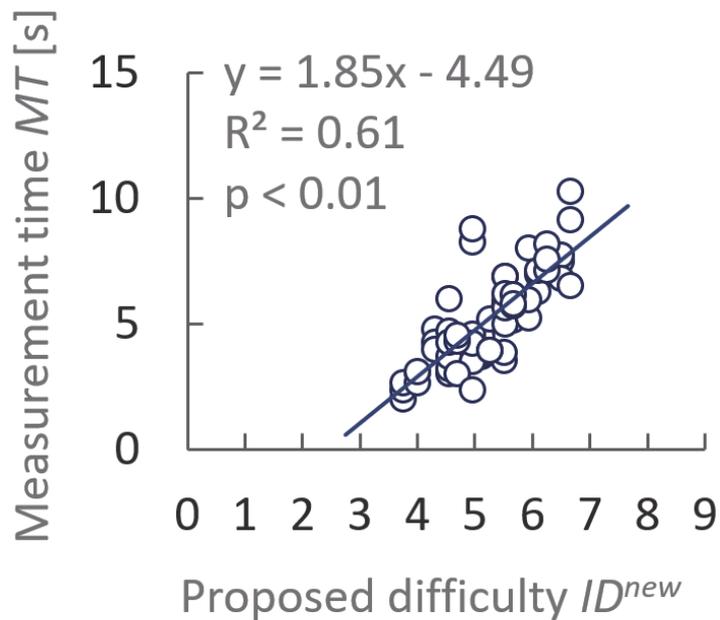


Fig. 2.24: Scatter diagram of proposed index of difficulty and measurement time (simulation).

Table 2.6: Coefficient of determination (All Subjects)

| Subject | A | B | C | D | Mean |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| for ID | 0.076 | 0.078 | 0.073 | 0.063 | 0.073 |
| for ID_{new2} | 0.61 | 0.45 | 0.34 | 0.35 | 0.44 |

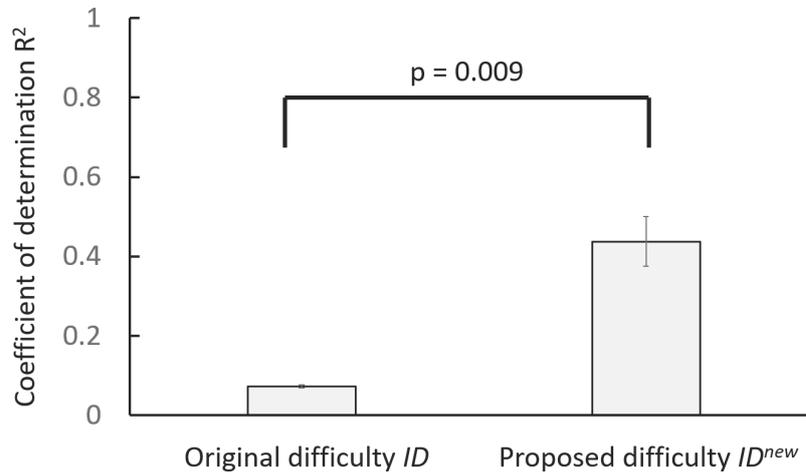


Fig. 2.25: Comparison of coefficient of determination between original and proposed models.

2.4.3 提案モデルの評価

提案した難易度モデルと従来の難易度モデルを比較した。Fig. 2.23, 2.24 に、Sub.A での結果について、難易度モデルと課題完了時間との関係を示す。横軸は難易度指標 ID 、縦軸は課題完了時間 MT を示し、近似直線とその式、決定係数 R^2 と p 値を示している。Fig. 2.23 は従来の Fitts モデルについて、Fig. 2.24 は提案した難易度モデルについてである。これらより、Fitts モデルでの決定係数が 0.08 であったのに対し、提案モデルでは 0.61 と上昇した。また、全被験者の決定係数とその平均について、Table 2.6, Fig. 2.25 に示す。全被験者において決定係数の上昇が確認された。さらに従来難易度と提案難易度の決定係数の平均値を Student's t -test を用いて比較したところ $p = 0.009$ となり統計的に優位な差が確認できた。これらの結果より、提案モデルの方が旋回難易度をより正確に表していることがわかった。

2.4.4 考察

提案の難易度モデルは、従来の難易度モデルと比較し、決定係数が上昇した。つまり、動特性を持つ油圧ショベルに対して、旋回操作の難易度をより正確に表しているモデルであると言える。ただし、シミュレータ試験のみからの結果であり、実機での確認検証が必要である。また、決定係数は上昇したが、0.44 と前節における提案モデルと比較し低い値である。本節においては、加速時と減速時の時定数、むだ時間を足し合わせたものを追加したが、それぞれのパラメータの影響度は異なる可能性があるため、それぞれに係数をかけることで、より決定係数が上昇する可能性があると考えられる。

2.5 結言

本章では、油圧ショベルの旋回動作の操作性を評価する指標を提案し評価した。旋回操作により目標位置へバケットを停止させる動作をポインティング動作とみなし、旋回操作難易度モデルの構築を試みた。従来のポインティング動作の難易度モデルとして広く用いられている Fitts の法則では、油圧ショベルまたは遠隔操作油圧ショベルにおいて操作性に影響すると考えられる視野角と動特性は考慮されていない。よって、それぞれを考慮した新たな難易度モデルを検討した。視野角については、まず旋回動作を模擬したシミュレータを構築し、それを用いて、被験者による旋回課題試験を行った。その結果、視野角が狭くなるほど、課題完了までにかかる時間が長くなることが確認された。この結果より、従来の難易度モデルに対し、視野角を追加した新たな難易度モデルを提案した。試験結果を評価したところ、従来のモデルと比較し、提案モデルの方が決定係数が高く、より正確に旋回操作難易度を表していることが確認された。さらに、実際の油圧ショベルを用いた被験者試験を行い、シミュレーションで得られた結果と同様の結果を得た。

また、動特性については、油圧ショベルの旋回動作を一次遅れ+むだ時間系であると仮定

し、シミュレータを用いた被験者による旋回課題試験を行った。その結果、時定数、むだ時間が大きくなるほど、課題完了までにかかる時間が長くなることが確認された。この結果より、従来の難易度モデルに対し、時定数とむだ時間を追加した新たな難易度モデルを提案した。試験結果を評価したところ、従来モデルと比較し、提案モデルの方が決定係数が高く、より正確に旋回操作難易度を表していることが確認された。

提案したモデルにより、油圧ショベルの旋回操作性が、実際の機械を用いずに評価できるため、運転席の設計や遠隔操作油圧ショベルにおけるモニタの大きさ等の設計に有用であると考えられる。

第3章 遠隔操作油圧ショベルにおける掘削時の機体不安定度フィードバック

3.1 緒言

主に遅延や作業現場の状況がわかりづらいことが原因で、遠隔操作油圧ショベルの作業効率は搭乗操作と比較して低下する。加えて、機械の姿勢や作業対象の状態などの情報が、実機搭乗に比べ受け取りづらい [49] ため、転倒などの危険がある。特に掘削時には、掘削物から受ける反力が大きくなると、アタッチメントの姿勢によっては機体側が動き出し、不整地や高台での作業の場合は転倒や転落のリスクが高まるため、このような状態を起こさずに掘削を行うことが望ましい。

Sakaida らは、熟練オペレータは、掘削作業において、バケットの姿勢の変化に応じてバケットへの負荷をコントロールしながら操作していることを示唆している [50]。このことより、実機搭乗での掘削時には、オペレータは運転席で感じる機械のわずかな傾きの変化や振動等から、バケットにかかる負荷を推測し、その時のアタッチメントの姿勢に応じて、機体が動き出しはじめる負荷に対する現在の負荷の余裕を見積り、それが少ない場合には操作を変更することで機体側を動かさずに作業を行っていると考えられる。この仮定に基づけば、直接視界のないモニタ映像等を使った遠隔操作油圧ショベルでは、機械の傾きに関する情報はモニタ映像からしか受け取ることができないため、オペレータはその余裕を推測することが困難となり、転倒や転落のリスクが高い状態となっていると考えられる。

このようなリスクを軽減するため、実機搭乗時に感じることができるバケット負荷に関す

る情報を、オペレータにフィードバックする方法を検討する必要がある、関連する研究が行われている。例えば、モーションベースを用いて機体の傾きをフィードバックする研究がある [51]。機械の動きを感じることができるため、バケットにかかる負荷を推測することが期待できる。しかし、わずかな傾きや振動を再現するには、高価なアクチュエータ、制御装置が必要になるという問題がある。一方、掘削反力をフィードバックするために力覚フィードバックの導入も研究されている。例えば、Parker らや Lawrence らは油圧ショベルに対して力覚フィードバック操作ジョイスティックを搭載した [52, 53]。Ahn, Li, Truong らは遠隔操作油圧ショベルに対して力覚フィードバック操作ジョイスティックを開発した [54]-[56]。Gong ら、Hou と Zhao はフォークアタッチメントについて力覚フィードバックシステムを開発した [57, 58]。Huang らは、力覚フィードバックと視覚フィードバックを組み合わせた操作システムによりフォークアタッチメントでつかんだ物体の硬さの識別を可能にした [59]。またハプティックフィードバックを用いた研究も行われている [60]-[62]。しかし、機体が動き出しはじめる掘削反力に対する余裕度はアタッチメント姿勢によっても変化するため、掘削反力情報のみからその余裕度を推測するのは容易ではない。加えて、力覚やハプティックフィードバックを搭載することは、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータにとっては、操作感が変わってしまう可能性があるという問題がある。この問題に対して、手動操作の感覚を維持したまま制御によるアシストを実施した研究 [63] 等があるが、理想軌道のない掘削作業に適用するのは困難である。よって本研究では、オペレータへの情報提示を追加することにより、操作感を変えずに、オペレータの操作を変更させることを目指した。

また安全性に関して、静的補償 ZMP を用いた転倒防止制御 [64] や、ZMP の予測による転倒防止制御 [65] 等の研究がされているが、掘削を除くアタッチメント動作時を対象にしており、掘削作業時の安全性を高める研究は筆者の知る限りない。

そこで、アタッチメント姿勢に応じて、機体が動き出しはじめる掘削反力に対して現在の掘削反力がどの程度余裕があるかを直接オペレータへ提示することを考えた。これにより安全

な掘削作業が可能となることが期待される。本章ではこの指標としてアタッチメント姿勢と掘削反力から導かれる機体不安定度を提案する。また、機体不安定度をオペレータへフィードバックする手法として、どの程度余裕があるかが直感的に把握しやすいと考えメータによる視覚的な提示手法を提案する。

本章では、この機体不安定度フィードバックによって、遠隔操作油圧ショベルを用いた掘削作業時の安全性が向上するか、また作業パフォーマンスがどう変化するかを検証する。まず、提案する機体不安定度の定義について述べる。次に、機体不安定度フィードバックの効果検証のため、構築した掘削動作シミュレータを用いた検証を行う。最後に提案した機体不安定度の効果を評価、考察する。

3.2 機体不安定度の定義

油圧ショベルはブーム、アーム、バケットから成るアタッチメントを動作させることで掘削作業を行う。掘削対象から受ける反力が大きくなると、アタッチメントの姿勢によっては機体側が動き始める。安全な操作のためには、このような状態を起こさないように掘削を行うことが望ましい。よって、機体側が動き始めるまでの機体の余裕度を表す機体不安定度を提示することを提案する。本論文では下部走行体後端を回転中心にして浮き上がる挙動 (Fig. 3.1) と、前方に引きずられる挙動 (Fig. 3.2) の2つについて不安定度を下記のように定義し、この2つの不安定度のうちどちらか大きい方の値を機体不安定度とした。また、本研究においては機械が水平な地面に設置されているものとし、機械左右方向の動きは考慮に入れず、2次元平面での動きとして取り扱った。

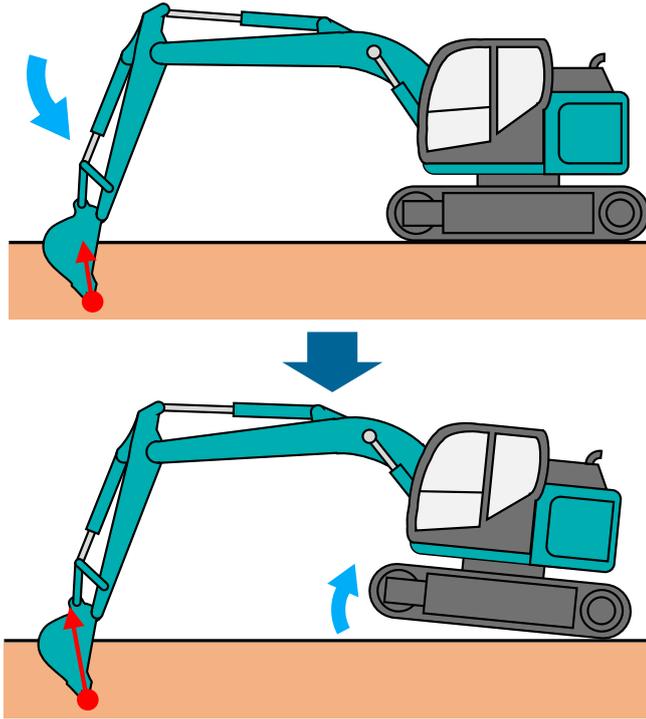


Fig. 3.1: Example of upward machine behavior when digging reaction force is large.

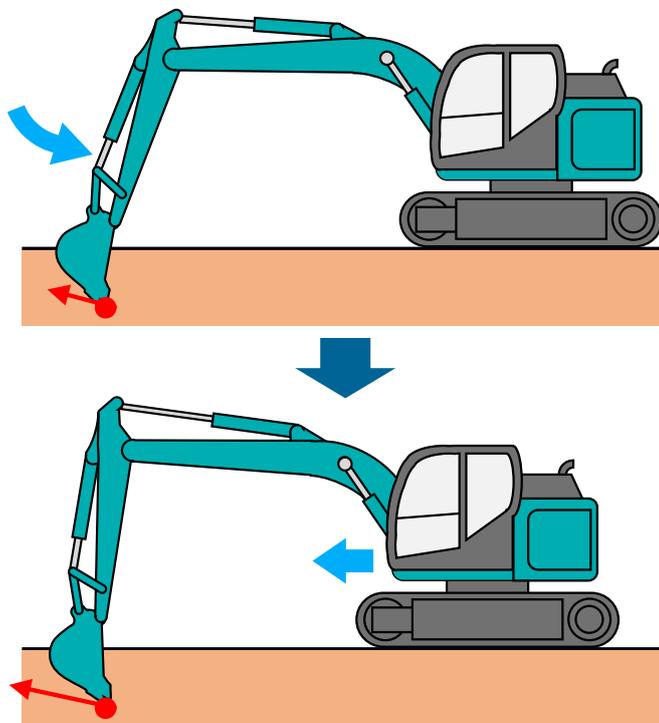


Fig. 3.2: Example of forward machine behavior when digging reaction force is large.

3.2.1 上方向不安定度

Fig. 3.3 のように、下部走行体接地面後端 O を回転中心としたモーメントを考えると、機体重量による左まわりのモーメント M_m は次式で表される。

$$M_m = l_g \cdot mg \cos \theta_g \quad (3.1)$$

ここで、 m は機械重量 (アタッチメント重量除く)、 l_g は回転中心 O から機械重量重心 G までの距離、 θ_g は地面と l_g のなす角、 g は重力加速度である。

また、掘削時にバケットに発生する掘削反力による右まわりのモーメント M_f は次式で表される。

$$M_f = l_b \cdot F \sin (\theta_b - \theta_f) \quad (3.2)$$

ここで、 F は掘削反力、 θ_f は掘削反力方向と地面とのなす角、 l_b は回転中心 O から掘削反力作用点 P までの距離、 θ_b は地面と l_b とのなす角である。

(3.1)、(3.2) より、機体が浮きあがる条件は $M_f > M_m$ となる。以上より、上方向の不安定度 I_{up} [%] を、次式のように定義した。

$$I_{up} = \frac{M_f}{M_m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

I_{up} が 100 [%] を超えると、機体が浮き上がる挙動が発生する。

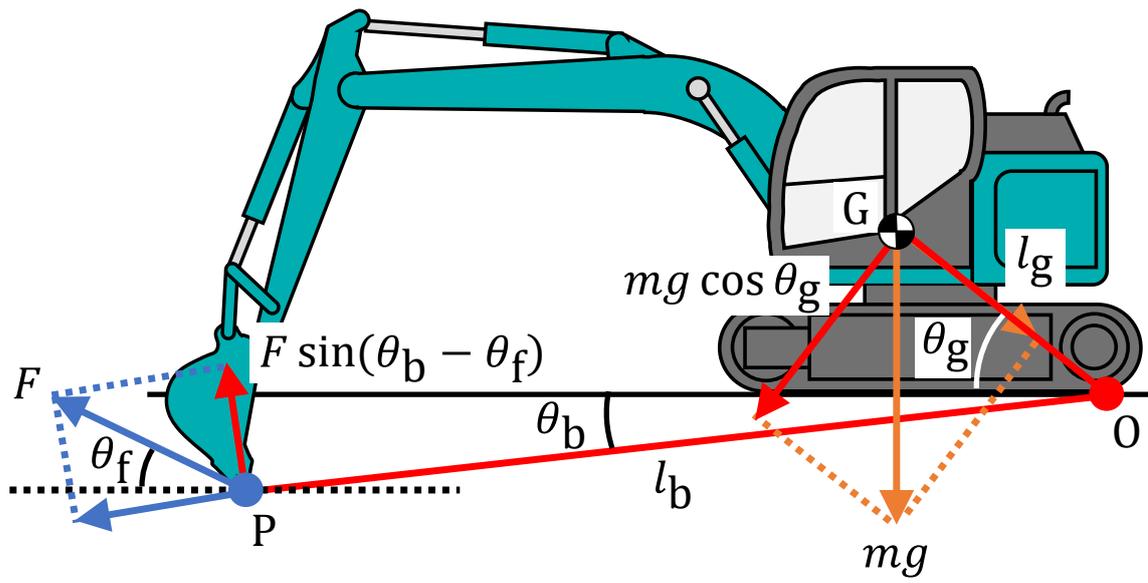


Fig. 3.3: Moments of force around rear end of lower traveling body ground surface.

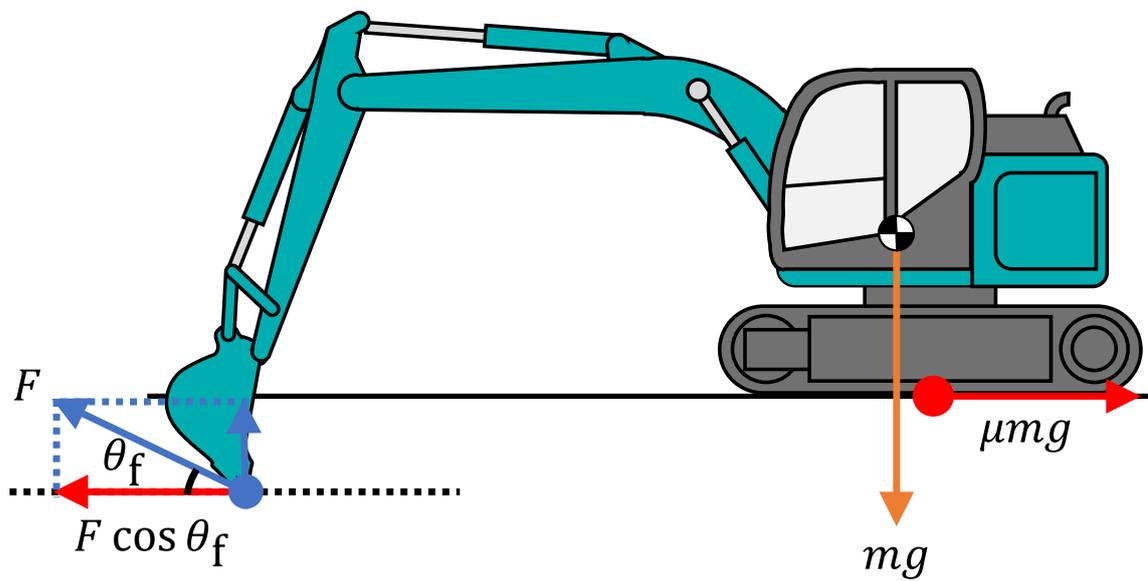


Fig. 3.4: Horizontal forces.

3.2.2 前方向不安定度

Fig. 3.4 のように、水平方向の力を考えると、最大摩擦静止力 F_m は次式で表される。

$$F_m = \mu mg \quad (3.4)$$

ここで μ は機械と地面の接触面での静摩擦係数である。

また、掘削反力により生じる力 F_b は次式で表される。

$$F_b = F \cos \theta_f \quad (3.5)$$

(3.4),(3.5) より、機体が前方に引きずられる条件は $F_b > F_m$ となる。以上より、前方向の不安定度 I_{for} [%] を、次式のように定義した。

$$I_{\text{for}} = \frac{F_b}{F_m} \cdot 100 \quad (3.6)$$

I_{for} が 100 [%] を超えると、機体が前方に引きずられる挙動が発生する。

3.2.3 機体不安定度

(3.3),(3.6) より、機体不安定度 I [%] を下記のように定義した。

$$I = \begin{cases} I_{\text{up}} & (I_{\text{up}} > I_{\text{for}}) \\ I_{\text{for}} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.7)$$

これは機体が浮き上がる挙動、機体が前方に引きずられる挙動のどちらかが発生するまでどの程度余裕があるかの指標となる。

3.3 掘削作業シミュレータを用いた検証

機体不安定度をフィードバックした際の効果を検証するため、まずシミュレータを用いた評価を実施した。掘削シミュレーションについての従来研究については、地形変形をメッシュモデルにより再現したもの [66, 67] 等があるが、計算コストが高くなるため、本研究の目的に従い、掘削動作に特化した類似研究と比較して計算コストの低いシミュレータを新たに開発し、それを用いて検証を行った。

3.3.1 掘削作業シミュレータの構築

Fig. 3.5 にシミュレータ外観, Fig. 3.6 にシミュレータ構成図を示す。2本のジョイスティック, モニタ, 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 90 [deg] 旋回させたコベルコ建機製 13t 級油圧ショベル SK135SR-3 を模擬した 3D モデルを水平に配置し, 掘削動作を再現できるようにした。モニタに映る映像は実機運転席からの視点となるようにし, 操作ジョイスティックは実機と同様のものを用い, ISO 規格に従った操作方法 (Fig. 3.7) とした。通常の掘削操作時において用いられない旋回動作については再現していない。

アタッチメント動作

実機と同様にジョイスティックからの入力量に従ってアタッチメントの動作角速度が動作するようにした。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。そこで本研究では, アタッチメントの動特性 $G(s)$ を下記のように一時遅れ+むだ時間系で設定した。

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_s} e^{-Ls} \quad (3.8)$$

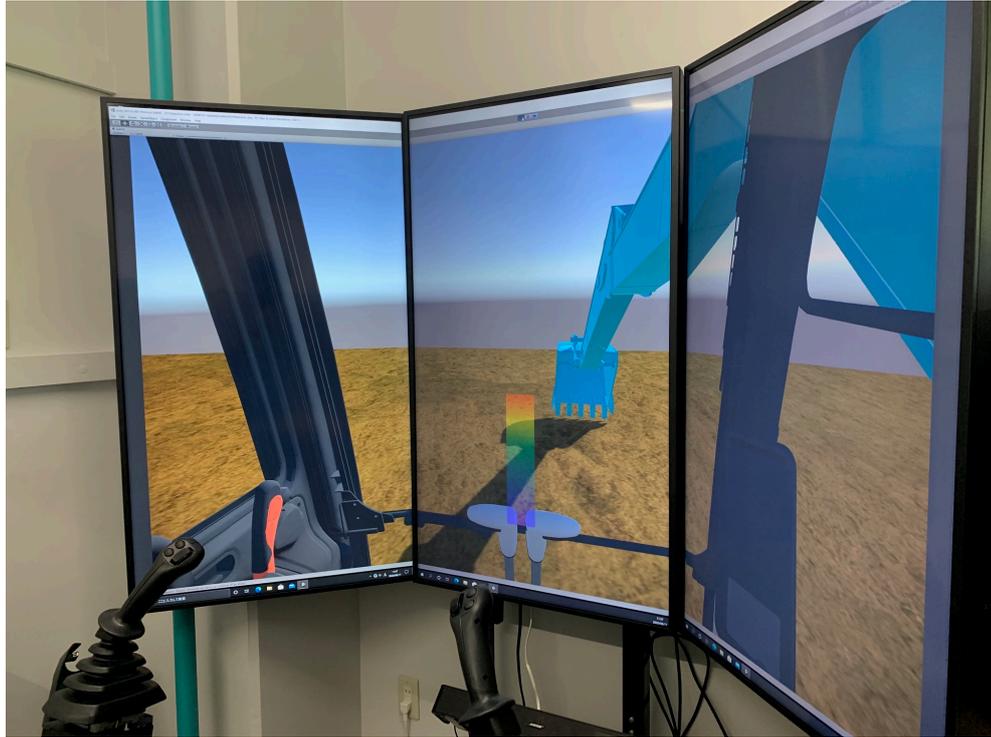


Fig. 3.5: Excavator simulator appearance.

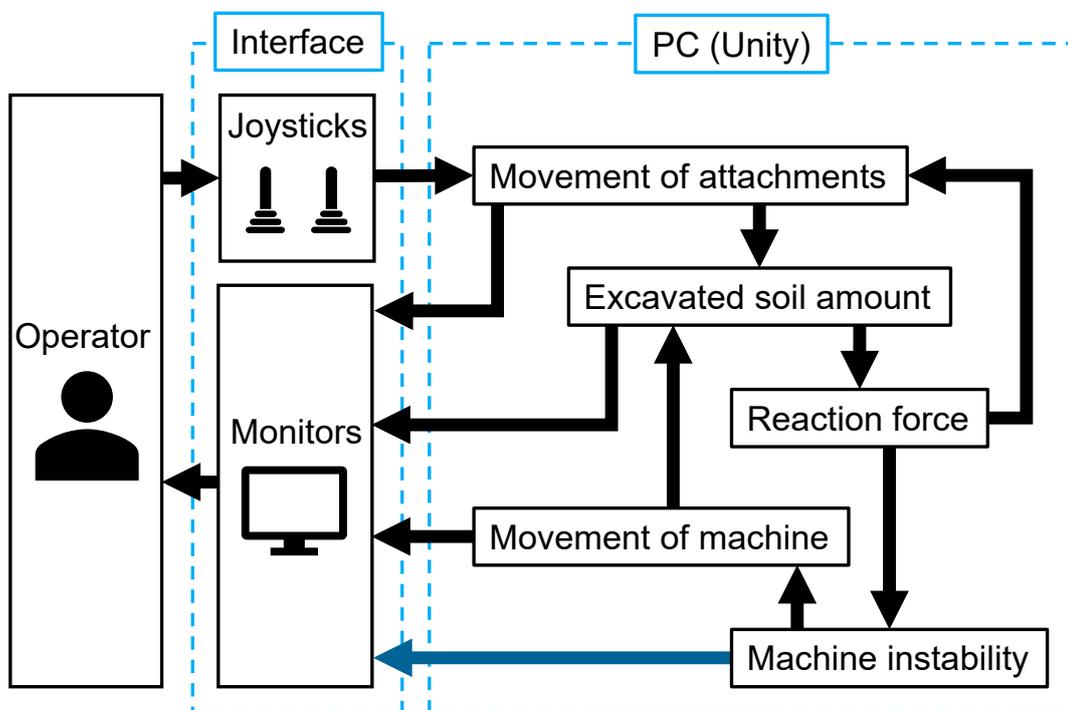


Fig. 3.6: Schematic configuration of excavator simulator.

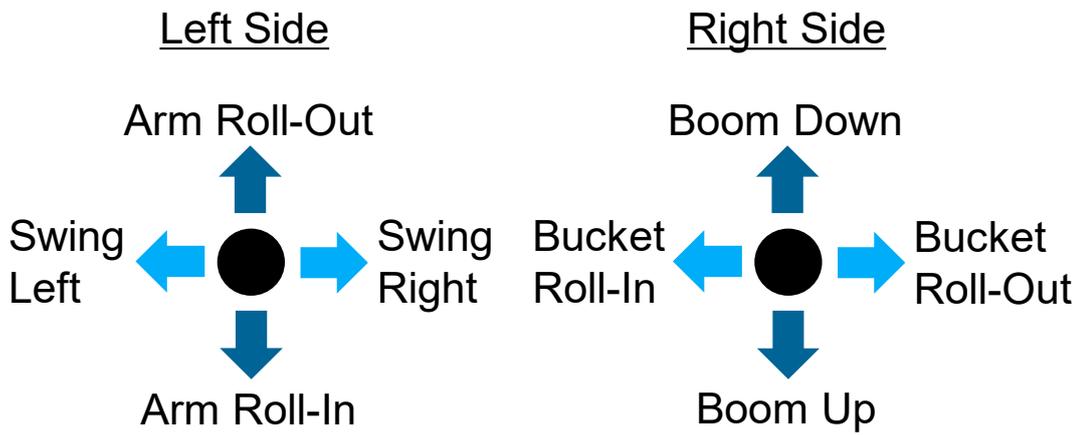


Fig. 3.7: Excavator control pattern (ISO standard).

Table 3.1: Values for Transfer Function Parameter

| Bucket Edge Position | Above the Ground | | | Below the Ground | | |
|------------------------|------------------|------|-----|------------------|-------|-----|
| | K | T | L | K | T | L |
| Boom Up (Acceleration) | 0.2 | 0.35 | 0.1 | 0.2 | 0.18 | 0.1 |
| Boom Up (Deceleration) | 0.1 | 0.35 | 0.1 | 0.2 | 0.18 | 0.1 |
| Boom Down | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.18 | 0.1 |
| Arm | 0.2 | 0.56 | 0.1 | 0.2 | K_A | 0.1 |
| Bucket | 0.08 | 1.1 | 0.1 | 0.08 | 0.7 | 0.1 |

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。一般的な13t級油圧ショベルの動きに近似させるため、それぞれTable 3.1に示すように設定した。

油圧ショベルは、エンジンの出力で油圧ポンプが駆動され、それにより吐出された作動油が油圧シリンダを伸縮させることでアタッチメントが駆動される。アタッチメントへの負荷が高くなると、エンジンの出力を超えてエンジンストールが発生することを抑制するために、油圧ポンプの吐出油量が少なくなる制御が行われているため、アタッチメント動作速度が下がる。よって、再現性を高めるために、バケット先端が地面より上にある(掘削反力が無い)場合と、下にある(掘削反力がかかる)場合でパラメータを変更した。さらに、掘削時にはアーム動作の割合が多いため、バケット先端が地面より下にある場合のアーム動作のゲイン K_A については掘削反力に応じて変更されるようにした。本研究では掘削反力が増加する

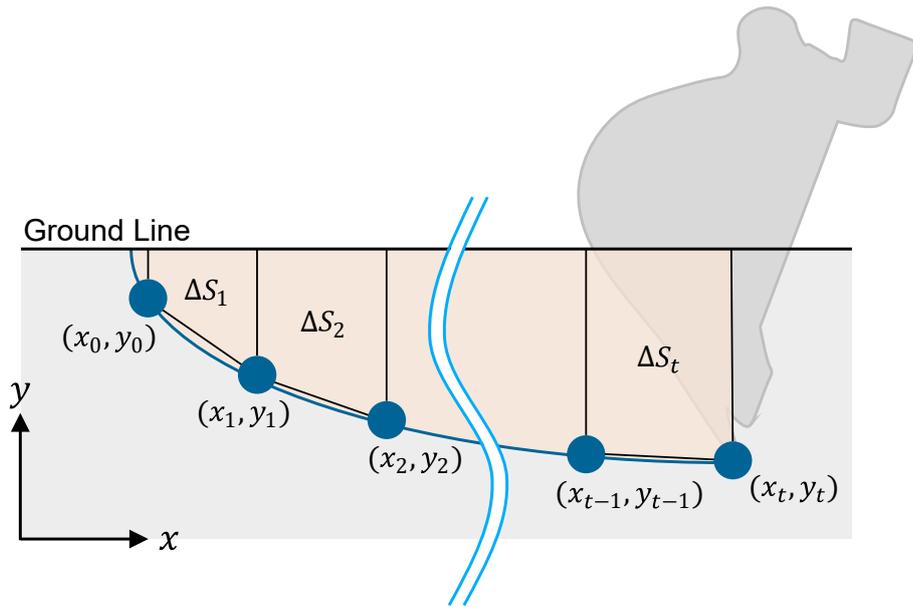


Fig. 3.8: Excavated soil volume calculation.

に応じて動作角速度が線形に減少すると仮定し、 K_A を下記とした。

$$K_A = \begin{cases} K_{Amax} \cdot \frac{F_{max} - F}{F_{max}} & (F < F_{max}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.9)$$

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。本研究では K_{Amax} を 0.56、 F_{max} を 55 [kN] とした。

掘削土量計算と表示方法

掘削反力の計算、またシミュレータ試験の課題における目標を設定するため、バケット先端の軌跡から掘削土量を計算し、バケット内へ掘削土量が表示されるシステムを適用した。掘削土量の計算はバケット先端が通る軌跡と地面とで囲まれる面積を用いて行う。Fig. 3.8 のように任意の時刻 t におけるバケット先端の位置を (x_t, y_t) とすると、バケット通過面積 $S(t)$ は

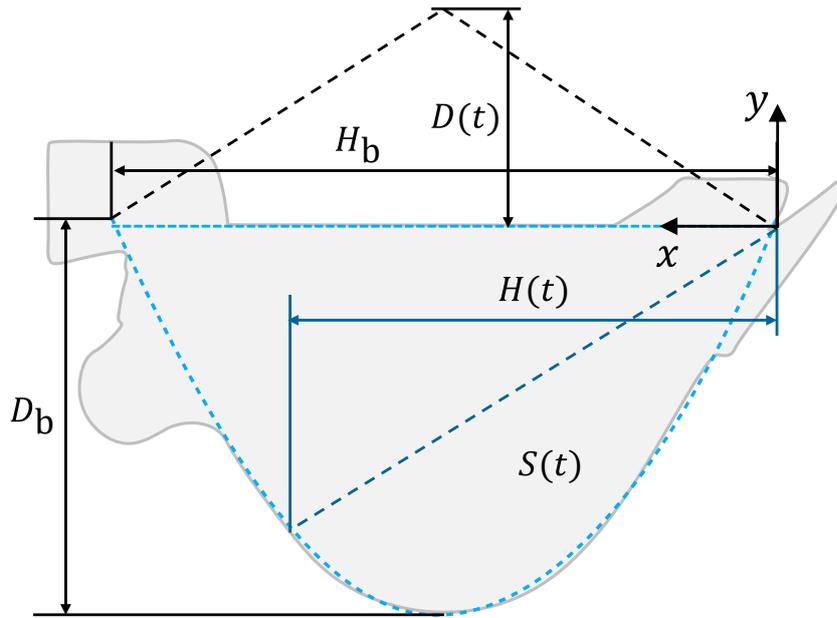


Fig. 3.9: Excavated soil volume calculation.

次式のように表される.

$$S(t) = \sum_{i=1}^t \Delta S_i \quad (3.10)$$

ただし

$$\Delta S_i = \begin{cases} \frac{1}{2}|x_i - x_{i-1}|(|y_i| + |y_{i-1}|) & (x_i > x_{i-1} \wedge y_i < 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.11)$$

実際の掘削作業において、掘削された土のすべてがバケット内部へ入るわけではないため、掘削土量はバケットが掘削対象を通過する体積よりも少なくなる。通過体積に対する掘削土量の比を k_v 、バケット幅を一定とし W_b とすると、掘削土量 $V(t)$ は次式で表される。

$$V(t) = S(t)W_b k_v \quad (3.12)$$

次にバケット内へ掘削土量が表示されるシステムについて説明する。バケット断面は次のように二次関数で近似した。バケット開口を H_b 、バケット深さを D_b とすると、Fig. 3.9 の $x-y$

座標系において次式で表される.

$$y = \frac{4D_b}{H_b^2} \left(x - \frac{H_b}{2}\right) - D_b \quad (3.13)$$

これより, 掘削土量に対するバケット土量高さ $H(t)$ は, Fig.3.9 のように掘削された土が積みあがっていくと仮定すると, バケットが擦切り一杯となるまでにおいて, 次式で表される.

$$H(t) = \sqrt[3]{\frac{3H_b^2 V(t)}{2D_b W_b}} \quad (3.14)$$

バケットが擦切り一杯以降は, Fig.3.9 のように四角錐形型に積みあがっていくこととし, その表示高さ $D(t)$ を次式とした.

$$D(t) = \frac{3}{W_b H_b} \left(V(t) - \frac{2}{3} D_b H_b W_b\right) \quad (3.15)$$

掘削反力

上記で算出したバケット土量とアタッチメント姿勢を用いてバケットにかかる掘削反力を計算する. Osumi ら [68] や Meng ら [69] の研究において, 受働土圧を用いた掘削反力の推定手法が提案されている. 受働土圧とは土砂を支えている擁壁に発生する土圧のことであり, Coulomb と Rankine によって理論式が提案されている. 本研究では, Rankine の土圧理論式 [70] を用いて, 下記のように掘削反力の計算を行った. Rankine の土圧理論による受働土圧 F_p の理論式を下記に示す.

$$F_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.16)$$

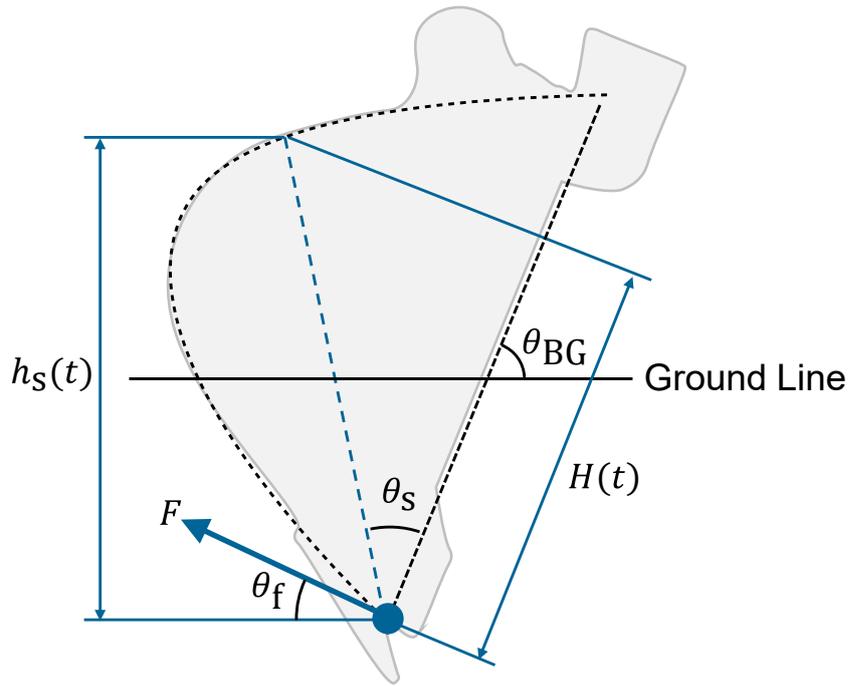


Fig. 3.10: Digging reaction force calculation.

ここで、 h は擁壁高さ、 γ は単位体積重量、 φ は内部摩擦角であり、 γ 、 φ は土質によって変化するパラメータである。本研究では擁壁高さを、Fig. 3.10のように地面对して垂直方向のバケット内部土量高さ $h_s(t)$ から決定した。バケット開口面とバケット内土面との角度を $\theta_s(t)$ とすると

$$\theta_s(t) = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{D_b - \frac{4D_b}{H_b}(H(t) - \frac{H_b}{2})^2}{H(t)} & (H(t) < H_b) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.17)$$

となり、バケット開口面と地面との角度を θ_{BG} とすると $h_s(t)$ は次式で表される。

$$h_s(t) = \frac{H(t)}{\cos \theta_s(t)} \sin(\theta_s + \theta_{BG}) \quad (3.18)$$

実際の掘削作業において、バケット内部の土はある程度ほぐれて存在していると考え、 $h_s(t)$

に対する擁壁として機能する擁壁高さの比を k_s とし、掘削反力 $F(t)$ を以下の式とした。

$$F(t) = \frac{1}{2} \gamma h_s^2(t) k_s \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (3.19)$$

本研究では簡略化のために、掘削反力はバケット先端にかかることとし、またその角度はバケット開口面から 90 [deg] 方向とした。

機体挙動

機体の浮き上がり、前方への引きずられ挙動を再現するため、計算された機体不安定度が 100% を超えている状態では、入力によるアタッチメント動作角度から計算されたバケット先端位置の変化量と逆に機体を移動、回転させることとした。これにより、機体不安定度が 100% を超えている状態においては、バケット先端の絶対位置は変化せず、機体角度、位置が変更される。

3.3.2 被験者試験

機体不安定度を提示した場合の効果を確認するため、上記シミュレータを用いた被験者試験を実施した。

試験条件と方案

条件は機体不安定度の提示がある場合と無い場合の 2 つで、それぞれの場合において、土質パラメータ 3 条件を 10 回ずつ、計 30 回の掘削作業を被験者に実施させた。実際の掘削作業において、掘削前に掘削面より下の状態を把握することは困難である。そのような状態を模擬するため、土質パラメータ条件の試行順はランダムとした。土質パラメータ条件を Table 3.2 に示す。これらは、Look により定義された “Type: Cohesionless gravels”, “Soil description:

Table 3.2: Values for Soil Parameter

| Soil Pattern | γ [kN/m ³] | φ [deg] |
|--------------|-------------------------------|-----------------|
| 1 | 23 | 45 |
| 2 | 22 | 44 |
| 3 | 21 | 43 |

Very dense”のパラメータ [71] を参照し、それぞれで難易度の差が発生するように決定した。(3.19) からわかるように土質 1,2,3 の順に擁壁高さに対する掘削反力は低くなるため容易な試行となる。 $\mu = 0.35$, $k_v = 0.625$, $k_s = 0.667$ とした。

試験課題は、バケット満杯を想定した規定の土量を掘削することとした。1 掘削の土量はバケット容量 0.5 m³ の 2 割増を満杯と想定し、0.6 m³ を目標掘削土量とした。掘削土量が目標掘削土量へ到達すると掘削土量表示の色が緑色になるようにしており、被験者へ目標掘削土量に達したことを知らせるようにした。ただし、目標掘削土量の設定は、課題間・被験者間の掘削土量の差異の縮小が目的であり、目標掘削土量へ到達しない場合の試行についてデータの除外等を行っていない。

機体角度、位置、機体不安定度、掘削土量を計測した。課題完了時間は、初期状態からいずれかのジョイスティック操作が入力された時を開始とし、掘削後バケット先端を 1.0m 以上持ち上げた時点で終了とした。

被験者は油圧ショベルの操縦経験のある 28~54 歳の健康な成人男性 10 名で、試験の実施順は試行順の影響をなくすため、5 名は機体不安定度の提示あり条件を先に実施し、残りの 5 名は提示無し条件を先に実施した。どの被験者も提示無し条件、土質 2 の条件で練習を行ってから試験を実施した。被験者へは目標掘削土量までなるべく早く掘削を行うように指示をした。また、機体不安定度提示あり条件において表示されるメータは、100%に達すると機体が動きだす情報であることは被験者へ事前に伝えた。実験に先立ち、ヘルシンキ宣言に基づき、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。

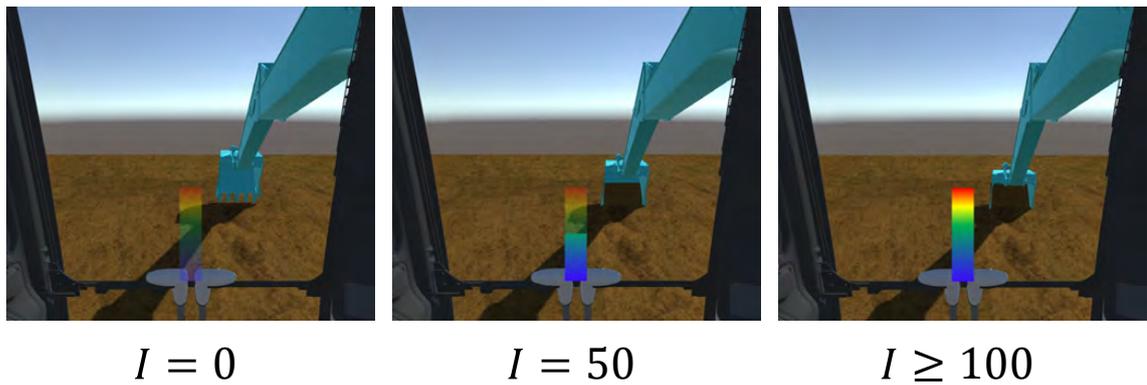


Fig. 3.11: Machine instability meter for simulator experiments.

機体不安定度提示方法

機体不安定度の提示には Fig. 3.11 のようなメータを用いた。メータ位置はバケット左横の位置に固定とし、機体不安定度が 0% の状態ではすべて半透明で表示され、その大きさに従って下側から実像で表示された。閾値を 100% とし、機体不安定度が閾値以上の場合はメータすべてが実像で表示されるようにした。

3.3.3 試験結果

試験結果について安全性と生産性の観点で評価を行った。各指標は各提示条件および土質パターンにおける被験者ごとの平均値についてである。図中の “Without F/B” が機体不安定度の提示がない場合，“With Machine Instability F/B” が機体不安定度の提示がある場合を意味する。有意水準は 5% とした。

Fig. 3.12 に機体傾き角度の 1 回の課題中の最大値の平均を示す。Student’s *t*-test を行った結果、Soil Pattern 1 ($t(9) = 2.817, p = .010$), Soil Pattern 2 ($t(9) = 2.058, p = .035$) の場合において機体不安定度提示無し条件より提示あり条件の方が有意に低く、Soil Pattern 3 ($t(9) = 0.948, p = .184$) では条件間で有意な減少は確認されなかった。

Fig. 3.13 に前方への引きずりによる水平移動量の 1 回の課題中の最大値の平均を示す。Stu-

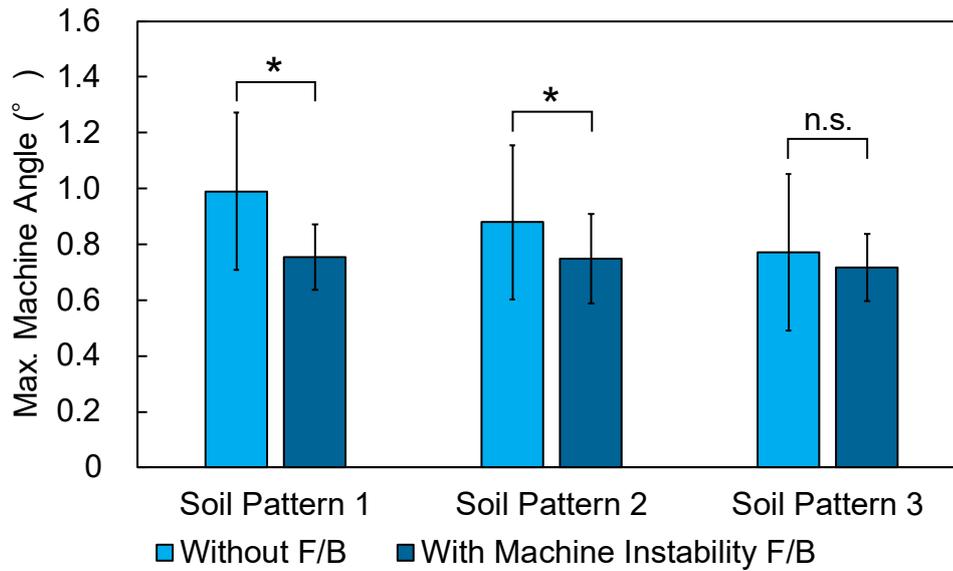


Fig. 3.12: Differences in mean values of maximum machine angle for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences ($*p < .05$). Hypothesis for student's t -test is value of "Without F/B" greater than value of "With Machine Instability F/B."

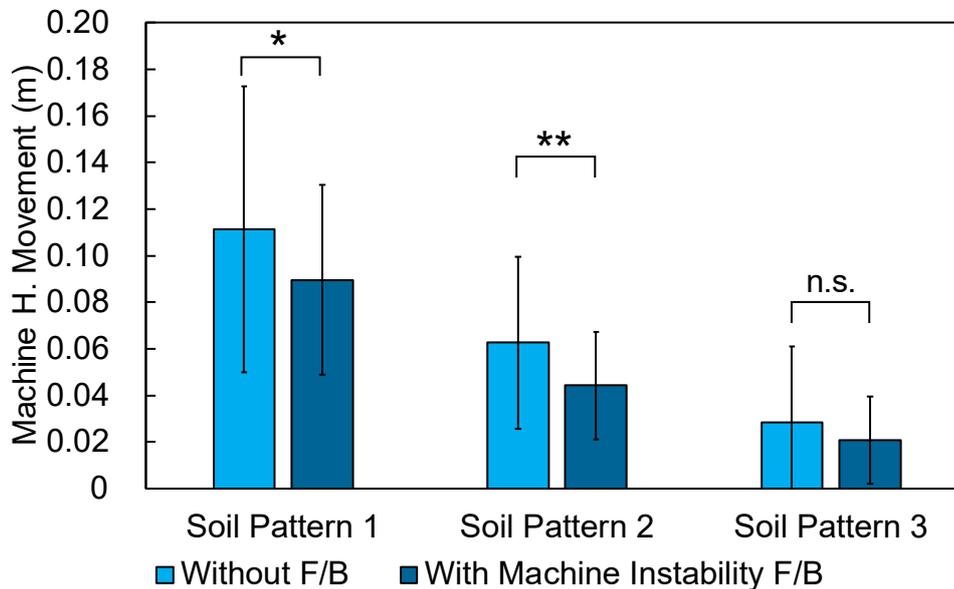


Fig. 3.13: Differences in mean values of horizontal machine movement for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences ($*p < .05$, $**p < .01$). Hypothesis for student's t -test is value of "Without F/B" greater than value of "With Machine Instability F/B."

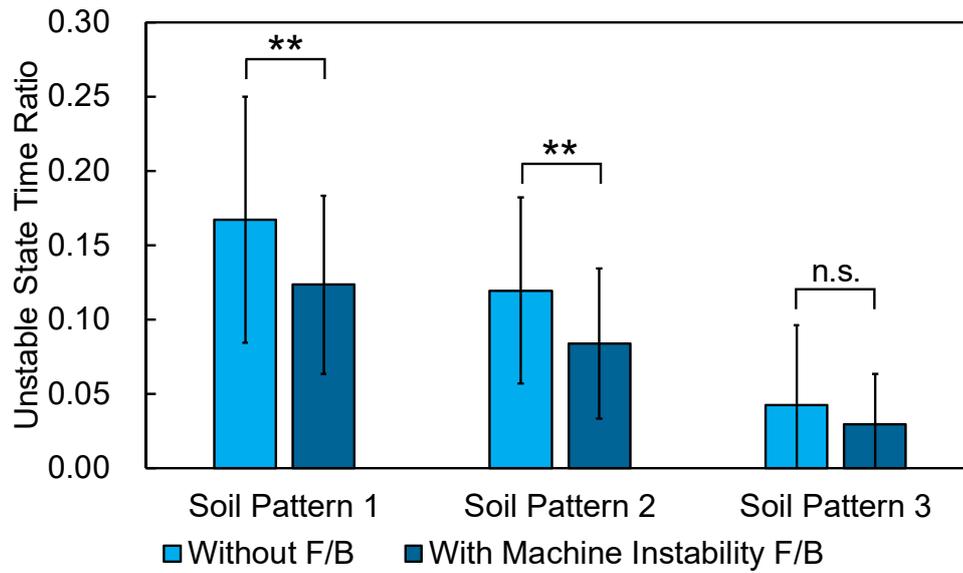


Fig. 3.14: Differences in mean values of unstable state time ratio for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences (** $p < .01$). Hypothesis for student's t -test is value of "Without F/B" greater than value of "With Machine Instability F/B."

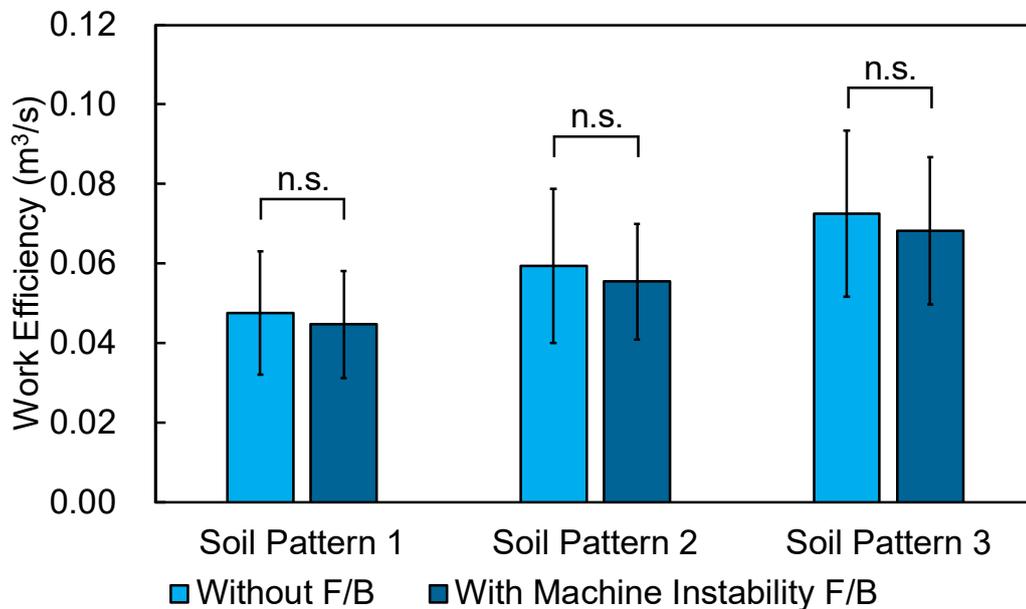


Fig. 3.15: Differences in mean values of work efficiency for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation.

dent's *t*-test を行った結果, Soil Pattern 1 ($t(9) = 2.001, p = .038$), Soil Pattern 2 ($t(9) = 2.856, p = .009$) の場合において機体不安定度提示無し条件より提示あり条件の方が有意に低く, Soil Pattern 3 ($t(9) = 0.874, p = .202$) では条件間で有意な減少は確認されなかった.

Fig. 3.14 は, 機体不安定度が 100%を超えている時間を課題完了時間で割った不安定状態時間比の平均を示している. 縦軸値が小さくなるほど機体の動きが発生している状態での作業時間が短いことを示す. Student's *t*-test を行った結果, Soil Pattern 1 ($t(9) = 3.598, p = .003$), Soil Pattern 2 ($t(9) = 2.905, p = .009$) の場合において機体不安定度提示無し条件より提示あり条件の方が有意に低く, Soil Pattern 3 ($t(9) = 1.322, p = .109$) では条件間で有意な減少は確認されなかった.

生産性について解析を行った. 掘削土量を課題完了時間で割った作業効率の平均を Fig. 3.15 に示す. Student's *t*-test を行った結果, Soil Pattern 1 ($t(9) = 1.577, p = .149$), Soil Pattern 2 ($t(9) = 1.725, p = .119$), Soil Pattern 3 ($t(9) = 1.973, p = .080$) のいずれの場合においても条件間で有意な差は確認されなかった.

3.3.4 考察

最大機体角度, 最大水平移動量, 不安定状態時間比について Soil Pattern 3 以外では有意な減少が確認されたことから, 機体不安定度を提示することで, 機体の移動量が減少し, かつ, 機体側が動いている状態である時間が減少したと言える. Soil Pattern 3 は最も容易な試行条件であったため, Fig. 3.14 からわかるように機体不安定度が 100%を超えることが少なかったことが原因で差異が出なかったと推測される. また生産性については, どの条件においても作業効率の有意な差は見られなかったことから, 機体不安定度提示が生産性を低下させることはなかったと考えられる. 以上より, 機体不安定度を提示することで生産性を落とさずに, より安全に掘削作業を行うことができる可能性が示された. また, 試験実施後に「機体不安定度が 100%以上となった場合, どの程度 100%を越えているかが確認できないため, 操

作をどれだけ変更すればよいかわからない」というコメントがあった。フィードバック手法に関しては、視覚提示以外の方法も含めて検討する必要がある。

3.4 結言

本章では、遠隔操作油圧ショベルでの掘削作業における安全性を高めるため、油圧ショベルの機体側が動き出すまでに掘削反力にどの程度余裕があるかの指標である機体不安定度を提案し、また、機体不安定度をオペレータへフィードバックする手法として、直感的に把握できるメータによる視覚的な提示手法を提案した。遠隔操作油圧ショベルにおいては、機械姿勢に関する情報を得ることが難しく、バケットにかかる負荷を推測することが困難である。そのため、転倒や転落のリスクが高い状態となっていると考えられ、提案した手法により、そのリスクが低減されることが期待された。提案した機体不安定度を操作者に提示した場合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。その結果、機体不安定度を提示することで生産性を保ったまま、より機体の傾きと前方向への移動を発生させることなく作業を行え、また機体不安定度が100%を超えている時間の比が減少していることを確認した。これにより、機体姿勢の把握が難しい遠隔操縦ショベルにおいて、高価で大出力なアクチュエータを用いることなく、より安全な作業ができる可能性が示唆された。力覚やハプティックフィードバックを用いた場合は、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータにとっては、操作感が変わってしまう可能性がある。提案した手法は、これらとは違い、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータでも違和感なく操作できることが期待される。しかし、本章においてはシミュレータ試験のみの実施であり、実際の遠隔操作油圧ショベルにおいても同様の効果があるかについては次章にて検証を行う。

第4章 マルチモーダルな遠隔操作ショベル のクロスプラットフォームコック ピットシステム

4.1 緒言

第1章でも述べたように、現在主流の遠隔操作油圧ショベルは、一般のオペレータでは、効率よく安全に操作することが困難であり、復旧作業に継続して従事しているオペレータが主に対応している状況にある。そのため、遠隔操作油圧ショベルが一般的な土木工事で用いられるためには、作業効率を改善するとともに、一般的な土木工事等に従事するオペレータでも、搭乗操作と比較して違和感なく操縦可能な遠隔操作システムが必要である。現在主流の遠隔操作油圧ショベルは、直接目視でない場合は、油圧ショベルに搭載されたカメラや作業現場に設置したカメラ車からの映像を複数のモニタで見ながら小型リモコンで操作するといったものであり、搭乗での操作と比較して操作感覚や作業空間の把握といった知覚・認知システムが異なっている。従来研究においては、俯瞰映像の追加 [72] や力覚や触覚フィードバックの追加 [73]-[75] 等の研究があるが、これらについても搭乗操作と比較すると知覚・認知システムが異なるため、新たに操作スキルの取得が必要となるという問題がある。よって、操作インターフェースの操作感覚を実機と同様にするとともに、搭乗操作時に得られる操作に必要な情報をもれなくオペレータにフィードバックすることが必要となると考える。

また、油圧ショベルは両手で2本のジョイスティックを操作し、関節をそれぞれ独立に操作

するという複雑かつ非直感的な操作系であるため、安全な操作を行うための技能習得ならびに維持には多くの操縦時間をかける必要がある。そのため、操作シミュレータを導入すれば、建設業への入職促進と定着に効果的であると考えられる。従来研究において、深谷 [76] が 2 軸の動揺装置が取り付けられた座席と大型スクリーンを用いた操作シミュレータを開発している。しかし、このように実際のインターフェースを再現しようとする装置が大きく、高コストとなるという問題がある。

そこで本章では、実機に近いインターフェースを備えたコックピットシステムにより、遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なシステムを提案する。これにより、油圧ショベル実機のオペレータでも実機同様の感覚で遠隔での操作が可能で、かつシミュレータによる訓練も同一コックピットで可能であり、またシミュレータでトレーニングしたスキルをそのまま遠隔操縦環境で利用できるため、低コストで技能習得・維持が可能になる。

具体的には、ステレオ動画像と HMD(Head Mounted Display) による 3 次元視覚情報提示システムと、油圧ショベル搭乗席の傾きをフィードバックするモーションシミュレータシートと、実際の油圧ショベルに用いられているジョイスティックを用いた、より実機搭乗に近いインターフェースを備えた遠隔操作コックピットを用いて、油圧ショベルを遠隔操作できるだけでなく、油圧ショベルシミュレータの操作も可能なクロスプラットフォームシステムを提案する。また、視覚情報は第 2 章での旋回難易度モデルに基づき設計したモニタ提示への切替も可能であり、さらに、第 3 章で提案した機体不安定度フィードバックを搭載する。このようなシステムを実際に製作し、それぞれのコンポーネントごとにシステム検証を実施し、同一のコックピットを用いて遠隔操作油圧ショベルとシミュレータが操作できることを確認した。さらに、この製作したシステムを用いて、実機搭乗と提案システムを用いた遠隔操作での作業効率を比較し、提案システムを評価、考察する。

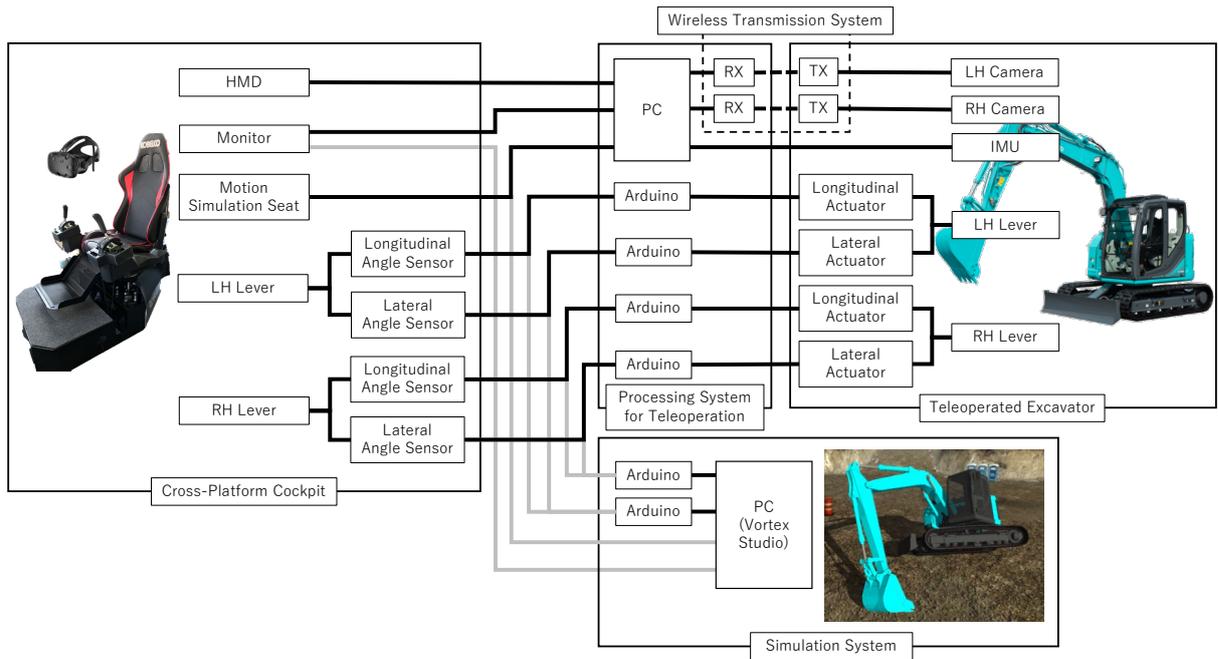


Fig. 4.1: Configuration of cross-platform system.

4.2 クロスプラットフォームシステムの構成

Fig. 4.1 に本章で提案するクロスプラットフォームシステムの構成図を示す。遠隔操作システム、シミュレータシステムで共通の部分であるコックピットシステムと、遠隔操作システムにおける操縦信号、機械からのフィードバック信号を処理する処理系システムと、遠隔操作油圧ショベル、シミュレータシステムから成る。それぞれ以下に説明する。なお本章では、定位置での掘削作業についての評価を目的とし、走行系については遠隔操縦の対象としていない。また、危険な現場での作業を想定している遠隔操縦ショベルにおいては、無線により操縦できることが好ましいが、実施安定性のため、視覚系以外については有線により実施している。

4.2.1 クロスプラットフォームコックピット

本研究で提案するコックピットシステムは、モニタ、モーションシミュレータシート、操作インターフェースのジョイスティックからなる。それぞれの構成や仕様を次項より説明する。

Table 4.1: Specifications of HMD.

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Resolution per eye [pixel] | 1080 × 1200 |
| Total resolution [pixel] | 2160 × 1200 |
| Horizontal viewing angle [deg] | 110 |
| Vertical viewing angle [deg] | 110 |
| Refresh rate [Hz] | 90 |

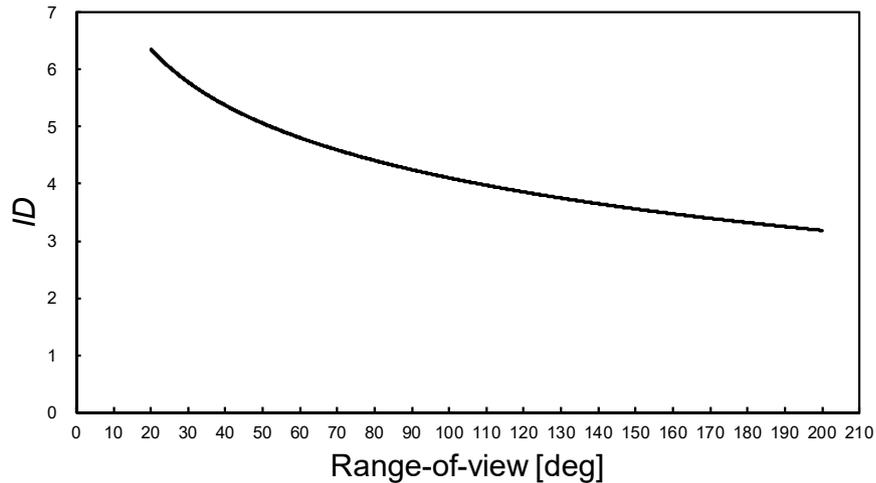


Fig. 4.2: *ID* with respect to range-of-view.

HMD

実機搭乗時のような映像をオペレータへ提供することを目的に、視覚情報についてはヘッドトラッキング機能の付いたHMDを採用した。左右のモニタに視差のある映像を映すことで奥行感のある映像を提供し、ヘッドトラッキング機能により広角の映像に対してもオペレータが頭を向けることで見渡すことが可能である。本研究で用いたHMD(HTC社製vive)の主な仕様をTable 4.1に示す。

モニタ

HMDによる視覚情報提示とは別に、モニタによる表示も可能とした。第2章で提案した視野角を考慮した旋回操作難易度モデルから、視野角が大きいほど旋回難易度は低下する。し

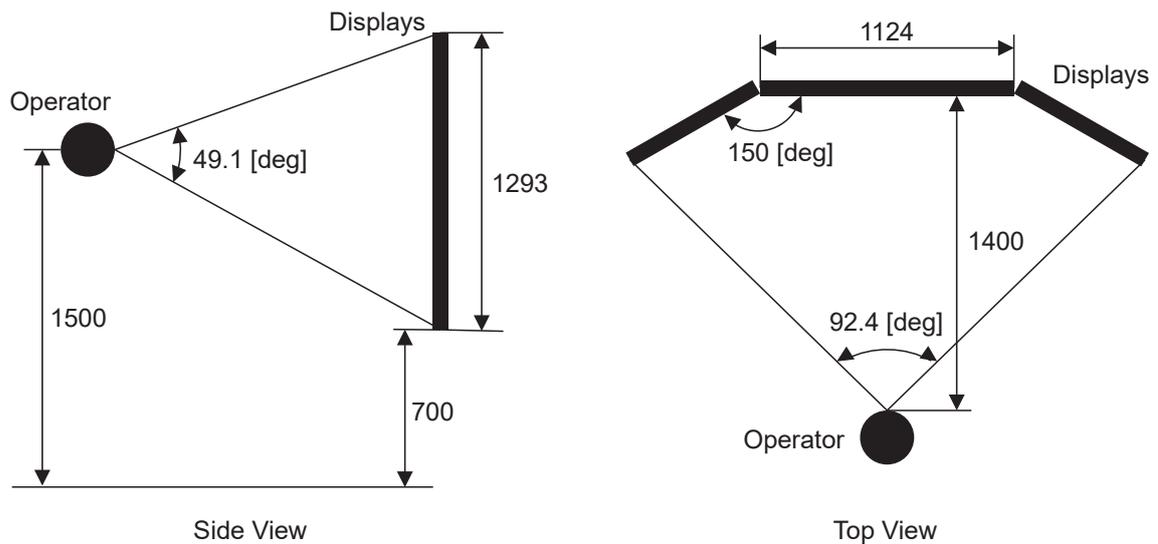


Fig. 4.3: Displays configuration.

しかし、視野角を大きく確保しようとした場合、モニタサイズの拡大、またはモニタ枚数の追加が必要となり、高コストとなる。そこで、第2章で提案した視野角を考慮した旋回操作難易度モデルを元にモニタ構成を検討した。

視野角が大きくなるほど高コストとなると考えると、視野角を広げることに対し、難易度低下への寄与率がある程度確保される視野角とすることが望ましい。一般的な積み込み作業作業を想定し、旋回目標位置 90 [deg]、目標領域幅を 5 [deg] とした場合、視野角と難易度の関係は Fig. 4.2 のようになる。ここで視野角については、人間における一般的な有効視野角である 20 [deg] から、周辺視野角である 200 [deg] までとした。このグラフより、視野角が大きくなるにつれて難易度の減少がゆるやかになることが分かる。そこで、変化率 -1.5% を閾値とすると難易度低下への寄与率がある程度確保される視野角は 91.1 [deg] となる。この視野角を目標とし、モニタ構成を検討し、正面に 2 枚、左右に 1 枚ずつ計 4 枚のモニタを用いることとした (Fig. 4.3)。この時の水平方向視野角は 92.4 [deg] である。

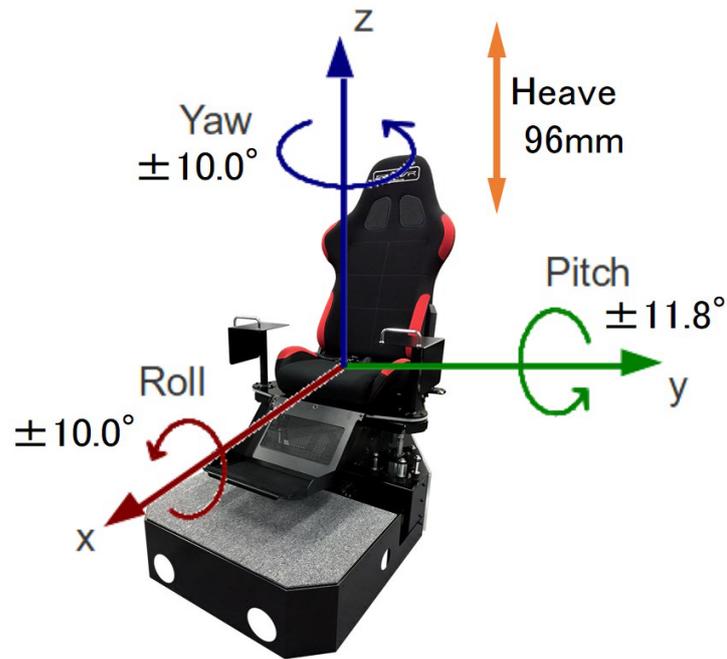


Fig. 4.4: Motion simulator seat.

モーシヨシミュレータシート

実機搭乗時に感じる車体の傾き情報や稼動情報をオペレータへフィードバックすることを目的に、モーシヨシミュレータシートを用いた。実機の操縦席の動きをそのまま再現しようとした場合、6自由度（ロール、ピッチ、ヨー、サージ、スウェイ、ヒープ）の再現が必要となるが、実際の無人化施工の現場での運用を考えた場合、そのような装置はサイズが大きく搬送も困難である。そのため本論文では、4自由度（ロール、ピッチ、ヨー、ヒープ）の動作が可能なモーシヨシミュレータシートを用いることとし、しのびや.com社製のSIMVRを採用した。(Fig. 4.4) 主な性能をTable 4.2に示す。

ジョイスティック

実機搭乗と同じ操作インターフェースとすることを目的に、操作レバーには油圧ショベル実機と同様のパイロットバルブ式ジョイスティックを採用した。パイロットバルブ式ジョイスティックは油圧ショベルに一般的に用いられており、ジョイスティックを傾けることで、パイ

Table 4.2: Specifications of motion simulator seat.

| | | |
|--|------------------------|-------|
| Movable range (independent) | Roll [deg] | ±10 |
| | Pitch [deg] | ±11.8 |
| | Yaw [deg] | ±10 |
| | Heave [mm] | 96 |
| Resolution | Roll, pitch, yaw [deg] | 0.1 |
| | Heave [mm] | 0.375 |
| Maximum angular velocity [deg/s] | | 20 |
| Maximum angular acceleration [deg/s ²] | | 980 |

ロットポンプからメインコントロールバルブへ送られる作動油の量を調整する。この作動油によって、実際に作業装置を駆動する油圧シリンダへ送る油量を調整するメインコントロールバルブを操作することで油圧ショベルが操作される。このため機体の負荷にかかわらず操作力は変わらない。よってパイロットバルブ式ジョイスティックを用いれば実機搭乗と同じ操作感で操作できるのではないかと考えた。パイロットバルブ式ジョイスティックは、パイロットバルブ部とレバー部からなり、パイロットバルブ内部にはスプリングが設けられており、それにより無操作時の中立が保たれ、操作時には操作反力が生成される。油圧ショベル実機においては、このパイロットバルブ式ジョイスティックが操縦席の左右にそれぞれ2本装備されており、Fig.3.7のようにそれぞれ前後・左右へ動かすことで旋回、アーム、ブーム、バケットを操作できる。

本研究では、Fig. 4.5のように実機と同様の位置関係となるようにモーションシミュレータシートに組み付けたパイロットバルブ式ジョイスティックのパイロットバルブ部とレバー部の間に、ジョイスティック操作角度の中心軸を回転軸とした前後・左右方向の回転機構とその回転角を検知するための角度センサを設置した。この回転機構には回転軸と直行する方向にレバー軸と同幅のスリットが設けられており、これにより、前後・左右方向のジョイスティック操作角度をそれぞれ独立して検出することができる。パイロットバルブの仕様と角度センサの性能をそれぞれ Table 4.3, 4.4 に示す。このように実際の油圧ショベルと同一のジョイス

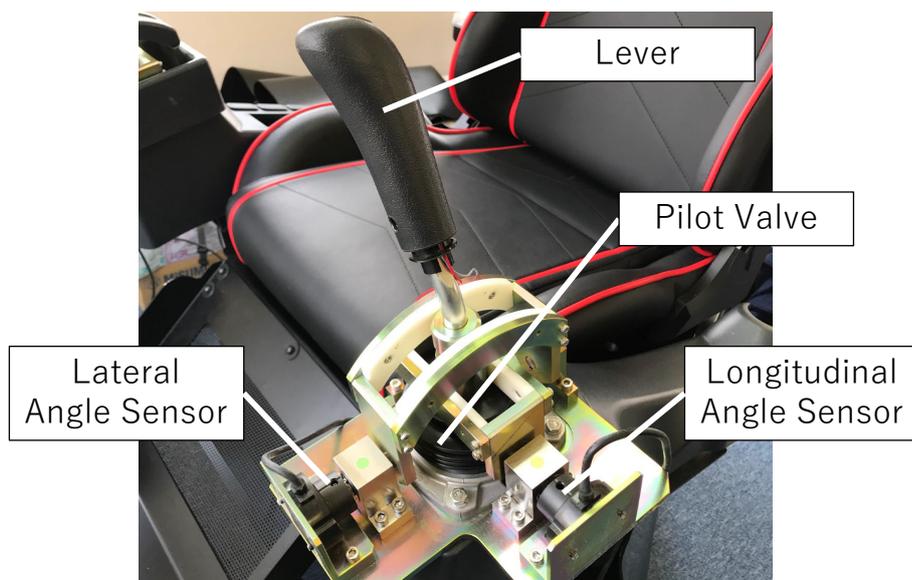


Fig. 4.5: Operation joysticks.

Table 4.3: Specifications of pilot valve.

| | | |
|-------------------------------------|------------------|------|
| Variable angle [deg] | Right and left | ±19 |
| | Forward and back | ±25 |
| Maximum operation torque [kgf · cm] | Right and left | 34.7 |
| | Forward and back | 34.7 |

ティックを用いることで、実機ジョイスティックと同様の操作反力・可動域となり、操作感も含めて実機搭乗と近い操作インターフェースを実現した。

4.2.2 遠隔操作油圧ショベル

油圧ショベルはコベルコ建株式会社製 7t クラス油圧ショベル SK75SR-3 を使い、カメラシステム、IMU センサ、ジョイスティック遠隔操作ユニットを組み付けた。それぞれの構成や仕様を次項より説明する。

Table 4.4: Specifications of angle sensor.

| | |
|------------------------|-------|
| Measurable angle [deg] | 0-60 |
| Resolution [deg] | 0.015 |
| Refresh rate [kHz] | 5 |



Fig. 4.6: Camera system.

カメラシステム

視差のある映像を取得するために2台のカメラを用いた立体視システムを搭載した。カメラは Blackmagic Design 社製 Blackmagic Micro Studio Camera 4K を2台とし、実機操縦時と同じ視界を再現するため、Fig. 4.6のように油圧ショベル搭乗席ヘッドレストに並べて設置した。レンズは対角画角 180 [deg] の SAMYANG 社製 F3.5/7.5mm FISH EYE LENS とし、この映像をそれぞれワイヤレスビデオ伝送システム(アイ・ディー・エクス社製CW-1)により無線にて非圧縮でマスタ側パソコンに送信する。受け取った映像をゲームエンジン Unity を用いて HMD の左右モニタそれぞれに表示する。カメラと伝送システムの仕様をそれぞれ Table 4.5, 4.6 に示す。これにより最大 30 [m] の距離内において 1080p の映像を低遅延にて送信を可能にした。

Table 4.5: Camera specifications.

| | |
|------------------|---------------------|
| Video format | 1080p (1920 × 1080) |
| Video output | HDMI |
| Frame rate [fps] | 60 |

Table 4.6: Specifications of wireless video transmission system.

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Video format | 1080p (1920 × 1080) |
| Input/output of video | HDMI |
| Frequency band | 5GHz |
| Occupied bandwidth | 40MHz |
| Transmission method | MIMO/OFDM/JSCC |
| Maximum distance [m] | 30 |
| Maximum delay (rated) [ms] | 1 |

IMU センサ

車体の傾き情報を取得するために、加速度3軸，ジャイロ3軸，磁気コンパス3軸を内蔵した9軸IMUセンサ (Bosch社製BNO055) を用いた。実機搭乗時に感じる感覚を再現するため、設置場所は搭乗席シート下部とした。角度情報は四元数で100Hzで出力され、これをArduinoを介してマスタ側パソコンに送信し、Unityにてオイラー角へ変換したのちモーションシミュレータシートへ送信する。

ジョイスティック遠隔操作ユニット

油圧ショベルを遠隔操作するため、運転席のパイロットバルブ式ジョイスティックを操作するシステムを製作した。(Fig.4.7) マスタ側操作レバーと同様に、パイロットバルブ式ジョイスティックに、操作角度の中心軸を回転軸とした前後・左右方向の回転機構を持ち、その回転機構には回転軸と直行する方向にレバー軸と同幅のスリットが設けられている。それらをサーボモータを用いて駆動することにより油圧ショベルを操作する。マスタ側ジョイスティックからの角度情報はArduinoを用いて逐次サーボモータへ送信される。サーボモータの仕様

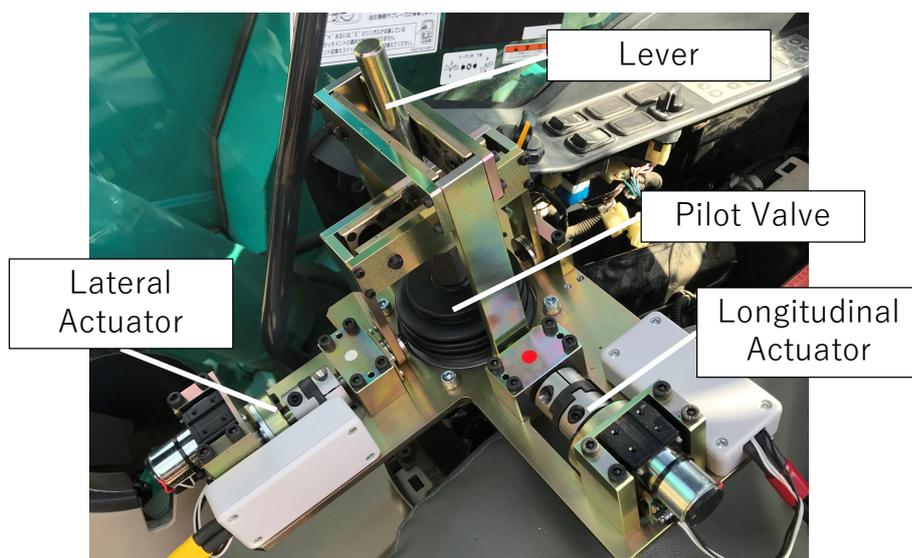


Fig. 4.7: Tele-operated joystick unit.

Table 4.7: Specifications of servo motor system.

| | |
|---------------------------------|----------------------|
| Torque [kgf · cm] | 103 (DC15V 5.8A) |
| Speed [s/60deg] | 0.29 (DC15V no-load) |
| Maximum angle of movement [deg] | 340 |
| Resolution [deg] | 0.0208 |
| Control frequency [kHz] | 2 |
| Control method | Serial communication |

を Table 4.7 に示す.

4.2.3 シミュレータシステム

シミュレータソフトは CM Labs 社製の Vortex Studio を用い、Fig. 4.8 のように仮想作業フィールド内に操作対象となる 13t クラスの油圧ショベルを再現した。この油圧ショベルは実際の 3D モデルを用いており、またその動作については実際の油圧回路をシミュレートしており、ジョイスティックの前後・左右方向の操作角度を入力として作業装置の操作や旋回が実機と同様に作動するようになっている。この油圧ショベルをコックピット側ジョイスティックに取り付けた前後と左右方向の傾きを検知する角度センサからの角度情報を左右それぞれ

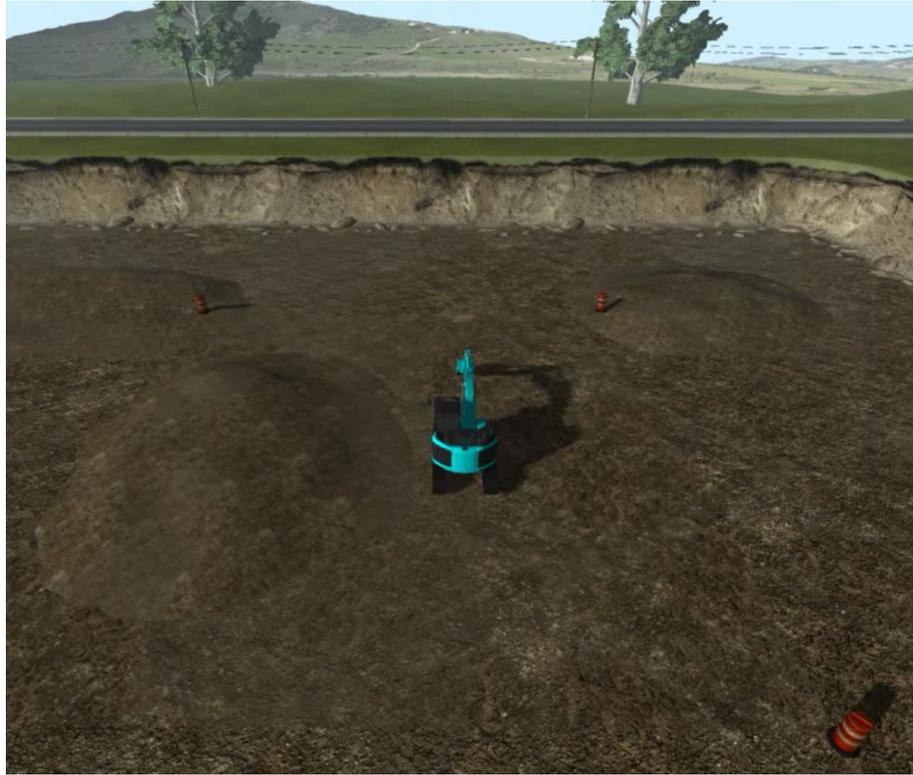


Fig. 4.8: Hydraulic excavator operation simulator.

Arduino を介してジョイスティックと認識させることにより操作を可能とした。また、シミュレータ上の油圧ショベルの傾きに応じて、前述のモーションシミュレータシートを作動させることでより現実に近い搭乗感覚がオペレータに提示される。視覚情報についてはモニタにオペレータ視点の映像を表示することとした。

4.3 システム検証

上記のようなシステムを製作し、それぞれのシステムごとに動作検証を行い、最後にクロスプラットフォームシステム全体の動作検証を行った。以下に示す。



Fig. 4.9: Video from camera system.



Fig. 4.10: Video displayed on HMD.



Fig. 4.11: Test sequence for checking feedback on angle of tilt.

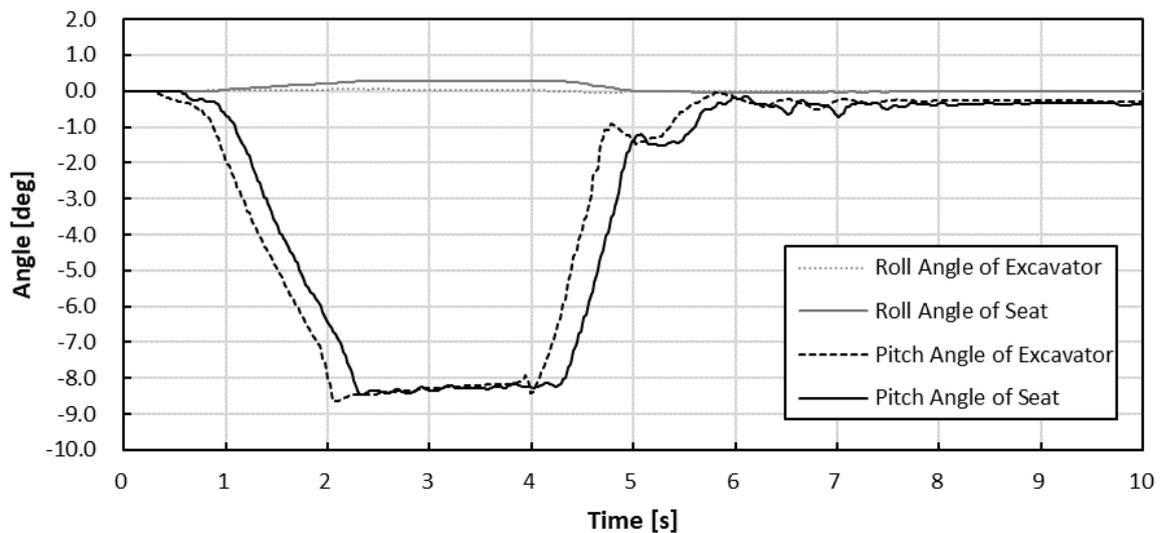


Fig. 4.12: Results of tilt reproduction check in roll and pitch directions.

4.3.1 立体視システム検証

Fig. 4.9 に提案したカメラシステムにより得られた画像を示す. 水平画角約 109 [deg], 垂直画角約 61 [deg], 60fps の映像を取得できた. 並べられた 2 つのカメラからの映像を HMD の左右モニタに Fig. 4.10 にのように表示することで奥行のある映像を提示することができることを確認した. また, 遅延についてはワイヤレスビデオ伝送システム間距離 15 [m], 遮蔽物無しの条件において計測した結果, 60~80 [ms] であった.

4.3.2 傾きフィードバックシステム検証

アタッチメントによる車体持ち上げを実施し、モーションシミュレータシートにおいて傾きが再現できているかを検証した。Fig. 4.11 に実験シーケンスを示す。サンプリング周波数は 62.5 [Hz] とした。Fig. 4.12 にロール、ピッチ方向での油圧ショベル角度と、モーションシミュレータシートにおける角度を示す。油圧ショベルのピッチ角がモーションシミュレータシートにおいて再現できていることが確認できたが、219～269 [ms] の遅延があることがわかった。この点は今後の課題である。また、ヨー方向、上下方向の動きの提示方法については今後取り組みが必要である。

4.3.3 ジョイスティック遠隔操作システム検証

ジョイスティック遠隔操作システムについて、コックピット側のジョイスティックに対する油圧ショベル側ジョイスティックの追従性を確認した。Fig. 4.13 のようにジョイスティックを操作した際の傾きを計測した。前後方向、左右方向それぞれについて、コックピット側ジョイスティック角度指令値と油圧ショベル側ジョイスティックの角度を Fig. 4.14 に示す。サンプリング周波数は約 76.9 [Hz] とした。遅延については 39～78 [ms] であった。ここで左右方向の角度において、マスタ側の指令角度値に対してスレーブ側の角度が低くなっているが、これはスレーブ側ユニットの構造上、ジョイスティック最大角度が再現できなかったため出力を 80% としているためであり、今後の課題である。この点を除けば、角度指令値に対し、油圧ショベル側ジョイスティック角度がほぼ正確に再現できており、コックピット側ジョイスティックの操作に対し油圧ショベル側ジョイスティックが追従できていることが確認できた。

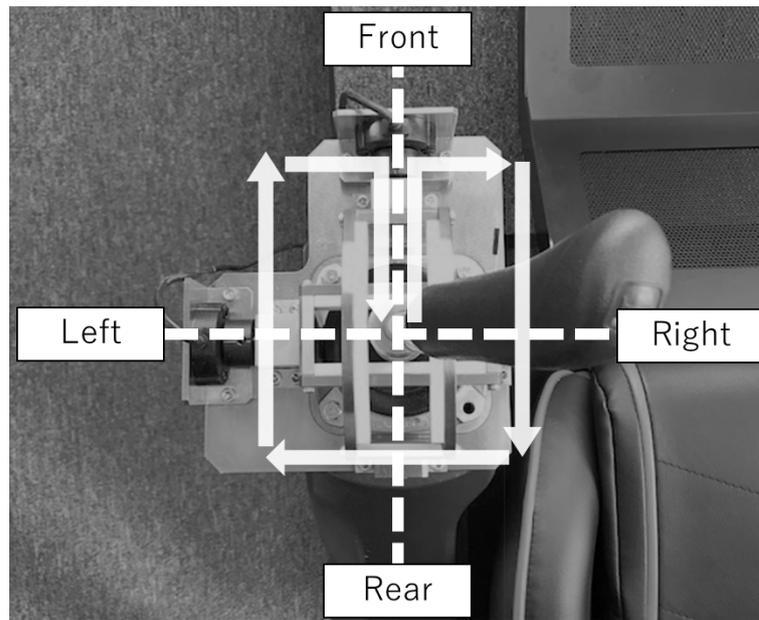


Fig. 4.13: Method of checking tele-operated joystick system.

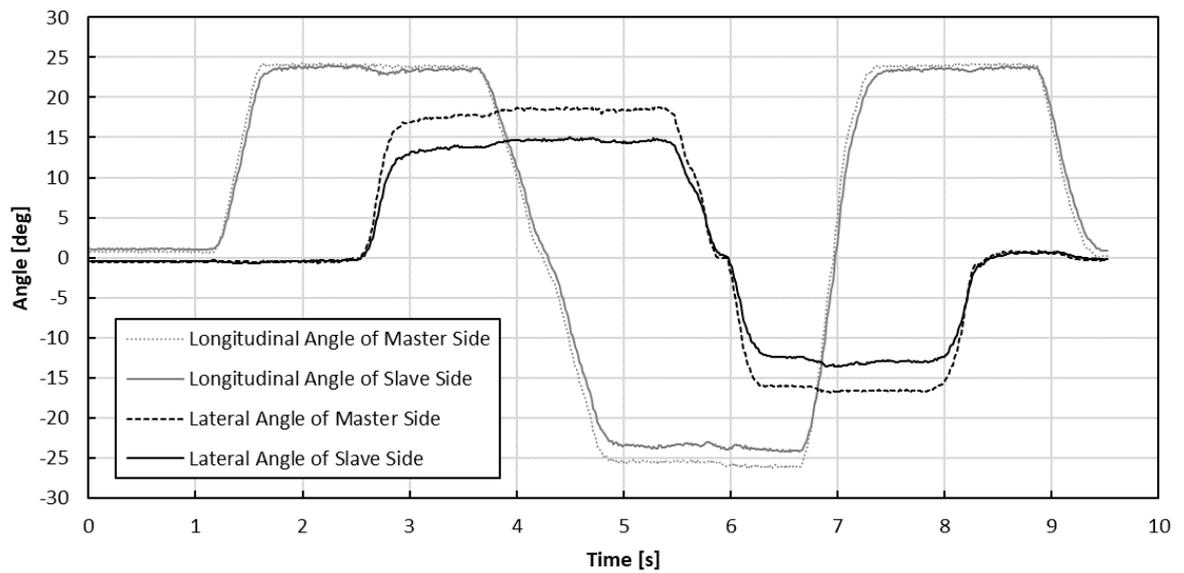


Fig. 4.14: Results of followability test of tele-operated joystick system.

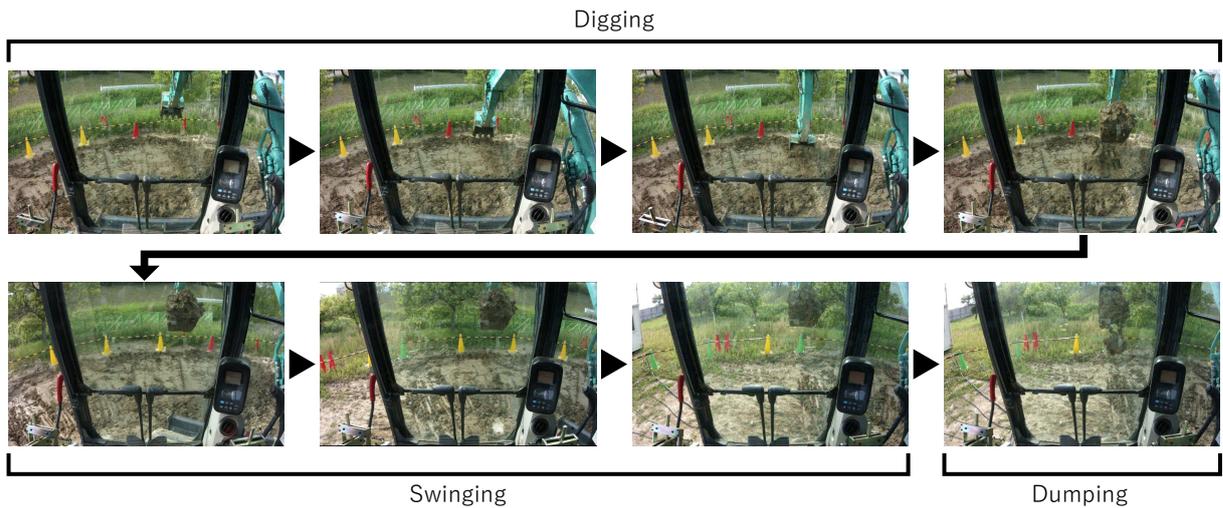


Fig. 4.15: Operation test of teleoperated excavator.

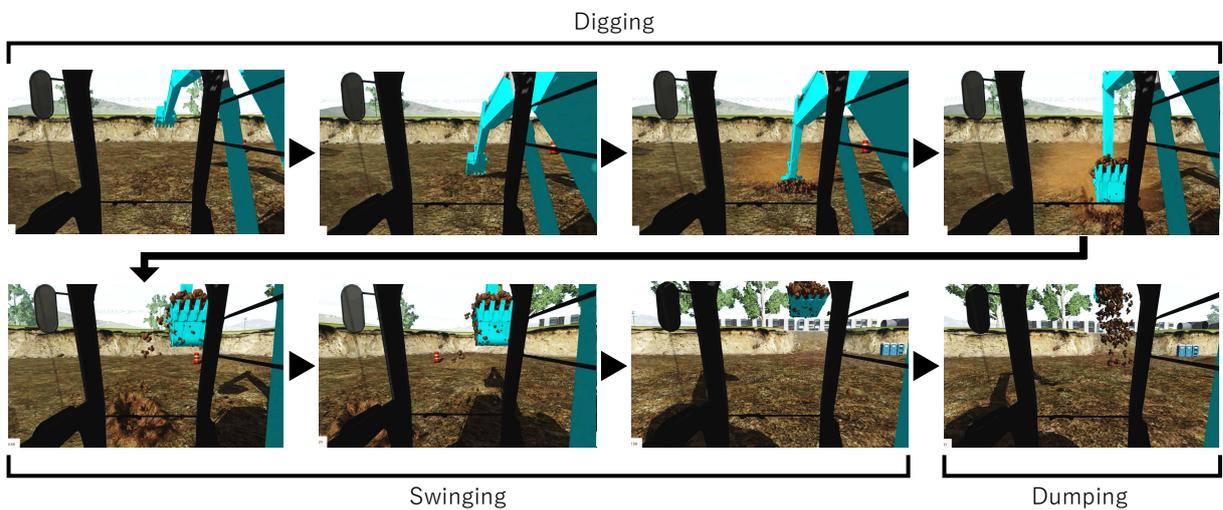


Fig. 4.16: Operation test of simulator.

4.3.4 クロスプラットフォームシステム検証

製作したクロスプラットフォームコックピットを用いて、遠隔操作油圧ショベルとシミュレータの操作が可能であることを確認した。遠隔操作油圧ショベルとシミュレータそれぞれに対してコックピットを用いて下記のようなタスクを実施した。

1. 地面の掘削
2. 90 [deg] 旋回 (遠隔操作油圧ショベルについては左旋回, シミュレータについては右旋回)

3. 排土

その際のオペレータ視点の映像をそれぞれ Fig.4.15, Fig.4.16 に示す。このように遠隔操作油圧ショベル、シミュレータどちらに対しても同様にコックピットから操作可能であることが確認できた。これらの検証により、実機に近いインターフェースを備えたコックピットシステムにより、遠隔操作油圧ショベルとシミュレータが操作できることを確認した。

4.4 遠隔操作油圧ショベルの作業効率検証

構築したコックピットシステムを用いた場合の作業効率を評価するため、被験者試験を実施した。なお、この検証時においてはシステムが以下のように変更されている。

- 油圧ショベルを 7t クラスから 13t クラス (SK135SR-3) に変更
- マスタ側ジョイスティックを実機同様の反力・操作角度の電気式ジョイスティックに変更
- 操作系、機体角度情報、アタッチメント角度情報、掘削反力、通信を遠隔化

視覚システムはモニタ表示とした。その他にも構成部品の変更等があるが本節の主旨から外れるため省略する。

4.4.1 被験者試験

実機搭乗の場合と、構築した遠隔操作油圧ショベルを用いた遠隔操作の場合において、掘削積込み作業を模擬した、掘削サイクル試験を実施した。Fig. 4.17 のように、掘削、左旋回 (90 [deg])、排土、右旋回を 1 サイクルとし、3 サイクルを 3 回 (計 9 サイクル) 被験者に実施させた。実機搭乗、遠隔操作とも同じ場所で行った。実機搭乗条件では構築した遠隔操作油圧ショベルシステムの油圧ショベルに搭乗し試験を行った。

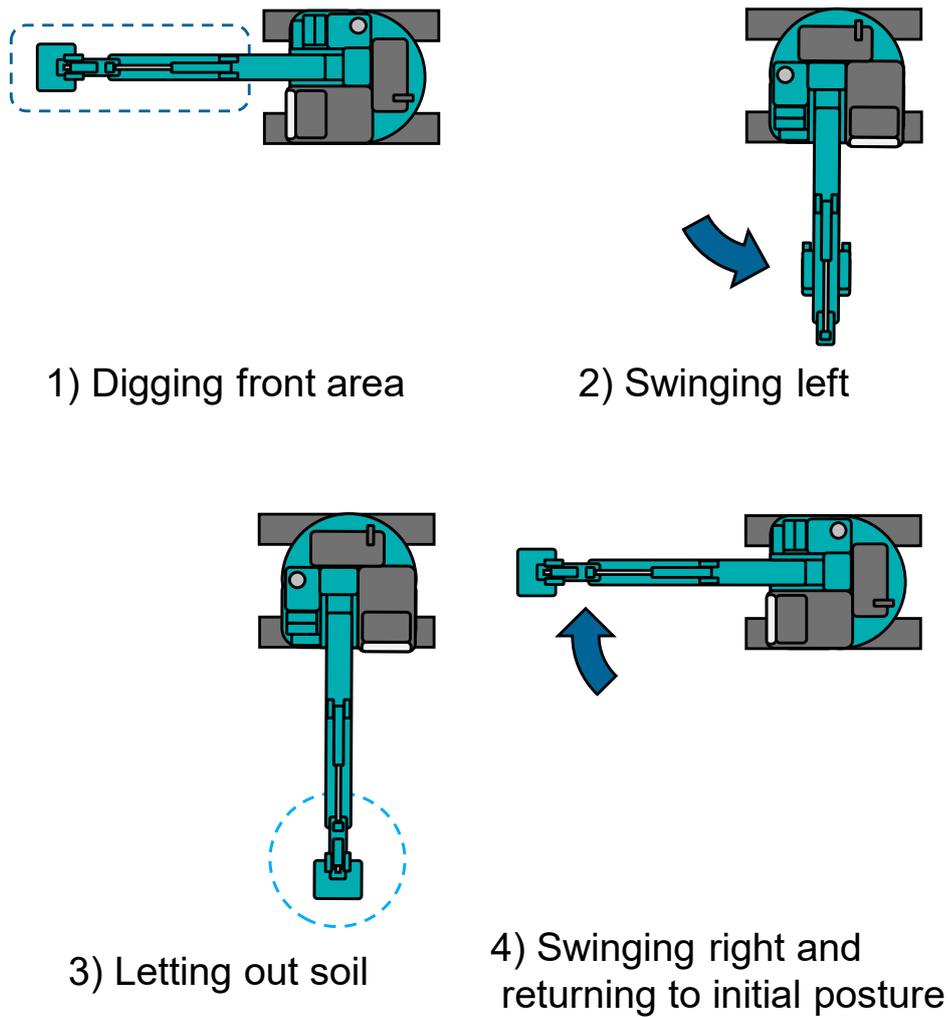


Fig. 4.17: Experimental task (one cycle).

被験者は油圧ショベルの操縦経験のある健康な成人男性3名で、1サイクルにかかるタスク時間を計測した。また、掘削、左旋回、排土、右旋回それぞれの作業にかかった時間についても操作入力情報から下記のように算出した。

- 掘削は、アーム引き操作開始から左旋回操作開始までの時間
- 左旋回は、左旋回操作開始からバケット排土操作開始までの時間
- 排土は、バケット排土操作開始から右旋回操作開始までの時間
- 右旋回は、右旋回操作開始からアーム引き操作開始までの時間

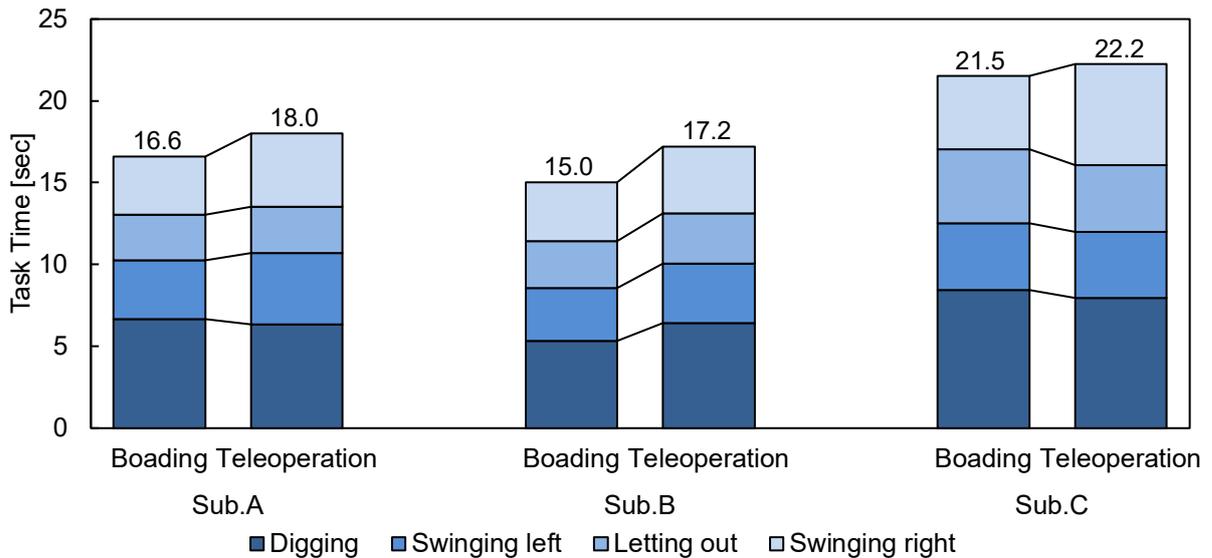


Fig. 4.18: Task time for actual boarding and teleoperation.

実験に先立ち、ヘルシンキ宣言に基づき、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。

4.4.2 試験結果

被験者ごとの、実機搭乗、遠隔操作それぞれにおける9サイクルでの平均のタスク時間を Fig. 4.18 に示す。各棒グラフの上に平均タスク時間を記載している。この結果より、構築した遠隔操作油圧ショベルを用いた遠隔操作でのタスクタイムは、実機搭乗におけるタスク時間と比較して、Sub.Aで1.09倍、Sub.Bで1.15倍、Sub.Cで1.03倍となることが確認された。

4.4.3 考察

第1章で述べたように、現在主流の遠隔操作建設機械での作業時間は実機搭乗と比較し2倍以上とも言われている。これに対し、本章で構築した遠隔操作油圧ショベルを用いた掘削積込みを模擬した試験では、実機搭乗と比較して1.03~1.15倍となり、大幅に作業時間が削減された。掘削積込みという比較的容易な試行ではあるため単純には比較できないが、より実機搭乗での作業効率に近い遠隔操作油圧ショベルシステムが実現できたと考えることが

できる。作業ごとの時間については、Sub.A,Cにおいて、実機搭乗条件より遠隔操作条件での掘削時間が短くなっている。これは掘削軌跡が実機搭乗条件と比べ浅くなったことが原因であると推測され、これにより掘削土量が少なくなっている可能性があると考えられる。今後は、掘削土量の評価も実施する必要がある。また、第3章で提案した機体不安定度フィードバックの効果については確認できていないため、次節において検証を実施した。

4.5 機体不安定度フィードバック実機検証

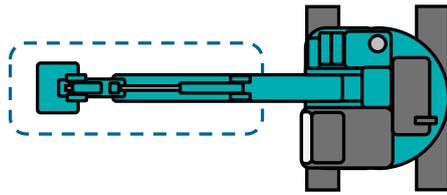
実際の遠隔操作ショベルにおける第3章で提案した不安定度フィードバックの効果を検証するため、被験者試験を実施した。本節での目的は不安定度提示の効果を検証するためとし、モーションシミュレータシートの動作はオフにした。

4.5.1 被験者試験

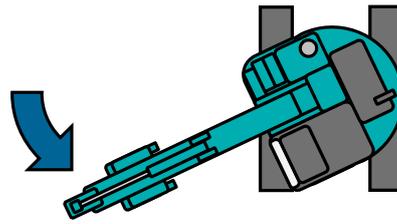
試験条件と方案

条件は機体不安定度の提示がある場合と無い場合の2つで、それぞれの場合において、Fig. 4.19のように1~4の5回繰り返しを1セットとして、これを2セットを行うことで、計10回の掘削作業を被験者に実施させた。また掘削の難易度による差異を確認するべく、標準バケットと、法面バケットの2パターンでの試験を実施した。法面バケットは、標準バケットと比較して重量が重く、難易度が高い試行となる。ショベルはFig.4.20のように90 [deg] 旋回させ水平面に設置した。試験を実施したエリアでは掘削中に車体が前方に引きずられる挙動の再現ができなかったため、前方向の不安定度の計算に用いる静摩擦係数は1.0と設定した。

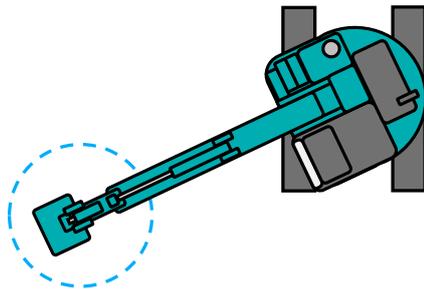
機体角度、機体不安定度、掘削反力、掘削土量を計測した。タスク時間は、マスタ側ジョイスティックにてアーム操作が入力された時を開始とし、掘削後旋回操作が入力されるまでの時間とした。機体角度は、機体の初期傾きの影響を無くするため、カットオフ周波数0.001 [Hz]の



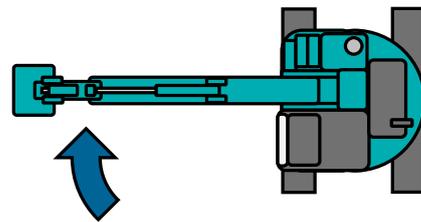
1) Digging front area



2) Swinging left



3) Letting out soil



4) Swinging right and returning to initial posture

Fig. 4.19: Experimental task (one set).



Fig. 4.20: Actual image of teleoperated hydraulic excavator in experiment.

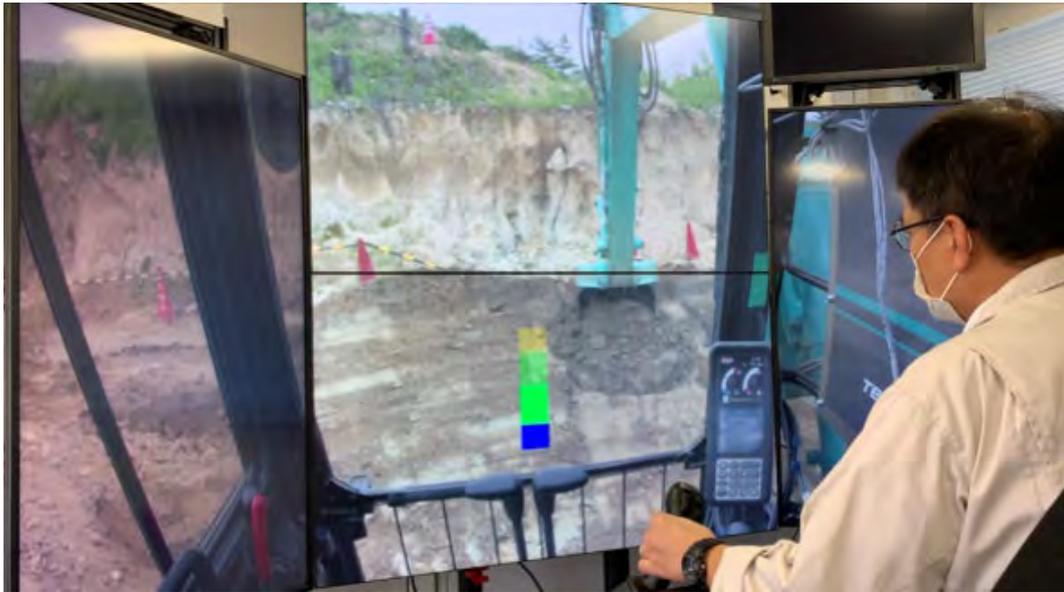


Fig. 4.21: Actual image of cockpit in experiment.

ハイパスフィルタを適応した。掘削土量は掘削終了後の旋回動作中でのバケット内の土の重さにより生じる垂直方向の掘削反力から推定した。計算に用いる単位体積重量は $22 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ とした。車体が前方に引きずられる挙動は、どの条件、被験者においても発生しなかった。

標準バケットについての被験者は、油圧ショベルの操縦経験のある 28～54 歳の健康な成人男性 6 名で、試験の実施順は試行順の影響をなくするため、3 名は機体不安定度の提示あり条件を先に実施し、残りの 3 名は提示無し条件を先に実施した。法面バケットについての被験者は、油圧ショベルの操縦経験のある 25～54 歳の健康な成人男性 7 名で、4 名は機体不安定度の提示あり条件を先に実施し、残りの 3 名は提示無し条件を先に実施した。どの被験者も提示無し条件で 1 セットを行ってから試験を実施した。被験者へはなるべく掘削土量が多くなるように、早く掘削を行うように指示をした。また、機体不安定度提示あり条件において表示されるメータは、機体が動きだすまでの指標情報であることは被験者へ事前に伝えている。実験に先立ち、ヘルシンキ宣言に基づき、参加者全員からインフォームド・コンセントを得た。試験時のコックピット側の画像を Fig. 4.21 に示す。

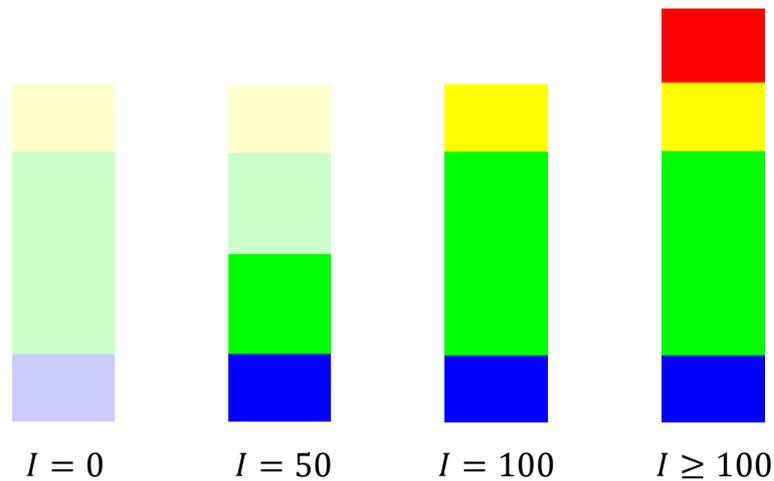


Fig. 4.22: Machine instability meter for teleoperated excavator experiments.

機体不安定度提示方法

機体不安定度の提示は、シミュレータ試験と同様にバケット左横に固定とした。表示に用いたメータを Fig. 4.22 に示す。シミュレータ試験実施後のコメントから、閾値を 100% とし、機体不安定度が閾値以上となった場合でも、メータの実像が増加するように変更した。

4.5.2 試験結果

試験結果について安全性と生産性の観点で評価を行った。各指標は各提示条件および各バケットにおける被験者ごとの平均値についてである。図中の“Without F/B” が機体不安定度の提示がない場合，“With Machine Instability F/B” が機体不安定度の提示がある場合を意味する。また，“Finishing BUK” が法面バケットの場合，“STD BUK” が標準バケットの場合を示す。有意水準は 5% とした。

Fig. 4.23 に機体傾き角度の 1 回のタスク中の最大値の平均を示す。Student’s *t*-test を行った結果、法面バケット ($t(6) = 1.949, p = .049579$)、標準バケット ($t(5) = 2.094, p = .045$) のどちらの場合においても、機体不安定度提示無し条件より提示有条件の方が有意に低かった。

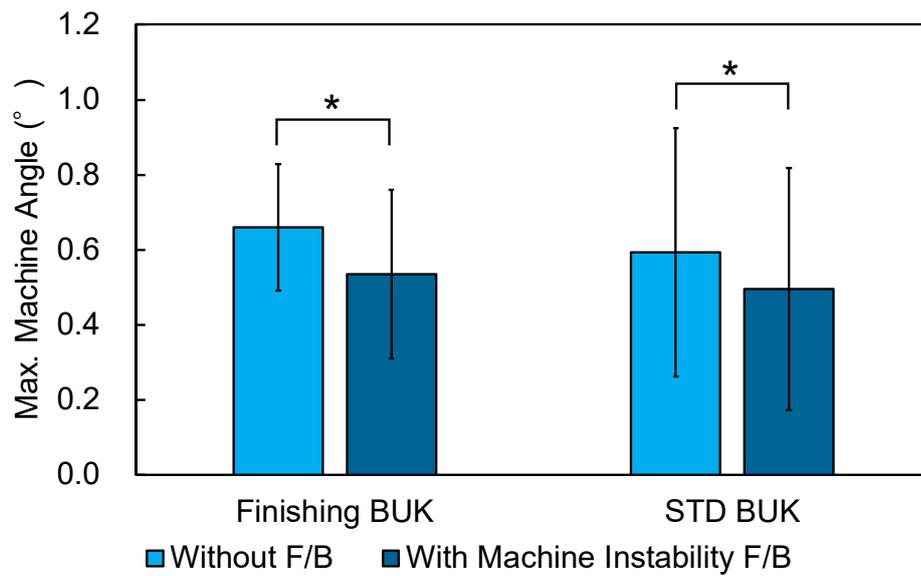


Fig. 4.23: Differences in mean values of maximum machine angle for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences ($*p < .05$). Hypothesis for student's t -test is value of "Without F/B" greater than value of "With Machine Instability F/B."

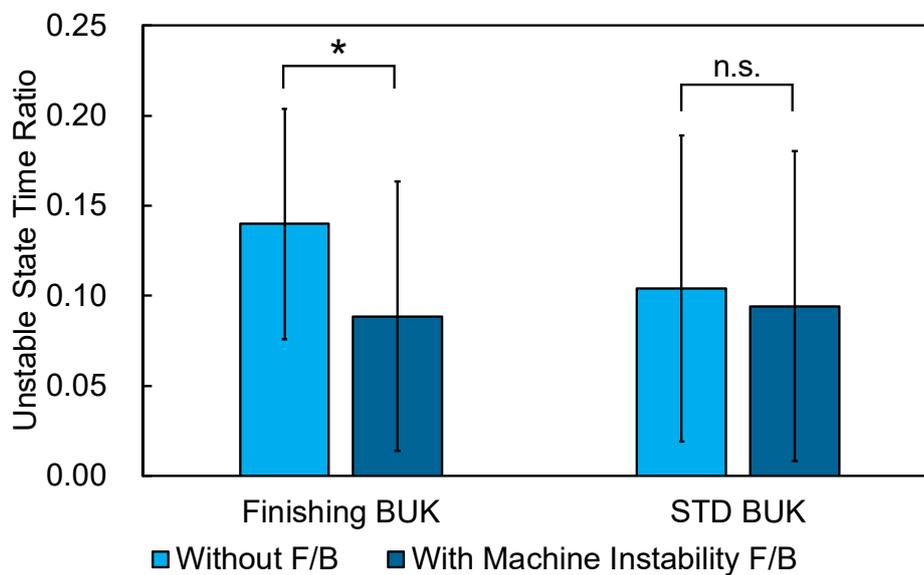


Fig. 4.24: Differences in mean values of unstable state time ratio for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant differences ($*p < .05$). Hypothesis for student's t -test is value of "Without F/B" greater than value of "With Machine Instability F/B."

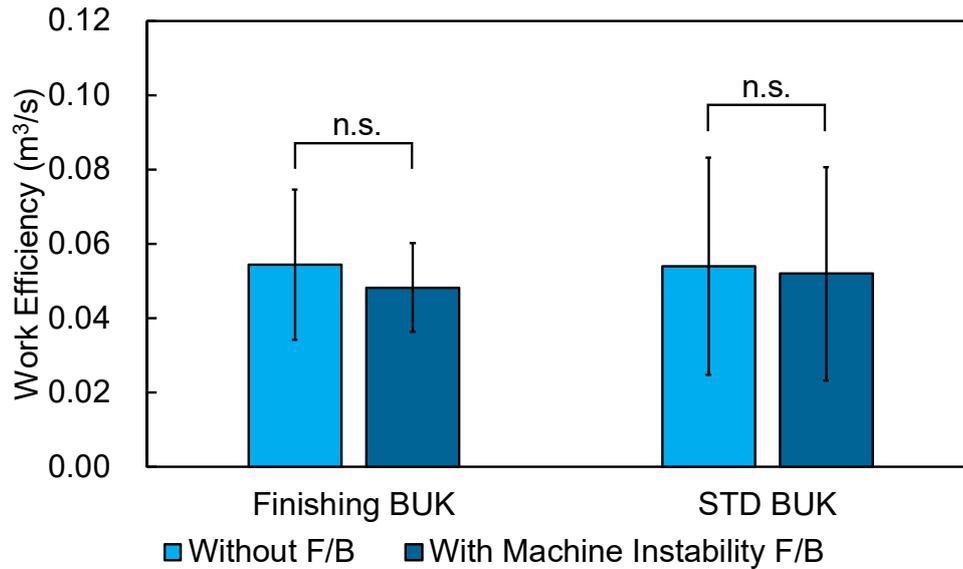


Fig. 4.25: Differences in mean values of work efficiency for simulation experiment. Error bars indicate standard deviation.

Fig. 4.24 は、不安定状態時間比の平均を示している。Student's *t*-test を行った結果、法面バケット ($t(6) = 2.277, p = .032$) の場合において機体不安定度提示無し条件より提示有条件の方が有意に低く、標準バケット ($t(5) = 0.704, p = .256$) では条件間で有意な差は確認されなかった。

生産性について解析を行った。Fig. 4.25 に作業効率の平均を示す。Student's *t*-test を行った結果、法面バケット ($t(6) = 1.351, p = .255$)、標準バケット ($t(5) = 0.668, p = .534$) のどちらの場合においても、条件間で有意差は確認されなかった。

4.5.3 考察

最大機体角度について有意な減少が確認され、不安定状態時間比について法面バケットでは有意な減少が確認されたことから、シミュレータ試験の結果と同様に、機体不安定度を提示することで、機体の移動量が減少し、かつ、機体側が動いている状態である時間が減少したと言える。機体不安定度フィードバックにによって、バケット負荷に対する余裕を直感的

に把握することができるため、この結果が表れたと考えられる。標準バケットは容易な試行条件であったため、不安定状態時間比に差異が出なかったことが推測される。本研究では水平面での試験のみを実施したが、より危険かつ遠隔操作ショベルでは機体の傾斜角度を把握しにくい傾斜地等での作業に対しては、その余裕を直感的に把握できるため、大きな効果があると期待できる。しかし、被験者によっては、最大機体角度、不安定状態時間比が、機体不安定度を提示することにより増加した。その被験者については、試験後に「表示がある場合、余裕があることがわかるため、通常より深く掘削してしまい、その結果、機体不安定度が100%を超えることが多くなってしまった」とのコメントを得られており、提示方法を変更することで改善の可能性がある。この点は今後の課題である。また生産性については、どの条件においても作業効率の有意な差は見られなかったことから、機体不安定度提示が生産性を低下させることはなかったと言える。Lécuyerらの従来研究において、触覚、視覚、聴覚による追加フィードバック情報がオペレータのパフォーマンスに与える影響を調査している [77]。ボールを操作し5つの壁の開口へ順に挿入するタスクについて、ボールが壁へ衝突した際に作用する反力の大きさをフィードバックした結果、どの条件においてもフィードバック無しの場合と比較して慎重に操作するようになるためタスクタイムを増加させることを報告している。これに対し本研究では、作業効率が増加するという結果は表れていない。これは、従来研究が衝突した状態、つまり望ましくない状態であるか否かをフィードバックするのに対し、本研究では、機体が動き始める状態になるまで、つまり望ましくない状態となるまでどの程度余裕があるかを提示したことの効果であると考えられる。以上より、機体不安定度を提示することで生産性を落とさずに、より安全に掘削作業を行うことができることが明らかになった。

4.6 結言

本章では、ステレオ動画像と HMD による 3 次元視覚情報提示システムと、油圧ショベル搭乗席の傾きをフィードバックするモーションシミュレータシートと、実際の油圧ショベルに用いられているジョイスティックを用いた、より実機搭乗に近いフィードバックとインターフェースを備えた遠隔操作コックピットを用いて、油圧ショベルを遠隔操作できるだけでなく、油圧ショベル操作シミュレータの操作も可能なクロスプラットフォームシステムを提案し、実際に製作した。製作したシステムについてそれぞれのシステムごとに動作検証を実施し、提案したコックピットを用いて遠隔操作油圧ショベルとシミュレータが操作できることを確認した。油圧ショベル遠隔操作システムにおける遅延については、視覚系と操作系合わせて最大 158 [ms] の遅延となった。遠隔操作における視聴覚通信での遅延は 200 [ms] 程までは許容されると言われており [78]、本システムにおいてはそれ以内に収めることができた。しかし、実作業において許容される遅延量や生産性への影響については今後評価が必要と考える。また、傾きフィードバックシステムの遅延は最大で 269 [ms] と大きいため、改善が必要と考える。

また、構築した遠隔操作システムを用いて、掘削積込み作業を模擬した試験を実施したところ、実機搭乗と比較し、作業時間が 1.03~1.15 倍となり、実機搭乗に近い作業効率を実現することができた。現在主流の遠隔操作油圧ショベルでは 2 倍以上となると言われているため、構築した遠隔操作システムが遠隔操作での作業効率を向上させることが確認できた。今後は、他の作業等での作業効率を検証する必要がある。

さらに、第 3 章で提案した機体不安定度フィードバックを、実際の遠隔操作ショベルにおいて操作者に提示した場合の効果を検証した。その結果、生産性を保ったまま、より機体傾きを発生させることなく作業が行えることを確認した。これにより、機体姿勢の把握が難しい遠隔操縦ショベルにおいて、高価で大出力なアクチュエータを用いることなく、より安全な作業を行うことが可能となる。今後は、提案した機体不安定度のメータ表示手法、位置、視

覚以外の提示手法について検討が必要である。

第5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、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルで、かつ遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットを構築した。具体的には、視覚システムの評価・検討のため、油圧ショベルの旋回操作をポインティング動作とみなし、旋回操作の難易度を表現する旋回操作難易度モデルを構築した。また、現在主流の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、アタッチメント姿勢に応じて、機体が動き出しはじめる掘削反力に対して現在の掘削反力がどの程度余裕があるかを直接オペレータへ提示することを考え、掘削反力と機体姿勢から算出される機体不安定度フィードバックを提案し評価した。最後に、これらの評価・検討を元に、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルなコックピットシステムにより、遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットシステムを提案、また実際に構築し、評価を実施した。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、油圧ショベルの旋回操作性を評価する指標を提案し評価した。旋回操作により目標位置へバケットを停止させる動作をポインティング動作とみなし、旋回操作難易度モデルの構築を試みた。ポインティング動作の難易度モデルとして広く用いられている Fitts の法則では、油圧ショベルまたは遠隔操作油圧ショベルにおいて操作性に影響すると考えられ

る視野角と動特性は考慮されていない。よって、それぞれを考慮した新たな難易度モデルを検討した。視野角については、まず旋回動作を模擬したシミュレータを構築し、それを用いて、被験者による旋回操作課題を行った。その結果、視野角が狭くなるほど、課題完了までにかかる時間が長くなることが確認された。この結果より、従来の難易度モデルに対し、視野角を追加した新たな難易度モデルを提案した。試験結果を評価したところ、従来モデルと比較し、提案モデルの方が決定係数が高く、より正確に旋回操作難易度を表していることが確認された。さらに、実際の油圧ショベルを用いた被験者試験を行い、シミュレーションで得られた結果と同様の結果を得た。また、動特性については、油圧ショベルの旋回動作を一次遅れ+むだ時間系であると仮定し、シミュレータを用いた被験者による旋回試験を行った。その結果、時定数、むだ時間が大きくなるほど、課題完了までにかかる時間が長くなることが確認された。この結果より、従来の難易度モデルに対し、時定数とむだ時間を追加した新たな難易度モデルを提案した。試験結果を評価したところ、従来モデルと比較し、提案モデルの方が決定係数が高く、より正確に旋回操作難易度を表していることが確認された。

第3章では、遠隔操作ショベルでの掘削作業における安全性を高めるため、油圧ショベルの機体側が動き出すまでに掘削反力にどの程度余裕があるかの指標である機体不安定度を提案し、また、機体不安定度をオペレータへフィードバックする手法として、直感的に把握できるメータによる視覚的な提示手法を提案した。遠隔操作油圧ショベルにおいては、機械姿勢に関する情報を得ることが難しく、バケットにかかる負荷を推測することが困難である。そのため、転倒や転落のリスクが高い状態となっていると考えられるが、提案した手法により、そのリスクが低減されることが期待された。提案した機体不安定度を操作者に提示した場合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。その結果、機体不安定度を提示することで生産性を保ったまま、より機体の傾きと前方向への移動を発生させることなく作業を行え、また機体不安定度が100%を超えている時間の比が減少していることを確認した。これにより、機体姿勢の把握が難しい遠隔操縦ショベルにおいて、高

価で大出力なアクチュエータを用いることなく、より安全な作業ができる可能性が示唆された。力覚やハプティックフィードバックを用いた場合は、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータにとっては、操作感が変わってしまう可能性がある。提案した手法は、これらとは違い、普段通常の搭乗操作を行っているオペレータでも違和感なく操作できることが期待される。

第4章では、ステレオ動画像とHMDによる3次元視覚情報提示システムと、油圧ショベル搭乗席の傾きをフィードバックするモーションシミュレータシートと、実際の油圧ショベルに用いられているジョイスティックを用いた、より実機搭乗に近いフィードバックとインターフェースを備えた遠隔操作コックピットを用いて、油圧ショベルを遠隔操作できるだけでなく、油圧ショベル操作シミュレータの操作も可能なクロスプラットフォームシステムを提案し、実際に製作した。製作したシステムについてそれぞれのシステムごとに動作検証を実施し、提案したコックピットを用いて遠隔操作油圧ショベルとシミュレータが操作できることを確認した。また、構築したシステムを用いて、掘削積込み作業を模擬した試験を実施したところ、実機搭乗に近い作業効率を実現することができた。さらに、第3章で提案した機体不安定度フィードバックを、実際の遠隔操作ショベルにおいて操作者に提示した場合の効果を検証した。その結果、生産性を保ったまま、より機体傾きを発生させることなく作業が行えることを明らかにした。

本研究では、遠隔操作油圧ショベルシステムに対して、オペレータの知覚特性に合ったインターフェースと、人間に理解しやすいように機械情報を変換してフィードバックする情報提示システムとを備えた、マルチモーダルで、かつ遠隔操作油圧ショベルを操作できるだけでなく、シミュレータによる訓練が可能なクロスプラットフォームコックピットを構築、評価した。この結果から、実機搭乗に近い作業効率で、一般的な土木工事等に従事するオペレータでも搭乗操作と比較して違和感なく操縦可能な遠隔操作システムが実現可能であることが本研究により示唆された。しかし、作業効率については特定の作業のみで実施したもので

あり、操作性の評価についても実施できていないため、さらなる検証が必要である。また、聴覚情報や機械情報等のフィードバックやアシスト機能等を加えることで、さらに実機搭乗操作に近い生産性を確保できる遠隔操作ショベルシステムへ拡張していかなければならない。

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。今後は、働き方改革に加え、感染症対策などの観点からテレワークが推進されていくと考えられる。また、近年、ITシステムの発展とともに、Uberのような従来の産業とは異なるデジタルマッチングサービスが表れており、働き方の多様性が広がっている。建設業においては、少子高齢化等の影響により、新入職者の確保と定着が必須の状況にある。テレワーク可能で、かつ教育、練習が可能なシステムにより、建設業が何処でも誰でも働ける現場へと変革していくことが期待される。この為に最も重要な技術が遠隔操作技術である。この技術により、安全で先進的な建設現場の実現に繋がると確信している。今後も、何処でも誰でも働ける現場の実現に向け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(平成29年推計), http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp29_gaiyou.pdf, (2020年11月20日)
- [2] 厚生労働省：「働き方改革」の実現に向けて, <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000148322.html>, (2020年11月20日)
- [3] 総務省：「平成27年版情報通信白書」, 総務省(2015)
- [4] 一般社団法人日本建設業連合会：「建設業ハンドブック2020」, 一般社団法人日本建設業連合会(2020)
- [5] 国土交通省：最近の建設産業と技能労働者をめぐる状況について, <https://www1.mlit.go.jp:8088/common/001120144.pdf>, (2020年11月26日)
- [6] 厚生労働省：職場のあんぜんサイト：労働災害統計(令和元年), <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/tok/anst00.htm>, (2020年11月20日)
- [7] 国土交通省：i-Construction, <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>, (2020年11月20日)
- [8] 五道 仁実：「国土交通政策最前線/i-Construction 特集 i-Construction による建設現場の生産性革命」, 時評, Vol.58, No.6, pp. 152-157 (2016)
- [9] 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)
- [10] 常山 修治, 竹下 正一, 堤 英彰, 城澤 道正：「i-Construction(建設現場の生産性革命)の推進と建設現場の安全性の向上に向けて」, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.73, No.2, pp.I.1-I.6 (2017)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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, <http://www.cema.or.jp/general/statistics/index.html>, (2020年11月20日)
- [15] 猪原 幸司：「無人化施工の現状および建設無人化施工協会の活動について」, 建設マネジメント技術, 2018年11月号, pp.48-53 (2018)
- [16] 山元 弘：「建設工事における無人化施工」, 建設マネジメント技術, 2007年6月号, pp.17-22 (2007)

- [17] 森川 博邦：「建設ロボット技術に関する国土交通省における取り組み」, 建設マネジメント技術, 2013年6月号, pp.12-17 (2013)
- [18] 高西 淳夫, 油田 信一：「火山災害復旧の無人化施工—建設機械の遠隔操作による応急的復旧工事」, 学術の動向, Vol.21, No.11, pp.51 (2016)
- [19] 吉田 貴：「無人化施工におけるテレロボティクス」, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.6, pp.585-587 (2012)
- [20] 野村 真一, 北原 成郎, 坂西 孝仁：「最新の無人化施工技術と i-Construction で挑んだ阿蘇大橋地区斜面防災対策工事」, 平成29年度「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集, pp.11-16 (2017)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 浜崎 真一, 矢向 高弘：「遠隔操作システムにおける遅延動画像のための低遅延装飾器の実装と評価」, HAI シンポジウム 2008, 1F-1 (2008)
- [24] 古屋 弘, 岩下 正剛, 陣内 英二, 蔵多 正人, 岡本 邦宏, 小林 只和：「次世代高速通信 5G を用いた重機の遠隔操縦の高度化」, 大林組技術研究所報, No.83 (2019)
- [25] M. Moteki, K. Fujino, T. Ohtsuki, and T. Hashimoto: “Research on Visual Point of Operator in Remote Control of Construction Machinery,” *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp.532-537. (2011)
- [26] 石井 啓範：「建設機械の遠隔操作と双腕作業機」, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.6, pp.582-584 (2012)
- [27] 産経フォト：「遠隔操作でブロック積み上げ 泥流堤防の無人施工を試験 北海道・十勝岳」, <https://www.sankei.com/photo/story/news/160215/sty1602150015-n1.html>, (2020年11月30日)
- [28] 菅原 一宏, 星野 和則, 小倉 弘, 稲田 圭介, 竹内 隆：「油圧ショベルの長距離遠隔操縦システム」, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.519-522 (2016)
- [29] J. Akyeampong, S. Udoka, G. Caruso, and M. Bordegoni: “Evaluation of Hydraulic Excavator Human-Machine Interface Concepts Using NASA TLX,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol.44, No.3, pp.374-382 (2014)
- [30] K. Hayashi and T. Tamura: “Teleoperation Performance Using Excavator with Tactile Feedback,” *Proceedings of 2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp.2759-2764 (2009)
- [31] R. S. Woodworth: “Accuracy of Voluntary Movement,” *The Psychological Review: Monograph Supplements*, Vol.3, No.3, pp.i-114 (1899)
- [32] Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki: “Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement,” *Biological Cybernetics*, Vol.61, pp.89-101 (1989)

- [33] P. M. Fitts: “The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement,” *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, No.6, pp.381–391 (1954)
- [34] R. A. Burno, B. Wu, R. Doherty, H. Colett, R. Elnaggar: “Applying Fitts’ Law to Gesture Based Computer Interactions,” *Procedia Manufacturing*, Vol.3, pp.4342–4349 (2015)
- [35] M. Kim, B. H. Kim and S. Jo: “Quantitative Evaluation of a Low-Cost Noninvasive Hybrid Interface Based on EEG and Eye Movement,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol.23, No.2, pp.159–168 (2015)
- [36] N. K. Kittusamy: “A Checklist for Evaluating Cab Design of Construction Equipment,” *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, Vol.18, No.10, pp.721–723 (2003)
- [37] 岡部 信也, 杉山 玄六 : 「改訂版 油圧ショベル大全」, 日本工業出版 (2007)
- [38] I. S. MacKenzie: “Fitts’ Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction,” *Human Computer Interaction*, Vol.7, No.1, pp.91–139 (1992)
- [39] I. S. MacKenzie: “A Note on the Information-Theoretic Basis for Fitts’ Law,” *Journal of Motor Behavior*, Vol.21, No.3, pp.323–330 (1989)
- [40] A. Murata and H. Iwase: “Extending Fitts’ Law to a Three-Dimensional Pointing Task,” *Human Movement Science*, Vol.20, No.6, pp.791–805 (2001)
- [41] S. A. Jax, D. A. Rosenbaum, and J. Vaughan: “Extending Fitts’ Law to Manual Obstacle Avoidance,” *Experimental Brain Research*, Vol.180, No.4, pp.775–779 (2007)
- [42] J. Accot and S. Zhai: “Beyond Fitts’ Law: Models for Trajectory-Based HCI Tasks,” *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.295–302 (1997)
- [43] I. S. MacKenzie and W. Buxton: “Extending Fitts’ Law to Two-Dimensional Tasks,” *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.219–226 (1992)
- [44] I. S. MacKenzie and W. Buxton: “FFitts Law: Modeling Finger Touch with Fitts’ Law,” *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1363–1372 (2013)
- [45] R. J. Teather and W. Stuerzlinger: “Pointing at 3D Target Projections with One-Eyed and Stereo Cursors,” *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.159–168 (2013)
- [46] S. Friston, P. Karlström, and A. Steed: “The Effects of Low Latency on Pointing and Steering Tasks,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.22, No.5, pp.1605–1615 (2015)
- [47] S. Johnson, I. Rae, B. Mutlu, and L. Takayama: “Can You See Me Now?: How Field of View Affects Collaboration in Robotic Telepresence,” *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2397–2406 (2015)
- [48] S. K. Card, W. K. English, and B. J. Burr: “Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT,” *Ergonomics*, Vol.21, No.8, pp.601–613 (1978)

- [49] M. Moteki, K. Fujino, and A. Nishiyama: “Research on Operator’s Mastery of Unmanned Construction,” Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, pp.540–547 (2013)
- [50] Y. Sakaida, D. Chugo, H. Yamamoto, and H. Asama: “The analysis of excavator operation by skillful operator - extraction of common skills -,” Proceedings of the SICE Annual Conference 2008, pp.538–542 (2008)
- [51] D. Zhao, Y. Xia, H. Yamada, and T. Muto: “Control Method for Realistic Motion in a Construction Tele-Robotic System with a 3-DOF Parallel Mechanism,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15, No.4, pp.361–368 (2003)
- [52] N. R. Parker, S. E. Salcudean, and P. D. Lawrence: “Application of Force Feedback to Heavy Duty Hydraulic Machines,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.375–381 (1993)
- [53] P. D. Lawrence, S. E. Salcudean, N. Sepehri, D. Chan, S. Bachmann, N. Parker, M. Zhu, and R. Frenette: “Coordinated and Force-Feedback Control of Hydraulic Excavators,” Experimental Robotics IV, pp.181–194 (1995)
- [54] K. Ahn: “Development of Force Reflecting Joystick for Hydraulic Excavator,” JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.47, No.3, pp. 853–863 (2005)
- [55] X. Li: “Study on Master-Slave Control Method Using Load Force and Impedance Identifiers for Tele-Operated Hydraulic Construction Robot,” Applied Mechanics and Materials, Vol.29–32, pp.2170–2175 (2010)
- [56] D. Q. Truong, B. N. M. Truong N. T. Trung, S. A. Nahian, and K. K. Ahn: “Force Reflecting Joystick Control for Applications to Bilateral Teleoperation in Construction Machinery,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.18, No.3, pp.301–315 (2017)
- [57] M. Gong, B. Yang, and H. Yamada: “Performance Experiment of a Hydraulic Force Feedback Teleoperation Robot Based on Position and Rate Control,” 2010 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, pp.87–90 (2010)
- [58] J. Hou and D. Zhao: “A New Force Feedback Algorithm for Hydraulic Teleoperation Robot,” The 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, pp.V15-15–V15-18 (2010)
- [59] 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)
- [60] K. Zareinia and N. Sepehri: “A Hybrid Haptic Sensation for Teleoperation of Hydraulic Manipulators,” Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.137, No.9, 091001 (2015)
- [61] S. Lampinen, J. Koivumäki, and J. Mattila: “Full-Dynamics-Based Bilateral Teleoperation of Hydraulic Robotic Manipulators,” 14th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp.1343–1350 (2018)

- [62] L. Carvalho, P. Rezeck, M. V. Lima, L. Pinto, G. Freitas, E. R. Nascimento, D. G. Macharet, L. Chaimowicz, G. Pessin, and M. F. Campos: “On the Evaluation of Force Feedback Augmented Teleoperation of Excavator-Like Mobile Manipulators,” 16th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp.1401–1407 (2020)
- [63] T. Tanimoto, K. Shinohara, and H. Yoshinada: “Research on effective teleoperation of construction machinery fusing manual and automatic operation,” *Robomech Journal*, Vol.4, Article No.14 (2017)
- [64] B. H. Yu, K. Y. Park, K. D. Lee, and C. S. Han: “Static Compensation ZMP Algorithm Preventing Tips-Over of a Tele-Operation Excavator,” *Proceedings of the 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp.652–659 (2012)
- [65] 重松 康祐, 坪内 孝司, 皿田 滋: 「重心及び ZMP 予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御」, *日本機械学会論文集*, Vol.83, No.850, 17-00040 (2017)
- [66] D. Dopico, S. Mendizabal, and M. González: “A Soil Model for a Hydraulic Simulator Excavator Based on Real-Time Multibody Dynamics,” *The Proceedings of the Asian Conference on Multibody Dynamics*, pp.325–333 (2010)
- [67] T. Ni, H. Zhang, C. Yu, D. Zhao, and S. Liu: “Design of Highly Realistic Virtual Environment for Excavator Simulator,” *Computers and Electrical Engineering*, Vol.39, No.7, pp.2112–2123 (2013)
- [68] H. Osumi, T. Uehara, N. Okada, T. Fujiwara, and S. Sarata: “Efficient Scooping of Rocks by Autonomous Controlled Wheel Loader,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.24, No.6, pp.924–932 (2012)
- [69] Y. Meng, H. Fang, G. Liang, Q. Gu, and L. Liu: “Bucket Trajectory Optimization Under the Automatic Scooping of LHD,” *Energies*, Vol.12, No.20, 3919 (2019)
- [70] W. J. Macquorn Rankine: “On the Stability of Loose Earth,” *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol.147, pp.9–27 (1857)
- [71] B. G. Look: “Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables,” Taylor & Francis (2007)
- [72] 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 杉本 和也, 野末 晃, 三村 洋一, 小幡 克実, 山下 淳, 淺間 一: 「無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発」, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.823, 14-00031 (2015)
- [73] 山田 宏尚, 加藤 英寿, 土井 達也: 「力覚提示機能を有する遠隔操作建設ロボットシステムの操作性評価 (カメラ映像による遠隔操作ロボットシステムに力覚提示機能を備えた場合の操作性評価)」, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol.73, No.735, pp.184–190 (2007)
- [74] 岡田 大貴, 横小路 泰義: 「多自由度油圧駆動ロボットのシリンダ圧に基づく手先負荷力推定」, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集*, No.1A2-09b4 (2016)
- [75] 竹之内 栄人, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭: 「触覚呈示による建設ロボットの遠隔操縦支援 -第 1 報: 車体振動計測システムの開発と接触対象物の振動情報の調査-」, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集*, No.1P1-09a4 (2016)
- [76] 深谷 潔: 「掘削機災害防止のための危険体験シミュレータの開発」, *安全工学*, Vol.44, No.4, pp.257–262 (2005)

- [77] A. Lécuyer, C. Mégard, J. M. Burkhardt, T. Lim, S. Coquillart, P. Coiffet, and L. Graux: “The effect of haptic, visual and auditory feedback on an insertion task on a 2-screen workbench,” Immersive Projection Technology Symposium (2002)
- [78] 浜崎 真一, 矢向 高弘 : 「遠隔操作システムにおける遅延動画像のための低遅延装飾器の実装と評価」, Human-Agent Interaction Symposium, 1F-1 (2008)

引用既発表論文

A. 学術雑誌等掲載論文

- [1] Masaru Ito, Yusuke Funahara, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “Development of a Cross-Platform Cockpit for Simulated and Tele-Operated Excavators,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31, No. 2, pp. 231–239, 2019.
- [2] Kazuyuki Matsumura, Masaru Ito, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “Influence of Restrictions on Range of View From Cockpit in Operation of Hydraulic Excavator,” *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 90520–90527, 2020.

B. 国際学会等講演論文

- [1] Masaru Ito, Chiaki Raima, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “A Study on Machine Instability Feedback During Digging Operation in Teleoperated Excavators,” *Online Proceedings 2020 13th International Conference on Human System Interaction (HSI)*, pp. 14–19, Tokyo, Japan, Jun. 2020.
- [2] Kazuyuki Matsumura, Masaru Ito, Chiaki Raima, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “Reaching Difficulty Model of Swinging Operations of a Hydraulic Excavator Considering the First-Order Delay,” *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020)*, pp. 547–551, Fukuoka, Japan, Oct. 2020.

その他既発表論文

C. 学術雑誌等掲載論文

- [1] Ryota Sekizuka, Masaru Ito, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “System to Evaluate the Skill of Operating Hydraulic Excavators Using a Remote Controlled Excavator and Virtual Reality,” *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 6, Article142, 2020.

D. 国際学会等講演論文

- [1] Ryota Sekizuka, Masaru Ito, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “Evaluation System for Hydraulic Excavator Operation Skill Using Remote Controlled Excavator and Virtual Reality,” *Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3229–3234, Macau, China, Nov. 2019.
- [2] Chiaki Raima, Masaru Ito, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “Developing a sense of agency scale for heavy machinery operation,” *Online Proceedings 2020 13th International Conference on Human System Interaction*, pp. 45–49, Tokyo, Japan, Jun. 2020.
- [3] Yuzuki Okawa, Masaru Ito, Ryota Sekizuka, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, “An Assistive Interface of a Teleoperation System of an Excavator by Overlapping the Predicted Position of the Arm,” *2020 Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 74–78, Fukuoka, Japan, Oct. 2020.

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 工学研究科 (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。山本 透 教授にはコベルコ建機夢源力共創研究所の運営についても多大なるご尽力をいただきました。深く感謝いたします。

さらに、広島大学 学術・社会連携室 来間 千晶 特任助教，同大学 大学院 工学研究科 (先進理工系科学研究科) 脇谷 伸 講師，木下 拓矢 助教には、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 新事業推進部 部長 山崎 洋一郎 氏，同部 新事業企画グループ グループ長 田中 精一 氏，同部 新事業 DX 推進グループ グループ長 佐伯 誠司 氏，同部 新事業テクニカルサポートグループ グループ長 上村 佑介 氏には、研究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、先端技術開発部 モデルベースシステム機能開発グループ グループ長 小岩井 一茂 氏には、研究の進め方，論文執筆等，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 新事業推進部 新事業テクニカルサポートグループ 上田 員弘 氏，梶山 広行 氏，藤原 裕介 氏，大谷 真輝 氏，羽馬 涼太 氏，森田 有輝 氏，松田 優也 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。

共に広島大学へ出向した洪水 雅俊 先端制御技術共同研究講座助教には，研究についてアドバイスやご協力をいただくと共に，研究所の運営について率先して取り組んでいただきましたことを本当に深く感謝致します。

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ている学生の，関塚 良太 氏，大川 夢月 氏，増永 准也 氏には，筆者に至らぬところが多々あったとは感じておりますが，研究に励んでいただいたこと，様々な場面でご支援いただいたことに感謝致します。

最後に，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。